

# 土壤低吸力段持水性能及其与 早期土壤干旱的关系研究

庄季屏 王伟

(中国科学院林业土壤研究所)

## 摘 要

本文研究了东北5种耕作土壤 $<1$ 巴的低吸力段持水性能,包括影响低吸力段持水量的因素、所吸持水分对植物的有效程度、比水容量及脱水速度等。根据东北地区春旱尽管程度不同,但发生较为普遍的这一特点,分析、比较各种土壤基质本身存在的差异,并就它们对早期土壤干旱的抗逆能力作出评价。结果表明,熟化程度较高的草甸棕壤最优,而砂壤质冲积性草甸土最差。

土壤吸力的范围,大致可区分为三段:即(1)低吸力段为吸力值 $<1$ 巴;(2)中吸力段为吸力值 $1-15$ 巴;(3)高吸力段为吸力值 $>15$ 巴。

其中 $15$ 巴以下的中、低吸力段,由于正相当于植物有效水的范围,因而也是土壤水分工作者研究的主要对象。特别应指出的是 $<1$ 巴的低吸力段,它对确定灌溉时间和灌溉量有重要意义。但因为吸力范围较窄,与其相对应的湿度值较高,所以一般认为它对非灌溉土壤并无多大研究价值而常被忽视。实际上,由于低吸力段吸持的水分主要是受毛管力支配,运动能力强,有效程度高,所以即使是对旱作土壤,也仍有一定意义。特别是在某些特定条件下,它就更具有较大的研究价值。

我国东北地区年降水量的 $60-70\%$ 集中于夏秋之际,加上一只有一熟,生长季田间耗水总量相对较少,作物收获后,土壤中往往积聚一定量的水分。另外,因冬季严寒,季节性冻层普遍存在,结冻时由于上下土层间温度梯度的影响,又使部分水分向上运移。因此,当早春冻层开始融化时,除西部半干旱地区外,融冻水一般可在土壤表层聚积而形成一段时间长短不等的高湿期(土壤湿度在低吸力范围内)。而后由于降水过少、气温升高较快,使蒸发剧增而导致某些土壤易遭春旱<sup>[1]</sup>。本文针对这一特点,在实验室条件下对东北几种主要耕作土壤低吸力段的持水性能进行探讨和比较研究,着重于从土壤基质本身的差异来分析春夏之际高湿期之后可能出现的早期土壤干旱,并对各种土壤的抗逆能力进行初步评价。

## 一、试验材料和方法

(一)供试土壤 供试土壤为四种具有一定代表性的耕作土壤和一种草甸土:深厚黑土,采自黑龙江省嫩江县九三地区(以下简称黑土),质地为轻粘土。轻度苏打盐渍土,采自吉林省前郭县,经过20余年的土壤改良(简称改良盐土),质地为中壤土。棕壤,采自辽宁省昌图县,质地为中壤土。草甸棕壤,采

自辽宁省沈阳市,质地为中壤土。冲积性草甸土,采自浑河泛滥地(简称草甸土),质地为砂壤土。

(二) 土壤低吸力段持水性的研究方法 考虑到供试土壤之间质地和团聚体大小的差异甚大,过筛不宜太细。所以将上述 5 种土壤的风干土样通过 3 毫米筛孔后,分别装入大型盆钵( $\phi=30$  厘米, $h=30$  厘米),使容重均匀地控制在 1.15—1.20 克/立方厘米,由盆底进水浸湿至毛管饱和,然后将两支真空表式负压计同时埋入土中,陶土管中心位置的深度为 12 厘米,一昼夜后开始定时观测,至一定吸力值时用重量法分别测定含水量,并绘制出水分特征曲线,即各种土壤在低吸力段的持水曲线(从湿到干的脱水曲线,见图 1)。

## 二、结果和讨论

### (一) 影响低吸力段持水量的土壤因素

1. 质地:土壤所吸持的水量,与其本身的质地密切相关,质地愈细,持水量愈高<sup>[2,3]</sup>。表 1 表明黑土最粘重,其物理性粘粒( $<0.01$  毫米)可达 64.9%,而粘粒( $<0.001$  毫米)为 40.5%。因此,黑土吸持的水量相对最高。其它几种土壤的持水量,都有规律地随着粘粒含量的减少而降低。

2. 有机质:土壤有机质对持水量有一定影响,一般来说,有机质含量高的土壤,吸持水分较多,如黑土的有机质含量就高达 4% 以上。但有机质高的土壤,其低吸力段持水量未必都高,例如,表 1 中改良盐土和草甸棕壤的有机质含量几乎相等,均约为 2.2%,但盐土粘粒相对较多,其持水量就比草甸棕壤为高;又如昌图地区耕作棕壤有机质含量最低,仅 1.05%,但沈阳地区砂壤质耕作草甸土的表层,有机质可达 1.49%。然而,其持水量却相反,棕壤要比草甸土高得多。这就足以说明,土壤有机质对低吸力段持水量的影响,远不如粘粒为大。

表 1 土壤性质和持水量(不同吸力下的含水率)的关系

Table 1 The relationship between soil properties and water-retention capacities (soil moisture contents at different suction)

土 壤 Soil	质地 Texture	<0.01mm 物理性粘粒 (%) Physical clay	<0.001mm 粘粒 (%) Clay	有机质 (%) Organic matter	土壤吸力(巴) Soil suction (bar)				
					0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
					土壤含水率(%) Soil moisture content				
黑土①	轻粘土	64.88	40.52	4.09	40.0	34.4	30.7	27.9	28.0
改良盐土②	中壤土	32.88	22.80	2.19	31.3	25.6	21.2	19.5	18.7
棕壤③	中壤土	32.96	19.84	1.05	28.9	24.6	20.5	18.8	18.0
草甸棕壤④	中壤土	31.28	13.16	2.15	28.8	23.4	19.2	17.9	15.8
冲积性草甸土⑤	砂壤土	—	—	1.49	14.3	12.0	9.9	8.6	8.3

① Black soil; ② Ameliorated soda saline soil; ③ Burozem; ④ Meadow burozem; ⑤ Alluvial meadow soil.

除上述诸因素外,还应指出:因本试验系在实验室条件下进行,如果在田间,土壤结构性质是影响低吸力段持水量相当重要的因素之一<sup>[5]</sup>。此外,由可溶性盐分引起的溶质

吸力,对负压计测得的持水性能会带来一定影响<sup>[3]</sup>,但考虑到供试盐土经多年改良后,总盐量已降至 0.1% 左右,与一般耕作土壤差别不大,因此对盐分的影响未予讨论。

温度是一项能对持水量产生颇大影响的环境因素,尽管它对低吸力段起的作用比中吸力段相对较小<sup>[6]</sup>,但为了更精确地比较不同土壤基质的差异,我们特将同一组供试土样都置于完全相同的温度条件下进行试验。至于温度对土壤吸力变化和脱水速度的影响,还将在下面讨论。

## (二) 低吸力段所吸持水分的有效性问题的

土壤有效水范围的经典概念是从田间持水量 (FC) 到凋萎湿度 (PWP)。晚近以来,不少学者对田间持水量的概念和该水分常数是否存在持有异议<sup>[6]</sup>,因此建议用吸力表示。通常是将 1/3 巴作为一般壤质土有效水的上限(砂质土约为 1/10 巴),而以 15 巴作为其下限。至于在 1/3 巴至 15 巴这一范围内的水分,其有效程度是否完全相等,也是一个久有争议的问题,但到目前为止,已有更多的人证实在有效水范围内的水分并非同等有效<sup>[3]</sup>。M. M. Абрамова 早就提出所谓“生长阻滞临界湿度”或“毛管联系断裂湿度”(BCM) 的概念<sup>[4]</sup>。就是说,在有效水范围内,还可以根据其有效程度,以 BCM 为界,划分为两段: FC—BCM 是易效水,而 BCM—PWP 这一段就是难效水。因此,当土壤含水量低于 BCM 时,虽然尚未达到 PWP 值,但水分的运动性和有效程度显著降低,作物生长已受影响,甚至已有可能导致减产。Абрамова 和其它学者还进一步证明 BCM 大致相当于 FC 的 70—75%<sup>[4]</sup>

根据我们用不同方法对东北几种耕作土壤进行的多次测定和计算,发现吸力为 0.2—0.3 巴(即相当于一般壤质土壤的 FC)时湿度值的 70—75% (即理论上的 BCM),大致相当于 0.8—1 巴时的湿度值(参见表 1),而 <0.8 巴恰恰是负压计所能测出的吸力范围。可见,尽管这一很窄的范围只是作物生长期内耕作土壤所能出现的全部吸力范围(< 15 巴)中的一小部分,然而却是很重要的一部分,因为这一段水分的运动性很强,对植物最易效。而且从数量上看,除了很粘重的土壤外,Richards 和 Marsh 认为负压计测定的范围,一般可占土壤有效水总量的 50% 以上<sup>[5]</sup>。这就进一步证明研究低吸力段持水性能所具有的重要意义。

## (三) 低吸力段持水曲线的剖析

1. 比水容量: 根据图 1 所列东北 5 种耕作土壤低吸力段的持水曲线,分别计算出它们在不同吸力值时的比水容量,列于表 2。

由表 2 可知,在低吸力段,土壤比水容量也是随着吸力增大而逐渐降低的,说明即使是在最易效的 FC—BCM 这一区间内,水分的有效程度也并不相等。同时还表明,假如植物以相同的吸力从不同土壤中吸取水分时,由于比水容量的差异,在该吸力下所能取得的水量也不可能是相等的。

各种土壤在低吸力段的比水容量大致可分为  $10^{-1}$  毫升/巴·克和  $10^{-2}$  毫升/巴·克这两个数量级。根据比水容量的定义可知,当到达  $10^{-2}$  级时,植物所能吸取的水量就显著地减少,仅相当于  $10^{-1}$  级的 1/10 左右。因此,  $10^{-2}$  级的出现,基本上标志水分已处于或

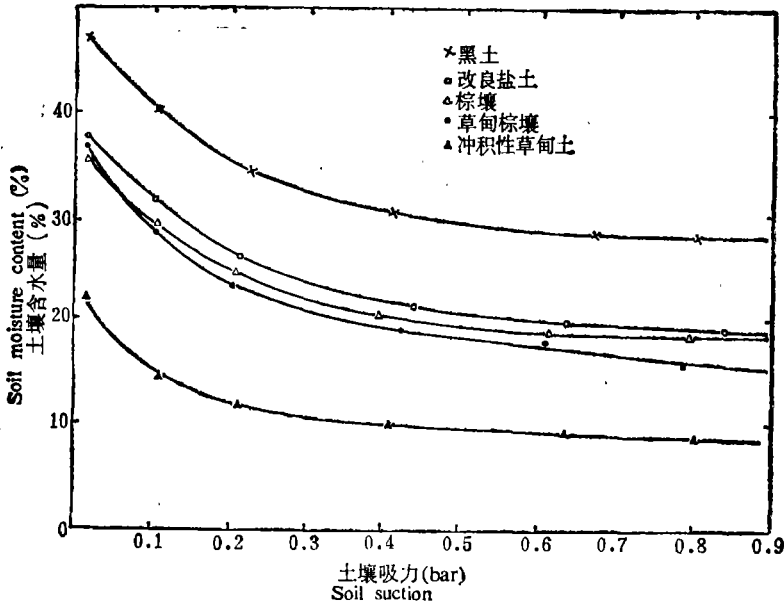


图 1 用负压计测得的低吸力段 (&lt;1 巴) 土壤持水曲线

Fig. 1 Soil water-retention curve (&lt;1 bar) obtained by tensiometer method

表 2 东北几种耕作土壤的比水容量 (ml/bar.g)

Table 2 Specific water capacities (SWC) of several cultivated soils in NE China

土 壤 Soil	土 壤 吸 力 (巴) Soil suction (bar)							
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
黑土	$7.9 \times 10^{-1}$	$5.8 \times 10^{-1}$	$3.3 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$6.6 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$
改良盐土	$7.4 \times 10^{-1}$	$5.2 \times 10^{-1}$	$3.4 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$8.6 \times 10^{-2}$
棕壤	$8.5 \times 10^{-1}$	$4.4 \times 10^{-1}$	$2.6 \times 10^{-1}$	$2.4 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-1}$	$6.9 \times 10^{-2}$	$5.5 \times 10^{-2}$
草甸棕壤	$8.0 \times 10^{-1}$	$4.4 \times 10^{-1}$	$3.0 \times 10^{-1}$	$1.7 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-1}$	$1.6 \times 10^{-1}$
冲积性草甸土	$6.0 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$7.2 \times 10^{-2}$	$9.5 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$7.3 \times 10^{-2}$

大致相当于难效的 BCM—PWP 这一区间,由于其活动性低,植物利用已较困难。

如前所述,壤质土壤 BCM 的理论值应大致相当于 0.8—1.0 巴(粘土甚至可略 >1 巴,砂土则有可能 <0.8 巴)吸力时的湿度值。但从表 2 可见,各种土壤比水容量开始达到  $10^{-2}$  级时的吸力值分别为:黑土为 0.6 巴;改良盐土为 0.8 巴;棕壤为 0.7 巴;草甸棕壤为 >0.8 巴;砂壤质草甸土为 0.4 巴。

这就表明,某些土壤脱水过程中,在还未达到理论上的 BCM 值时,实际就有可能因水分不足而对作物生长产生不利影响。例如,砂壤质草甸土在 0.4 巴时,作物就只能获取少量水分,如果不通过灌溉等措施及时补给水分,就极易发生旱害;地处半湿润地带的九三黑土,虽然自然肥力很高,粘粒、有机质都甚丰富,其吸持水量也比其他供试土壤高得多,但因其粘粒含量过高,比水容量所反映的情况却完全是另一回事。如果也按 FC 的 70—75% 来估算,则黑土的 BCM 值应在略 >1 巴时出现,但实际上在 0.6 巴时比水容量就达

$10^{-2}$  毫升/巴·克这一级,表明从这时开始,作物所能吸取的水量就已经相当少。因此,在早春融冻水造成的上层土壤高湿期之后,随着蒸散量激增,特别是在底墒不足的年份,春旱往往容易影响到当地正处于分蘖—拔节期的春小麦的生长,甚至有可能导致不同程度的减产。至于辽宁昌图的耕作棕壤以及吉林前郭县改良达 20 余年的轻度苏打盐渍化土壤,在吸力为 0.7—0.8 巴时比水容量才降至  $10^{-2}$  级;而沈阳地区质地适中、熟化程度较高的草甸棕壤,其持水性能相对最好,在低吸力段的测定范围内,比水容量几乎都在  $10^{-1}$  毫升/巴·克这一级。也就是说,与上述几种土壤相比,在相同的吸力下,作物可以从草甸棕壤中获取较多的水分。值得指出的是,经改良多年的盐土,不但理化性质已根本不同于原来的苏打盐土,而且如果仅就低吸力段的比水容量来评价其持水性能,它甚至可略优于九三的黑土,也不比辽北的棕壤差。

2. 脱水速度: 由于本试验实际上是一组土壤在相同条件(室温、无风)下的自然蒸发模拟试验。因此,试验所得低吸力段持水曲线,基本上可以反映土壤从湿润期进入干旱前期,因蒸发脱水而引起的能量水平变化过程。

如前所述,低吸力段所吸持的水量,大致相当于有效水中的易效水部分。因此,在这一范围内吸力从低到高的变化,对土壤有效水的损失和对植物生长的影响都至关重要。当然,质地不同的土壤,反应亦不尽相同。据 Richards 和 Taylor 等人报道,当吸力从 0.1 巴增至 0.3 巴时,砂土有效水的 50% 将被耗尽,而壤土为 15%,粘土仅 10%;当继续增至 0.8 巴时,砂土、壤土和粘土有效水耗竭的百分比分别为 80%, 50% 和 20%<sup>[7]</sup>。根据前面已讨论过的观点,我们有理由把上述 0.8 巴时的数字理解为是各种土壤的有效水中易效水所占百分比的近似值。

兹根据图 1 中各持水曲线所反映的吸力变化日进程,来研究土壤在低吸力段的脱水过程。据我们研究,在负压计所能测定的范围内,当土壤逐渐脱水、吸力不断增大时,完成这一过程所需的时间愈短,说明脱水速度愈快;反之时间愈长,说明脱水速度愈慢。其进程主要取决于温度和土壤基质本身的差异(表 3)。

表 3 各种土壤  $<0.8$  巴的吸力变化进程(脱水速度)

Table 3 Changes of suction  $<0.8$  bar of several soils

土 壤 Soil	从 0.1 巴至 0.8 巴所需时间(天) Duration from 0.1 bar to 0.8 bar (days)		从 0.1 巴至湿度约相当于 BCM 的吸力值 所需时间(天) Duration from 0.1 bar to suction of BCM (days)	
	10—15°C	20—25°C	10—15°C	20—25°C
黑土	43	15	34	13
改良盐土	48	15	48	15
棕壤	38	20	35	18
草甸棕壤	>41	>23	>41	>23
冲积性草甸土	24	10	14	7

表 3 的左侧表示不同温度下吸力从 0.1 巴增至 0.8 巴时,不同土壤所需的天数。当分析这一进程时,即可发现其共同特点为:吸力从 0.02 巴开始增至 0.3 巴时,脱水速度甚

为缓慢;但在 0.3—0.8 巴这一段,吸力随时间的变化几乎呈直线关系(见图 2 及图 3)。直线的斜率愈大,表明脱水的速度愈快。比较图 2 及图 3 两组直线的斜率,可知当温度从 10—15℃ 提高到 20—25℃ 时,各种土壤在低吸力段的脱水速度可普遍提高 2—3 倍,这可能是促进土壤早期干旱的原因之一。因为东北地区春季短暂,春夏之际气温往往可在较短的时间内急剧上升,变化的幅度也与上述情况相似。

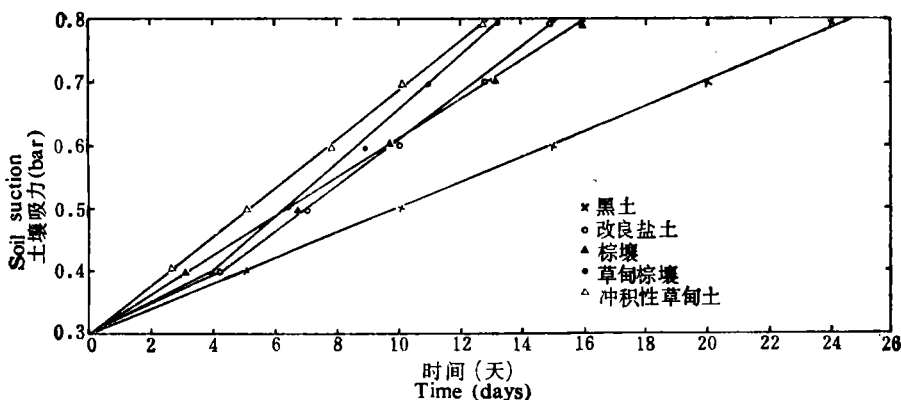


图 2 温度为 10—15℃ 时各种土壤从 0.3 巴至 0.8 巴吸力变化的日进程

Fig. 2 Daily variation of soil suction from 0.3 bar to 0.8 bar at 10—15℃

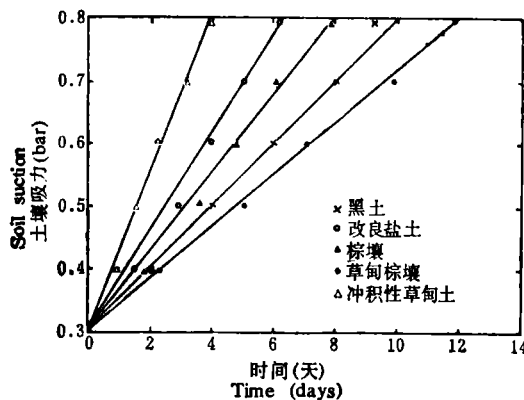


图 3 温度为 20—25℃ 时各种土壤从 0.3 巴至 0.8 巴吸力变化的日进程

Fig. 3 Daily variation of soil suction from 0.3 bar to 0.8 bar at 20—25℃

图 2 和图 3 还表明: 就不同土壤而言,通常质地愈轻,脱水愈快,特别是在温度较低(10—15℃)时,这一规律更为明显。供试土壤中,砂壤质草甸土脱水速度最快,黑土最慢(图 2)。如前所述,当气温升高时,土壤在低吸力段的脱水速度将因蒸发加剧而大幅度增高(图 3),但相对来说,草甸棕壤的变幅却小得多,说明该土壤基质本身具有较大的抗逆能力,而砂壤质草甸土和黑土的变化就要大得多。特别是盐土,当温度增至 20—25℃ 时,土壤脱水速度甚至可比 10—15℃ 时提高 3 倍以上(表 3)。

正如前面已讨论到的,可以把比水容量开始达到  $10^{-2}$  毫升/巴·克这一级时的吸力值视为大致与土壤毛管联系断裂湿度(BCM)相对应,则各种土壤从吸力为 0.1 巴的湿润状

态开始逐渐脱水,至易效水的下限—BCM 值时所需的时间(天数)列于表 3 的右侧。它表明:当温度达 20—25℃ 时,砂壤质草甸土在 7 天后,上部土层的易效水已基本蒸发殆尽,旱象就有可能开始出现;其次是黑土,13 天;而草甸棕壤这一段时间维持得最长,可达 23 天以上;棕壤及改良盐土则居中,分别为 18 天和 15 天。

综上所述,通过对 <0.8 巴的低吸力段持水曲线进行剖析,根据比水容量开始达到  $10^{-2}$  毫升/巴·克时的临界吸力值(湿度值大致相当于 BCM)的大小,以及从 0.1 巴开始脱水至该临界吸力值所需的时间,可以比较和评价土壤基质对早期干旱的抗逆能力。鉴于东北一些地区的春旱,开始时往往并不严重,如能根据土壤基质抗逆能力的差异,及时采取适当的预防措施,在一定程度上将有助于减缓旱情发展,或使旱害减轻。至于旱象是否延续,最终的旱害程度如何,则主要取决于以后土壤对作物的供水状况。

### 三、结 语

以负压计为主要手段来研究非灌溉土壤低吸力段的持水性能,不但简单可行,而且在东北地区春季融冻水在上部土层富集的特殊条件下,可以通过研究它来评价土壤基质在一定时段内对早期干旱的抗逆能力。

影响低吸力段持水性能的土壤因素,首先是质地,其次是有机质,而温度是最重要的环境因素之一。

土壤持水曲线通常仅能反映持水量的多寡,但如果结合低吸力段的比水容量进行研究,就能较正确地评价土壤的持水性能和水分的有效程度;而 0.1—0.8 巴范围内(特别是从 0.1 巴至大致相当于 BCM 的吸力值这一段)吸力从低到高的变化进程,可以反映土壤在低吸力段的脱水速度。

根据比水容量分析和脱水速度比较,对东北 5 种耕作土壤低吸力段持水性能初步研究的结果,证明在相同的气候条件下,各种土壤基质本身对早期干旱抗逆能力的大小,其顺序应为: 熟化程度较高的草甸棕壤 > 改良后的苏打盐土和耕作棕壤 > 深厚黑土 > 砂壤质冲积性草甸土。

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院林业土壤研究所,1980: 中国东北土壤。1—31,124—151 页,科学出版社。
- [2] 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。
- [3] 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。
- [4] A. A. 罗戴(巴逢辰等译),1964: 土壤水。162—283,310—328 页,科学出版社。
- [5] D. 希勒尔(华孟等译),1981: 土壤和水—物理原理和过程。64—82 页,农业出版社。
- [6] S. A. 泰勒(华孟等译),1983: 物理的土壤学: 灌溉与非灌溉土壤的物理学,第 7,9,10 章,农业出版社。
- [7] R. J. 汉克斯等(杨诗秀等译),1984: 应用土壤物理学—土壤水和温度的应用。水利电力出版社。
- [8] Slatyer, R. O., 1967: Plant-Water Relationship. Chapter 3, pp. 67—93, Academic Press.

## STUDIES ON THE RELATIONSHIP BETWEEN SOIL WATER-RETENTION CHARACTERS IN LOW SUCTION RANGE AND THE EARLY STAGE OF SOIL DROUGHT

Zhuang Jiping and Wang Wei

*(Institute of Forestry and Soil Science, Academia Sinica)*

### Summary

It is generally considered that tensiometer is only suitable for investigation of water-retention characters in low suction range on irrigated soils. But, it may also be adaptable for studying the dry cultivated (non-irrigated) soils in Northeast China, because in the presence of seasonal frozen layer the moisture content in upper soil layers is higher in early spring. The present paper deals mainly with the resistance of soil matrix in the early stage of soil drought.

The soil factors influencing the water-retention characters in low suction range are primarily the texture, secondly the organic matter. Besides, temperature is one of the most important environmental factors.

Specific water capacity (SWC) may be used to correctly evaluate the soil water-retention characters and the availability of soil moisture. In addition, the daily changes in soil suction from 0.1 bar to 0.8 bar indicated the differences of dewater rate between 5 cultivated soils.

Based on the studies of SWC and the dewater rate of soils, the results of primary investigation showed that the evaluation of drought resistance of soil matrix per se follows the order: meadow burozem > cultivated burozem and ameliorated soda saline soil > thick black soil > alluvial meadow soil.