

# 水稻土的胀缩特性及其意义

赵诚斋

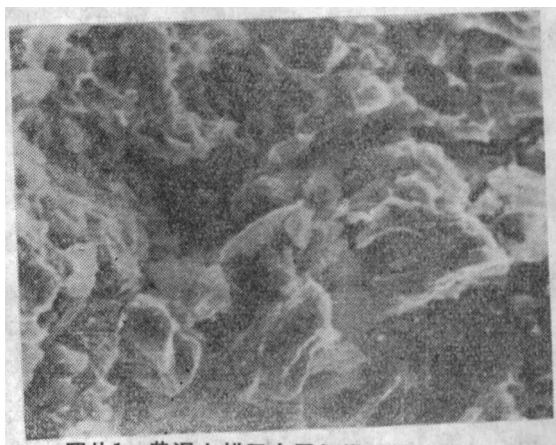
(中国科学院南京土壤研究所)

土壤膨胀和收缩是自然改变土壤物理环境的一种特殊行为。水稻土有水旱两作过程,土壤含水量将在饱和和风干两个极端范围内变化,由于膨胀或收缩土体的容重、机械强度、通气性以及持水量也将发生巨大变化,这对根的生长、机具在土壤上操作以及土壤管理都有很大影响,而且还影响土壤结构的形成和发展。本文根据太湖地区土壤的试验结果进行讨论。

## 一、土壤基本特性

土壤胀缩决定于三个因素,一是粘粒含量,二是粘土矿物类型,三是土壤结构。这地区土壤粘粒含量在18—41%之间,某些湖积物上发育的土壤较粘重,而沿江和沿太湖的土壤质地较轻。高、低平田土壤的粘粒含量在24—31%之间,均属重壤土。粘土矿物以2:1型的伊利石为主,某些低洼地区的土壤含有少量蒙脱。这些粘土均与云母等结合以间层矿物存在。伊利石的晶格虽没有扩张特性,但外表面具有较高的由同晶置换产生的永久电荷密度,故能与水分子发生强烈的相互作用,其中粘粒表面未被阳离子中和的电荷和吸附阳离子的电荷是与水分子的直接作用点。扩散层形成后,加大了水分子与粘粒的作用距离,这在土壤胀缩行为中有特别重要的意义。

水稻土没有明显的团粒结构,稻板田尤其如此。但从土壤放大1000倍的电子扫描显微镜下的照片可看到微结构(照片1),结构体致密,边界不清晰。研究已表明<sup>[1]</sup>,粘粒表面分布阴电荷,而其边角常常有阳电荷,因此,相连粘土片将面对面地被阳离子连接起来,而两者的边角可能被另一带相反电荷的晶体面锁住,也可能被有机质或某些氧化物锁住,形成一个由多粘土片聚合的粘团(图1),这种粘团干燥后具有较强稳定性,并且有较高密度。图1中颗粒成定向排列,空隙较少。但照片1中结构体之间是有孔隙的,不过与固体容积相比,这只有较小比率。根据以前用切片技术所观测的结果<sup>[2]</sup>,土壤随着质地变轻,其致密度明显降低。



照片1 黄泥土耕层电子扫描显微镜下的微形态( $\times 1000$ )

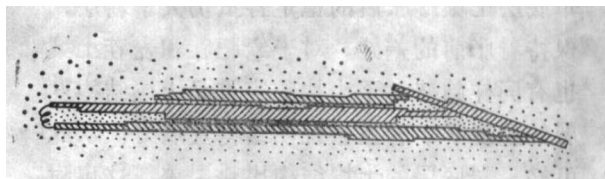


图1 粘粒聚合的粘团  
(左端螺旋状物质为氧化物或有机质)

## 二、土壤膨胀

膨胀存在两个阶段:第一个阶段是粘粒

表面未被阳离子电性中和的电荷及阳离子电荷与水分子直接相互作用的过程。这个过程完成时的水膜厚度不超过4个水分子，虽有强大的吸引力和膨胀压，但粘粒的膨胀可发生在土壤孔隙内，从外表测不出膨胀量，因而也测不到膨胀压。田间土壤不可能有绝对干燥的机会，所以第一膨胀过程既不存在，也是没有意义的。

随着土壤含水量增加，那些被永久电荷吸着的阳离子有一部分仍然与粘粒紧密结合，而另一部分因结合松弛则形成扩散层。这扩散层内的阳离子也受粘粒电性的束缚不能远离，好象存在一隔开外溶液的半渗透性膜。当扩散层的离子浓度大于外溶液浓度时，由于内外渗透压的差异，外溶液中的水分必然要向扩散层内移动，粘土片被水流推开，土壤即发生膨胀，这称为渗透膨胀。这对改变土壤物理环境有很大的作用。

显然，只要有渗透压差存在，土壤膨胀将永不终止。然而，由于粘土片存在如图的结构，粘土片之间的各种锁链都成为妨碍膨胀的摩擦力，有时称为能障。此外土壤上的压力也是抑制膨胀的原因。所以土壤溶液的浓度、土壤结构及土层压力都可影响膨胀量。当然粘粒是膨胀最基本的要素。

这地区灌溉水和潜层水的矿化度都很低，一般在0.57—0.32克/升之间<sup>[3]</sup>，盐基组成中Na和Mg分别高达44和21%，这为渗透膨胀提供了有利条件。在没有压力的情况下，粘粒含量高于20%的土壤，线性膨胀系数(COLE)与粘粒含量有一致的关系(图2)。线性膨胀系数是根据土壤容积变化计算出来的线改变率<sup>[4]</sup>。当土壤粘粒含量低于20%时，粘粒量不足以填满粗颗粒之间的空隙，粘土的膨胀已为这些大空隙所适应，所以膨胀系数很低(<0.05)，而且这种线性关系也不存在了。

土壤膨胀时产生的膨胀压可破坏土体，大的还可破坏土壤上的建筑物。膨胀对其四周的土壤产生挤压，这一方面是破坏力，同时也可促进土壤结构发展。膨胀力同粘粒含量和起始的含水量有关，并随着膨胀量的发展而骤然降低。膨胀量发展到总膨胀的10%，膨胀压就下降50%。如果施加于土壤的压力相当于总膨胀压的10%，则几乎可限制总膨胀量的50%<sup>[4]</sup>，由此可看出，轻质土壤尽管有某些膨胀性能，它改变环境的作用是不大的，对于粘质潮湿土壤，膨胀作用也是不大的。作用大的时间是在干土开始吸水的瞬间。然而我们将从下面看到，土壤渍水以后当土壤还原条件大量发展，即使膨胀压很小对土壤物理状况的改变也是大的。

干燥以后的水稻土都具有较高的水稳性，这特别是粘质土壤，因它产生了如图1的结构，所以土壤膨胀并不导致土块分散，土壤经受的含水量愈低，以后膨胀量愈小<sup>[2]</sup>，而土块的水稳性也愈大。在田间条件下，犁底层的土壤处于特殊位置，一般它的容重比耕层的要大(表1)，而膨胀系数又比耕层的小。故犁底层土壤膨胀后的稳定容重仍大于耕层，保持着胀前的差异。对于绿肥茬和麦茬土壤也有同样趋势。干土块的容重是土壤结构发展的量度<sup>[2]</sup>，容重小说明结构发展好。从此可知，犁底层的土壤结构比耕层差，这也附合常理的。这似乎是，COLE与土壤胀前的容重大小无关，而与土壤结构有关。结构

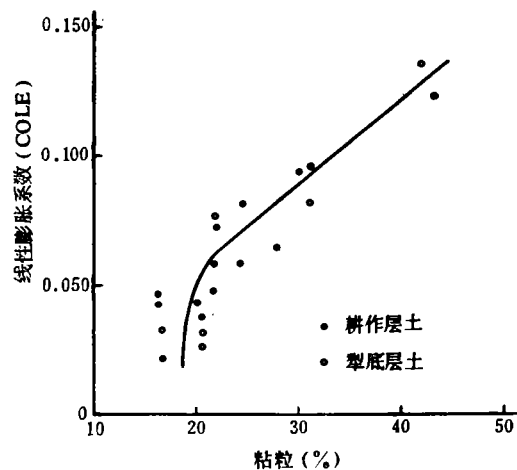


图2 土壤膨胀与粘粒含量的关系

不好的粘质土壤膨胀量较小，这显然是由于受各种连接键的束缚所致。这可说明，膨胀改变土壤物理环境仍然被土壤结构所控制，结构好的土壤因有发达的结构孔隙，渍水以后可自然地变成软烂状态，而结构不好的土壤膨胀不能完全改变僵土性。

在低吸力条件下土壤吸水膨胀，在两天以内即达总量的70-80%<sup>[2]</sup>，但膨胀平衡时间可达三月之久。粘质土比轻质土和耕层土比犁底层土平衡所需的时间都较长。土壤持续吸水不能平衡的原因是土粒不断重新排列之故，这同土壤内的还原条件不断发展有关。还原会引起某些氧化胶结物胶溶，从而使抑制膨胀的摩擦力降低，土壤的持水量和分散量(<0.25毫米的颗粒)都会增加。所以在表现上有机质含量较高、结构又较发达的土壤在长期渍水膨胀以后比有机质含量较低、结构较差的土壤的持水量和分散量更多。这说明水稻土的还原条件对结构破坏有重要作用。

有一定结构的风干土壤，在大气中向其迅速加水，瞬间土壤结构的破坏是膨胀应力和空气压缩应力两者作用的结果。用加权平均直径(WMD)为7.5毫米的团块(黄泥土)，加水后立即测定，土块的加权平均直径降低到2.34毫米。在抽气条件下加水，则土块的破坏将主要由膨胀应力所致，这时为6.39毫米<sup>①</sup>根据这一组试验可算出，由空气压缩应力破坏的占78.5%，而膨胀应力破坏的仅21.5%。用同样的试样在抽气条件下加水，再淹水15天后，土块直径由6.39毫米(WMD)减至5.97毫米，而在还原条件下的减至2.61。这也证明土壤还原对结构有很大的破坏作用。但对结构较差、质地又粘重的土壤，还原导致团块减小不过7%。这又说明，粘粒在结构稳定性上有很大的作用。

上面可概括说明，土壤的还原条件可导致土壤分散，干后则形成僵土块，这时若又回到淹水条件下，土壤就不能被膨胀改变。这些可能是在双三制条件下土壤结构恶化的部分原因。

有结构的土壤由于颗粒之间存在连接键，故在渍水条件下就出现了膨胀势。如果土壤受到强烈的机械搅动，则连接键被破坏，土壤的潜在膨胀就充分显露出来，这可用土壤的特征曲线表示(图3)。在水分吸力3巴以下，扰动土的含水量都比原状土高，犁底

不好的粘质土壤膨胀量较小，这显然是由于受各种连接键的束缚所致。这可说明，膨胀改变土壤物理环境仍然被土壤结构所控制，结构好的土壤因有发达的结构孔隙，渍水以后可自然地变成软烂状态，而结构不好的土壤膨胀不能完全改变僵土性。

表1 耕层和犁底层的土壤膨胀

土 壤	粘粒 (%)	胀前(风干)	膨胀后容重	膨胀系数 (COLE)
		容重 (克/厘米 <sup>3</sup> )	(克/厘米 <sup>3</sup> )	
黄泥土	耕层	30.2	1.68	0.095
	犁底层	31.0	1.82	0.081
栗子土	耕层	41.8	1.78	0.134
	犁底层	42.2	1.90	0.123

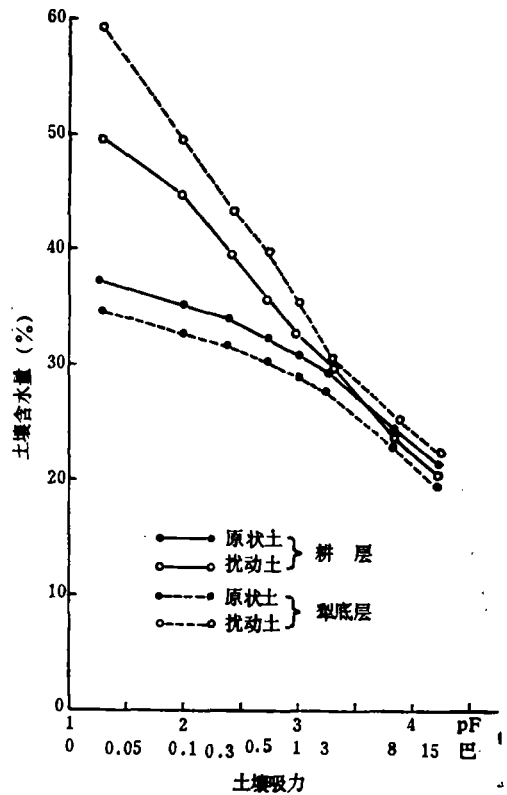


图3 黄泥土渍水扰动对膨胀的影响

① 张佳宝，土壤粘团的原因及其对作物生长的影响。土壤研究所硕士研究生论文，1985。

层的土壤这两者的差异更大。在饱和情况下含水量是孔隙比的函数，所以含水量也可作为膨胀指标<sup>①</sup>。两者持水量之差是土壤结构抑制膨胀的度量，故又是土壤的稳定性指标<sup>[5,6]</sup>。犁底层原状土的膨胀量较小，这说明它有较高的稳定性。

### 三、土壤收缩

土壤含水量减低过程中，毛管弯月面的水分张力也随之发展，土粒之间的拉力是水分张力的函数。当土壤含水量很高时，弯月面在土-水体系的表面，水分从土表蒸发，毛细管从体系内抽取水分流至土表，这样，不仅是土表，土内也变紧了。当土内的孔隙出现空气，随着含水量的减少水-空气界面依次向较小孔隙移动，因小孔隙产生的水分张力要比粗孔隙大。在此过程中土粒不断被水膜拉紧，并使其定向排列，扩散层也被压缩了。当土粒相互接触，扩散层干固，于是土壤收缩终止。

土壤收缩率同膨胀系数一样同粘粒含量有很好的线性关系(图4)。同一种土壤，原状土的收缩率比重塑土低，这对耕层土和犁底层土的情况都一样(表2)，这说明土壤结构能降低收缩性，从而也降低土壤容重。显然，

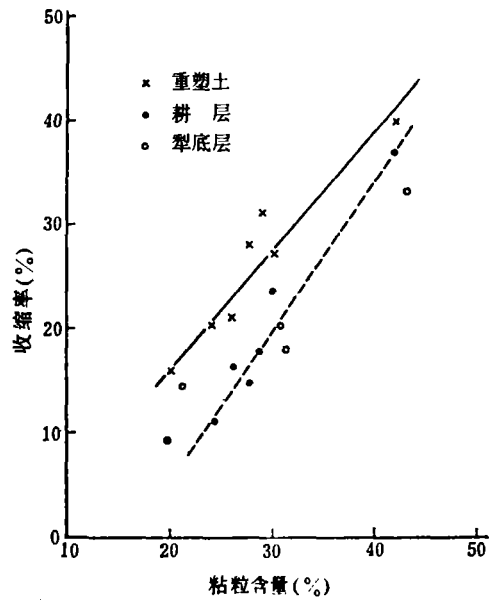


图4 土壤收缩与粘粒含量的关系

表2 不同土壤的收缩性能

土 壤		粘粒含量 <0.001毫米 (%)	有 机 质 (%)	pF2容重 (克/厘米 <sup>3</sup> )	烘干容重 (克/厘米 <sup>3</sup> )	收缩(%) (以干土为底)
栗 子 土	耕 层	42.0	2.64	1.19	1.89	37.0
	犁底层	43.0	1.89	1.30	1.96	33.7
	重塑土	42.0	2.64	1.16	1.92	39.6
黄 泥 土	耕 层	30.3	2.22	1.23	1.61	23.6
	犁底层	31.7	1.62	1.41	1.72	18.0
	重塑土	30.3	2.22	1.27	1.75	27.4
灰 垆 底	耕 层	28.6	2.83	1.37	1.66	17.5
	重塑土	28.6	2.83	1.21	1.77	31.6
乌 山 土	耕 层	27.8	2.86	1.22	1.43	14.7
	犁底层	31.3	1.70	1.33	1.67	20.4
	重塑土	31.3	1.70	1.25	1.75	28.6
白 土	耕 层	20.2	2.08	1.37	1.51	9.3
	犁底层	21.3	1.75	1.40	1.61	13.0
	重塑土	20.2	2.08	1.39	1.67	16.8

① LOW, P·F·, 土壤物理化学讲习班讲义, 南京农学院印, 125-150, 1980.

若土壤含水量不在同一标准,土壤之间作容重比较是没有意义的。水分在 $pF 2$ (田间持水量)耕层容重都在 $1.19-1.37$ 克/厘米<sup>3</sup>之间,有粘粒含量越高,容重越低的趋势,容重值在这范围内一般对作物根的生长没有大的妨碍<sup>[7]</sup>。干土的容重在 $1.49-1.89$ 克/厘米<sup>3</sup>,这时已达到限制根的生长,同上相反,在这范围内有粘粒含量越高而容重越大的趋势。犁底层的湿土容重在 $1.30-1.41$ 克/厘米<sup>3</sup>,干土在 $1.61-1.96$ 克/厘米<sup>3</sup>。可见湿土对根的生长影响不大,而干土已达到完全限制根生长的程度。从此可得出,保持土壤较高含水量水平,这不仅可减低水分应力,而且也可使土壤有较软绵的性质,这对根生长有利。

在土壤含水量减少过程中,比容与含水量的比率存在阶段性变化。若比容(容重倒数)用厘米<sup>3</sup>/克表示,而含水量也用厘米<sup>3</sup>/克表示,两者的比率就是容积改变率。这比值是表示含水量减少时体系内饱和度改变的程度。比值1表示土壤饱和度没有改变,数值愈小饱和度改变愈大。这里不表示累计,只是说明某一土壤含水量变化时的情况。

容积改变率 = 1 的称为常态收缩, < 1 的若在常态收缩的左边(图5)称为剩余收缩,而在右边称为结构收缩,此比率 = 0 则为不收缩。一般原状土都存在四个收缩阶段即结构收缩、常态收缩、剩余收缩和不收缩。结构发展特别好的土壤也会没有常态收缩阶段,它们的容积改变率都在1以下,太湖地区的乌山土就有这一情况。对具有一般结构的中壤质以上的土壤从高含水量降低时,体系内都会出现连续增加气相的情况。但当含水量减少2—3个百分点后,在再进一步减少的过程中气相容积并不随之增加,只有当降低甚多时气相容积才能发展,这时土壤吸力和机械强度都已相当大。由含水量减少来改善土壤通气性的顺序是:栗子土(粘土) < 黄泥土(重壤) < 白土(中壤) < 乌山土(重壤)。

白土的常态收缩的范围很小,实际不存在通气性问题。从乌山土不存在常态收缩的结果可知,重壤土如果结构发展很好也可不出现通气性问题。上面提到的四种土壤,它们的重塑土都没有结构收缩阶段,粘质土的剩余收缩开始的含水量是在塑性限附近,这时不论是土壤吸力还是机械强度都已发展到严重限制根生长的程度<sup>[7]</sup>,可见维护和发展土壤结构有何等重要的意义。秋天的烂耕烂耙和春天的渍水耙耖是破坏土壤结构最强烈的方法<sup>[8,9]</sup>。

在田间条件下,土壤蒸发主要发生于地表,土壤收缩拉力与蒸发面垂直,当土体内的土粒之间的凝聚力小于收缩拉力时,则发生垂直裂隙。因土壤中存在形状和大小都极不一致的结构体或孔隙,故裂隙分布的形状不同于理想均质条件下的六角形,而是形状和大小都不相同的多边形。水稻土结构的发展增加了结构孔隙,结构体收缩时即沿结构孔隙断开,所以裂隙状况也是一种结构指标。

#### 四、收缩和膨胀的滞后特性

粘质泥浆状土壤脱水以后,将会影响以后的膨胀(即不能膨胀到原来的状态)。所以土壤

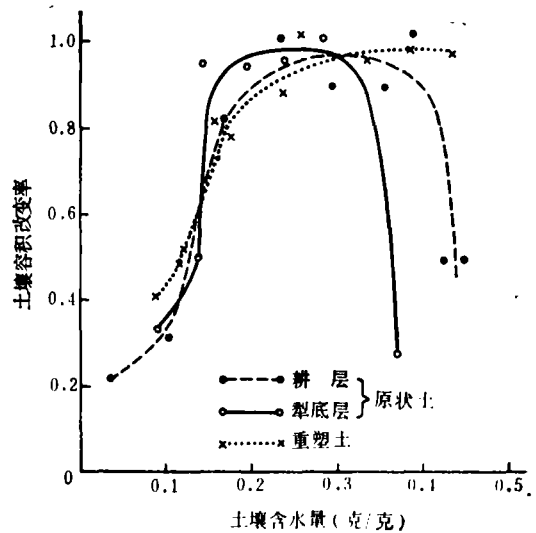


图5 土壤容积改变率随含水量的变化  
(栗子土,粘粒42%)

的胀缩行为不仅是与本身的性质有关，也与过去曾经发生过的胀缩历史有关，其行为遵循下列的胀缩力学。

粘质泥浆状土壤在其脱水收缩过程中，含水量和吸力的关系曲线称为常态收缩曲线。如果用这种泥浆土作固结试验(压缩)，那么可得到一载荷—孔隙比的固结曲线<sup>[5,6]</sup>，这又称为常态固结线。在物理学上，土壤吸力可用压力表示，在饱和情况下，土壤孔隙比也可用含水量表示。饱和土上一定压力下的含水量和与这压力相同的吸力下的含水量相同，施加的吸力和有效垂直应力对改变土壤容积有等值效应，所以这两者可在半对数纸上作成同一图(图6)。这是说，土壤容积随吸力的增加而收缩，同土壤上增加载荷时容积被压缩减少一样。收缩过的土壤又使吸水膨胀，也与压缩过的土壤减载时容积增加一样，但收缩和膨胀所行走的路径不同。下面将根据图6来说明这一规律。

如果泥浆土初次收缩沿ON到达A，然后使湿则土壤膨胀，这时所走的路径不是沿AO，而是AB。如果在B又失水收缩，这也不是沿原来膨胀的路径倒回到A，而是沿BA。上下两线形成一个滞后环。在ON线上可形成无数个滞后环，在较低含水量发生的滞后环总是比较高含水量发生的为低，即在同一吸力前者的土壤含水量(或孔隙比)比后者要低，因土壤干缩在结构键上发生了能量固定。这也就是粘质土壤一旦发生裂隙，就会长久不闭合的原因。烤田以后土壤变板后不再重新变烂也是这个道理。

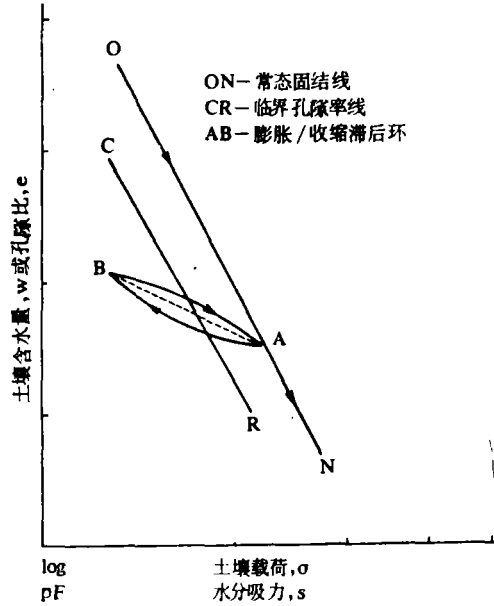


图6 粘质土壤膨胀/收缩滞后特性

如果一饱和粘土在较高含水量范围内，在测定吸力和其对应的含水量之前不断地予以剪切扰动，这不论是从常态收缩线的土壤，或者是从膨胀线的土壤，含水量(或有效压力)将是为临界孔隙率线CR所描述的条件，在这种状态下的土壤都无能量贮存。某一吸力所对应应在膨胀线AB的含水量与在CR线上的含水量之比率为收缩时能量贮存于粘土中的量度，实际上这也是粘土的强度指标。如果一种粘土的吸水膨胀很小，例如犁底层土，这比率必然远低于1，则结构强度是高的；若有一种粘土，膨胀达到的含水量等于CR线上相同吸力下的含水量，则这比率为1，这种土壤的结构只能被其存在的吸力或压力所维持，如烘土<sup>[10]</sup>和某些未经烤田的软烂表土。比率小于1是土壤的过固结状态，底土和曾经强烈干缩过的土壤以及某些渍水不化的僵土块都是过固结状态，虽然它们环境的吸力或压力已经降低，而土壤中由于能量贮存的关系，其孔隙比远低于常态固结线上同这吸力或压力平衡的孔隙比。这种土壤若受力或紧缩时，不是均匀地通过土体变形，而是破开一个面，平衡孔隙比不能达到，坚硬粘土可破成较小的团聚体。这是干湿交替形成土壤结构的基本道理。

(下转第235页)

3. 泛滥平原。包括小清河、黄河、南四湖西北的东营、惠民、德州、聊城、菏泽地区大部，占全省土地面积的34.7%，1348个土样的速效硼平均含量0.67ppm，其中0.5—1.0ppm的样本占62.9%，是土壤速效硼适中的主要地区。

(1) 黄泛平原：以黄河泛滥的各种洼地、缓平坡地及河滩高地等地形部位形成的潮土、湿潮土、盐化潮土及褐土化潮土等，占全省土地面积的27.9%。土壤速效硼平均含量0.65ppm，其中0.5—1.0ppm的样本占62%。

(2) 滨海平原：包括海相沉积、海相沉积与河流交错沉积及现代黄河河口冲积、堆积而成的滨海潮土、滨海盐潮土滨海潮盐土和滨海盐土等，占全省土地面积的6.8%。土壤速效硼平均含量0.81ppm，其中0.5—1.0ppm的样本占66.9%。

### 三、结 语

(一) 山东省棕壤、风沙土、水稻土、褐土74—94.5%土样速效硼 $<0.5$ ppm，是低硼土类；盐土81.5%土样速效硼 $>0.5$ ppm，是高硼土类；潮土和砂姜黑土介于二者之间，属中硼土类。

(二) 土壤剖面中速效硼含量以表土最高，多数随深度而减少，棕壤通体低硼，盐土表土和底土均高于心土；其余各土类随深度增加而减少，但减少的强度不同。

(三) 土壤速效硼因地貌、地形不同，呈明显的区域性分布。按地貌类型可分为：1. 鲁东、鲁中南山地丘陵缺硼区；2. 山前平原、湖沼平原潜在性缺硼区；3. 黄河平原、沿海平原中硼区。

### 参 考 文 献

- [1] 欧阳洮、钱承梁，我国某些主要土壤类型中硼的地球化学特征。土壤，14(4)，127—132，1982。
- [2] H·A·施罗德著(陈荣三译)，痕量元素与人，8—17页，科学出版社，1978。
- [3] 张俊民等，山东省山地丘陵区土壤，1—28页，山东省科学技术出版社，1986。

---

(上接第230页)

### 参 考 文 献

- [1] Russell, E. W. (赵诚斋译)，土壤结构(土壤结构的保持和改良)。土壤农化参考资料，4:7—16, 1975。
- [2] 赵诚斋等，水稻土的水理性质与土壤耕作的关系。土壤学报，20(2):140—153, 1983。
- [3] 中国科学院南京土壤研究所东亭任务组，江苏无锡东亭大队地表盐渍问题的初步研究。土壤，4:172—176, 1975。
- [4] 赵诚斋，土壤膨胀及其研究方法。土壤学进展，2:1—12, 1982。
- [5] Greacen, E. L., J. Soil Sci., 11:313—333, 1959。
- [6] Greacen, E. L., Aggregate Strength and Soil Consistence. Trans. 7th Int. Cong. Soil Sci., Madison 1:256—264, 1960。
- [7] Barly, K. P. and E. L. Greacen: Advances in Agro., 19:1—40, 1967
- [8] 赵诚斋等，水稻土合理耕作的研究。土壤学报，18(3):223—233, 1981。
- [9] 赵诚斋，太湖地区水稻土的耕作问题。土壤，2:56—60, 1984。
- [10] 雷文进，江苏省里下河土壤的发生和改良。土壤学报，7(3—4):227—236, 1959。