第13卷 第3期 土 壤 学 报 Vol. 13, No. 3
1965 年 9 月 ACTA PEDOLOGICA SINICA Sept., 1965

土壤物理机械性质研究的进展*

赵 誠 斋
(中国科学院土壤研究所)

土壤物理机械性质即土壤的力学性质，它和以基础工程为对象的土力学或土质学的研究范畴和内容不同，但有一定联系。土壤物理机械性质是指机具、植物与土壤相互作用时及土壤在干湿变化下所产生的一系列物理机械的本性，具体包括土壤的结持度、耕作上的动力学因子及膨胀收缩等。现今一般文献归类也把土壤的耕性包括在内，所以研究土壤物理机械性质是为了了解土壤的耕作性能和植物生长的物理环境以及正确设计农业机具。自从人类开始农业经营以来，就涉及到土壤物理机械性质的问题，但是比较系统的研究还是本世纪 20 年代的事。

1925—1935 年 Nichols, Kummer[48,50] 等在美国 Alabama 农业试验場和 Keen, Haines[44,46] 等在英国 Rothamatted 农业试验場分别研究了土壤的抗机械强度、曳引阻力、粘着力及土壤-金属的摩擦，探索不同土壤及不同土壤含水量的影响，并为评价耕作条件和对机具的设计提供土壤属性的资料。Nichols[48] 还在实验室用模拟试验观察犁在工作过程中与土壤的作用及土壤含水量对曳引力的影响。土质学研究者 Atterberg 对土壤结持性分类的研究，Scott-Blair 对塑流性质及其测定方法的发展，都丰富了土壤物理机械性质的研究内容。Baver[20,21], Russell[64] 等人研究了土壤塑流性的内在原因及其受不同土壤性质(有机质、粘土矿物、阳离子)的影响。Haines[43], Fisher[33] 对土壤粘结机制深入的进行了研究，并提出水膜粘结的理论。Russell[64] 等根据物理化学的观点提出分子内聚力的假设。Keen[45] 曾研究耕作方法对作物生长的影响，以评价耕作方法或机具的好坏。早些时候，Haines 曾研究粘土块的膨胀和收缩，说明耕层物理环境的改变。随着工作的发展，有关测定的仪器和研究方法相应建立，但仪器仍较简单，很多是从土质学或土力学方面转借而来。

本世纪 30 年代，苏联大力发展农业机械化，也逐渐开展土壤物理机械性质这方面的工作，Качинский[13]研究了土壤的坚实度(或楔入强度)、粘着力与含水量的关系，提出了土壤的适耕性。Вадюнина[8] 曾进一步研究不同土壤及不同熟化程度的土壤，其粘着力与含水量的关系。Некрасов[15], Сидери[17]等曾提出评价机具和耕作方法的土壤指标。土壤比阻是机械化耕作的重要参数。一些研究者不仅研究了耕作速度、深度及土壤含水量对它的影响，还进行了很多间接测定的探讨工作。相应的对土壤变形阻力、摩擦力在不同条件下的变化也作了一些研究。

在 1935 年以后，英、美的研究者单纯测定土壤物理机械性质的工作就很少了，多偏重于不同机具和耕作方法对土壤物理性质及产量影响的说明，因此，土壤耕性为一些研究者所重视，其内容可分为二：(1)测定方法，以 Scott-Blair[65], Shaw[67], Richards[60] 为主，他们提出了土壤的压缩性和坚实度为耕性指标，创造和改进了仪器。(2) 植物需要的耕性，Yoder[74], Culpin[29] 等曾在田间进行试验研究。这样的状况一直维持到第二次大战期间。战后，美国因为长期机械化耕作，有些地区的土壤，由于土壤压实而引起农作物产量降低。另外，为了提高工作效率，降低生产成本，增加农机具马力，增加了农机具重量，使土壤容易发生压实。因此，系统研究了土壤性质和机具条件对于土壤压实的影响，并用配有示波器的应变仪测定压应力在土壤中的分布，同时也展开了土壤紧实度与作物生长间关系的研究。土壤的抗机械强度关系到土壤的承载能力和曳引阻力，Greacen[38,40] 不仅从理论上作了进一步的研究，并探讨与含水量的关系。Bodman[23], Koenigs[47] 对土壤粘闭发生的条件作了较深刻的阐明。Fountaine[34] 对土壤粘着力发生的机制作了较详细的研究，并根据犁与土壤作用的原理提出了犁

* 本文承蒙熊毅教授审阅改正，谨此致谢。

不粘土的设计原则。Nichols[51,53] 等对耕作机械与土壤的关系有更深入的阐明。1955 年以后，不少研究者对土壤膨胀的机制开展了很多工作，但多偏重于物理化学的观点。

苏联在第二次大战后，从事这方面的研究已较少。Бахтин 等进行了不同土壤的比阻、坚实度及抗剪强度的测定，其中主要成果有：(1)1954年苏联土壤研究所出版了以 Бахтин 为主的土壤物理机械性质研究的专报；(2)定型了测定土壤粘着力、坚实度、土壤摩擦及比阻的仪器。

以上简述土壤物理机械性质研究的进展概况，下面将分述土壤的抗机械强度、压实性、粘着力及适耕性和耕性的具体资料。

一、土壤的抗机械强度

土壤的坚实度、抗剪或抗压强度以及楔入阻力都是说明土壤的抗机械强度，它们之间在实际的概念上很少区别，只是不同工作过程中的不同说明。

土壤坚实度是柱塞插入土壤时所表现的阻力，测定的方法虽较简便，但柱塞与土壤间的作用是复杂的，密切受到土壤压缩时颗粒之间的粘结力、内摩擦及柱塞——土壤间摩擦力的影响。当土壤含水量较大时，土壤粘着力也有关系。土壤坚实度是一个综合的指标，所牵涉到的土壤力学因素与犁对土壤作用时所牵涉到的因素相似。Качинский[14] 根据统计的方法建立了土壤坚实度与土壤比阻的迴归关系式，但它的誤差可达 20%。Волкановский 等也制定了内容上略不同的土壤坚实度与比阻的经验公式。Вадюнина[9] 建立了土壤坚实度与康拜因曳引阻力的关系式，它与比阻公式相反，曳引阻力随着坚实度增加而减小。由于土壤坚实度决定着曳引阻力，Качинский[13] 根据坚实度与含水量的关系来确定土壤的适耕性，并用正常湿度下所测定的坚实度作为土壤强度特性，而将土壤分级。但 Hénin[77] 用坚实度评价土壤的结持力是通过另一方法，他认为，理想的疏松土壤，其坚实度与土壤深度在理论上为一直线关系(这关系也为实验证明)，据此算得的理论功与实际观察功的比值 A 可用以判断土壤的结持特征。Bodman 认为，用这方法来说明同一土壤由于时间、处理及含水量不同而引起结持性的差异，比说明两种悬殊不同的土壤更为恰当。

用抗剪强度表示土壤强度有明确的物理含义。Nichols[48]，Payne[55] 等分析犁的碎土作用时指出，引起土坡破坏的主要原因是剪，按照Nichols的意见，剪是土体越过土体的滑移，可用土粒任何移动的内阻力来表示。土壤剪与固体剪有很大不同，产生剪的力是分配在一简单的平面上，在正常湿度条件下，当一层土壤受到力的作用在另一层土壤上滑移，先有增加接触的趋向，并增加土粒之间的粘结力，而不是立即减少颗粒之间的结合。如果土壤含水量过高，剪切面可仍为水膜粘合，但在干后，剪切区较未剪切区有更大的强度。

按照库伦定理，土壤的抗剪强度是由粘结力(或称内聚力)和内摩擦力所组成，内摩擦力是摩擦系数与正压力之乘积，可用下式表示：

$$S = C + P\phi \qquad (1)$$

式中：S——抗剪强度，C——粘结力（或称内聚力），P——正压力，ϕ——内摩擦系数。有不少人研究了抗剪强度与正压力的关系。Nichols 指出，塑性土壤的抗剪强度与正压力成比例。Tergahi 认为，土壤凝聚体的内摩擦系数随正荷载减少而增加。Пигулевский[16] 认为，正压力增加而内摩擦系数减低的现象，是由于作用力的方向与土样位移方向产生倾角，这是仪器上的缺点。近来 Fountaine[35] 用各种不同的剪力仪的研究结果，表土在 0—10 磅/吋^{2}的正压力下，剪力角很高。Бахтин[7] 用淡栗钙土和南方黑钙土为试样，在 0.5—3.0 公斤/厘米^{2}的正压力下测定土壤的抗剪强度也指出，土壤的抗剪强度随着正压力而增大，而剪力系数反减少，由此看来，疏松的表土，其剪力角(内摩擦系数)是随压力而改变的，在某种程度上并不符合库伦公式。

对于影响抗剪强度的原因，也为另一些研究者进行了研究。理想的为水饱和的粘土，Hvorslev[76] (1937) 曾指出，影响土壤的抗剪强度的因子有两个，一为有效荷载与摩擦系数所决定的摩擦剪阻力，一为土壤孔隙比所决定的土壤粘结力。从泥浆状态压缩而成的粘土，其孔隙比为所用的正荷载所决定，总抗剪力一般与荷载成比例，符合库伦公式。这一结论也为最近 Greacen[40] 用特殊的剪力仪研究所证实。但他指出，对于不饱和的土壤，在颗粒与颗粒接触点上水的吸力起附加荷载的作用，在表观内摩擦角接近于 45° 的范围内抗剪强度为

$$Su = (P + S)\tan\phi_s(1 - E) \qquad (2)$$

式中 P——正荷载，S——土壤对水的吸力，$\tan\phi_s$

——饱和土壤的内摩擦系数，E——充气孔隙。当土壤压缩到为水饱和时吸力变成零，$1-E$ 接近于1，这样以水饱和的土，其抗剪强度为 $S=P\tan\phi_s$。但 Greacen 发现，当所用的荷载大于某一临界值时，土壤的不良导水性会阻止土壤的固结，土壤中的水承受了一部分正荷载，这使土壤的抗剪强度显著偏低。

土壤的无侧限抗压强度 q_c 也为粘结力 C 和内摩擦角 ϕ 所决定[1]，它们之间的关系是：

$$q_c = 2C\tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \qquad (3)$$

所以不论破坏土壤的作用力是什么，土壤本身构成阻力的因素只有两个，一是土壤的粘结力，一是土壤的内摩擦力。这符合 Жукк[11] 田间实际测定的结果：土壤的抗拉或抗弯力小于抗压或抗剪，因为前者没有内摩擦力存在。

下面将土壤的内摩擦系数和内聚力的有关资料分别作以叙述。

1.内摩擦系数：土力学书籍中载明，内摩擦系数随着质地变轻而增大，但疏松表土的资料，远远大于这些数值，因表土含有团聚体的缘故，土粒团聚后颗粒的直径增大了。Nichols[51] 的资料表明，内摩擦系数随着团聚体的直径增加而增大。Romano[61] 最近曾发现，它也随塑性值而提高。

2.土壤的粘结力：土壤粘结力可分为水膜粘结力和分子内聚力两种，疏松的团聚化土壤或砂土，土壤的粘结力主要为水膜粘结力所决定，它随含水量的变化呈抛物线型；对于粘闭的土壤，两种力的作用同时存在，土壤的粘结力随含水量的变化呈双曲线，含水量大的部分为水膜所决定，含水量降低后，则为分子内聚力所决定。Atterberg 早期的工作并指出，两者在曲线上有明显的分界点。后来 Haines[42] 的工作并未证明此分界点存在，而认为它们有重迭过程。最近山中金次郎[3]又用实验和理论分析证明，此点是存在的。

水膜粘结的机制，Haines[43] 曾提出表面张力的理论概念，他认为当土壤含水量低到不饱和时，土壤的粘结力为各个拉住土粒的水膜力之总和。每个水膜力等于弯月面内一边压力缺乘以水膜的面积。后来 Fisher[33] 将此概念作了进一步发展，认为水膜的总张力等于弯月面内侧的压力加上空气——水界面上作用的张力。数学推导指出：水膜单位横断面积的张力随颗粒半径增加而减小，但当水膜的曲率半径小至分子大小时，则此关系不存在。Nichols 认为土壤颗粒大多是片状的，而非球形，因此他曾提出另一公式，考虑到颗粒之间的距离和液体的接触角。最近，土壤强度与水的张力的关系已直接为 Childs[27] 的资料所证实。

土壤产生分子内聚力，粘粒起着非常重要的作用。Russell[64] 曾根据物理化学的观点提出了它的粘结假设：土粒——定向水分子——阳离子——定向水分子——土粒。Baver 认为，粘粒也可直接为水键所联结。Hénin[77] 还指出，粘土充分变干，从土粒间的水分子中除去 OH 原子团后，粘土微胞为 $O^{=}$ 键所联结，于是土壤的抗机械强度和水稳性都很高。近来，Koenigs[47] 和 Emerson[32] 等还指出，粘土片为片间阳离子平行结合，同时在晶片侧面的晶稜上（正电）为另一晶面（负电）相吸引，形成了聚合片。聚合片与砂粒或粉砂粒结合是由有机或无机胶结剂来完成的。

所以从分子内聚力形成的机制来看，大概是由四种力键组成：（1）库伦吸力，（2）范德瓦力，（3）阳离子，（4）受束缚的水分子的键作用。但这些因素的相互作用是非常复杂的。

由于粘土的粘结决定于一定键的联结，Casagrande等[26]发现自然土壤比同样湿度和密度的搅动土壤具有较高的抗机械强度。Petezual Lemos[54] 从模制土块的研究指出，土块在低温下缓慢变干比快速变干的强度大，并随在 105℃ 烘烤的时间增长而增大。与此相似，还有一些研究者的资料指出，土壤经机械扰动后有随着时间老化而强度增加的现象，认为是由于某些缓慢的化学或物理化学的作用增加土壤的强度之故，并认为在紫外线或其他光线的作用下可促进这种化学作用的发展。但最近 William R. Gill[73] 研究指出，Lioyed 粘土强度增加主要是由于含水量的改变，试验放置的时间影响并不显著。Ray 等亦有类似结果。看来土壤粘结键有可能很快恢复的，或者也有在特殊条件下形成的粘结键不能很快恢复。

水膜粘结和分子内聚力粘结都受含水量的影响，因此土壤的抗机械强度将是含水量的函数。Christensen[28] 首先将重塑粘土块的抗机械强度随含水量的变化建立下列经验公式：

$$S = S_0 e^{-K\omega} \qquad (4)$$

式中 S——含水量为 ω 时的屈服值，S_0——含水量为零时的屈服值，K——常数。含水量不同的

土壤在外荷作用下的变形性质是不同的，作者以屈服点的单位变形与到屈服点的变形功之比值作为土壤的松软度指标，它随含水量的变化成抛物线型。Бахтин[6]在田间测定土壤坚实度的结果也表明，坚实度与含水量呈明显的负相关。用统计的方法建立了另一个经验公式。这两个经验公式，都表示土壤强度随含水量的增加而降低。但 Petezual 等曾发现由于土体不均匀的收缩。有含水量降低强度反而减小的，因原来的粘结键为收缩应力破坏了。

直接测定土壤的抗机械强度需要一定的仪器。因此土壤强度的间接指标有不少人进行了研究。Nichols, Baver[49] 首先用阿特伯结持常数来表示土壤粘结力的大小，并发现塑性土的最大抗剪值与塑性指数成比例。Skempton 根据土壤胶体活泼性的研究结果指出，塑性指数与粘粒含量之比值，可表征土壤强度的特性。最近 Greacen[39] 也研究指出，结构化粘土的含水量与塑限或流限之比值是该结构强度的近似指标。Gill W. R.[37] 从阿特伯限、盐基交换量与土壤物理特性的关系作了研究，结果得出，土壤的破碎模数不仅与比表面、塑性指数有关，而且与盐基交换量有更密切的关系，于是认为说明土壤的物理特性，盐基交换量是不可忽视的项目。

二、土壤的压实和粘闭

土壤的压实是指一定土壤在压力下引起孔隙减少或容重增大，土壤变得紧实之意。而土壤粘闭是当高含水量时在剪和压力作用下引起土壤颗粒定向排列，原来的结构单位不复识别，变得颇为一致的土体，其导水性强烈减低乃至消失。

土壤压实的程度决定于压力和土壤的承载能力。土壤表面受到的压力在土壤中的分布对土体压紧颇有关系。关于土壤中应力的分布，已有不少人进行了研究。Reaves[59]，Vandenberg[69]，Walter Soehne[71]，Cooper 等指出，由土表压力而引起土体中应力的分布如一葱头，他们称拱作用(arch)，在纵剖面中，以应力大小可作出一系列如葱头状的等应力线，这些线的分布特征是：直接接近外荷作用处应力大，向深处迅速减小，同时应力向外荷中心线集中，Walter Soehne 按照理论分析和实验证明，土壤某深度一点的垂直应力附合修改后的 Boussinesq 公式：

$$\delta_z = (V/2\pi z^2)\cos^{V+2}\theta = K\left(\frac{Q}{z^2}\right) \qquad (5)$$

式中 δ_z——某一深度 z 的垂直应力，V——集中系数(因不同含水量而变)，Q——压力，K——常数，θ——极角。Reaves 等观察指出，等应力线其形状大小决定于颗粒之间的联接即土壤的粘结力和内摩擦。由于土壤不是刚体，荷载有向作用中心集中的趋势。Walter Soehne 的研究表明，密实坚硬的粘结干土，荷载接触面上最大的压力为平均压力 1.25 倍；对于砂质粘土较湿而相当紧密的则为平均压力 1.5 倍，而对于能产生塑流的湿土为 2 倍。同时指出，含水量愈大，应力愈集中，等应力线由椭圆形变成圆柱状，其应力向下传递也较深。Reaves 等的工作表明，荷载与土壤接触面积的大小也影响应力传递的深度。在相同的比压下，在同一深度其接触面积大的比接触面积小的受到的压应力大。Cooper 的测定结果还指出，传递到下层的应力与总荷载大小有关，单位压力只决定表土应力。

作用于土壤的力的种类不同，达到同样紧实所需的力大小有很大差异，静压力比动压力(如拖拉机轮胎打滑时产生)压紧土壤的效果显著要低，但震动压力对粘土比砂土的压紧效果小，这是由于粘土的土粒是相互粘结的，所以一个酥软的粘土，即使在强烈震动下亦只能得到中等程度的固结。Bodman[23] 在其研究功的消耗与容积改变的关系中发现，在单独直接的压力下土壤孔隙度减少，但压应力和剪应力同时作用，土壤发生粘闭。Gill[36] 等在研究机具轮胎对土壤压紧的工作中指出，水平的推力与垂直压力压紧土壤的效果相同。

土壤是否压紧取决于土壤性质，土壤压缩过程中内部的变化状况，曾为 Day[30] 用人工装置的团聚体土柱在显微镜下观察指出，土壤含水量在塑性下限时，土壤的压缩由团聚体变形所产生，含水量低于塑性下限，则在于克服团聚体间接触点的抗剪强度。在压力下接触点变扁平，压应力分布在由点变为面的接触上，相对的减少了单位压应力，达到与土壤的抗剪强度相平衡，于是压缩变形中止。Reaves 把松散堆置的土壤受压缩时分成二个对压力反应的相：一个相由重新排列堆置土时的偶然结构的塌陷所组成；第二个相由粘结力和内摩擦力组成的抵抗重新排列的阻力所构成。所以土壤的压缩必须克服土壤的抗剪力，压缩实际也是一种强度特征。Greacen 认为它的数

值可用平衡机械荷载来表示。

土壤压缩与压力的关系早为土力学所确定，土壤的孔隙比为压力对数的线性函数。这关系近来也为 Walter Soehne 和 Greacen 的研究指出，符合疏松的土壤，为适合土壤学的情况，他们把孔隙比换成孔隙度：

$$n = -A\log P + C \qquad (6)$$

式中 n——孔隙度，P——压力，根据Walter Soehne的意见，C 为 10 磅/吋^{2}压力下的孔隙度。

Reaves 早期研究指出，压力——压缩曲线近似双曲线，后来他发现压缩量与压力有下列之关系。

$$y = ae^{bx} \qquad (7)$$

式中 y——压缩量，x——压力，也就是具有 $\frac{dy}{dx} = ky$ 的关系。这说明一定压力增量所产生的压缩是与土壤已经压缩的量成反比。

关于压缩与压力的关系，Greacen 还指出，从含水量不饱和的土壤压缩至饱和，由于水的支承，曲线将产生偏离，公式(6)中的 A 和 C 值，水分饱和与不饱和是不同的。

土壤含水量对压缩的影响是非常大的，在不饱和的情况下，水起润滑作用，对于饱和的土壤，水起支承作用，这时土壤的导水性比团聚体的强度有更重要的意义。由于土壤水的传导度与吸力有关，在饱和情况下压缩，水是向下吸的，平衡荷载等于 pF。

在瞬时荷载的情况下，土壤压缩随含水量的变化呈抛物线形，但这时最大压缩的含水量不是一固定的常数，而是随所用的压力减小而这含水量增大。同时含水量增大到某值后，土壤将出现遭受压缩特别敏感的阶段。

Bodman 在压缩和剪切对粉砂粘壤土粘闭影响的试验表明，随着含水量增加，土壤的通气孔隙逐渐破坏，在一定湿度的范围内，压缩是引起粘闭主要的力，但含水量增加，剪的作用变得更加显著，如土壤的抗剪强度很小，则土壤不是产生压缩，而是发生塑流，重物陷入土中。Bekker[2] 确定土壤的承载强度决定于内聚力和摩擦变形模数，他提出了下陷与压力的关系式：

$$P = \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi\right) z^n \qquad (8)$$

式中 P——压力，K_c——内聚力，K_ϕ——摩擦变形模数，b——受荷面宽度，z——下陷深度。

含水量影响土壤压紧，也有不少田间的观察资料。拖拉机对土壤发生最大压紧，根据 Parker 的研究是在田间持水量左右，Weaser[72] 则认为位于塑性下限附近，正是所谓适耕性的湿度。但即使较干时，也会发生某些程度的压紧。Doneen[31] 等在灌区发现，从持水当量到雕萎湿度土壤被压紧的程度(以渗透速度为指标)与含水量的增加呈直线关系。Vomocil[70] 还指出，机具行驶的速度对土壤的压紧影响很小，而含水量起主要作用。

土壤的质地、结构及有机质对压缩性也有一定影响，Nichols 的研究指出，土壤的可压缩程度与塑性指数的减少成对数增加，并随团聚体直径增大而降低，粒级的分配愈不均，土壤愈可压紧，如砾质土壤。有机质影响土壤压紧是一重要的因素，不少资料表明，土壤有机质含量增加可减低压紧的程度，并且，最大压缩点的含水量相应提高。Taylor 在土壤中加入结构改良剂，也有显著降低压缩性的作用。Walter Soehne 指出，土层的厚薄与其压缩的程度有关，薄层土壤容易为表面压力压紧，土层厚则决定于压力和接触面共同产生的总荷载的应力分布。

在拖拉机耕作的条件下，土壤的压紧是不可避免的，但土壤压紧是否已产生危害，要从对作物生长的影响来判断，我们将在耕性一节中作以说明。

三、土壤粘着力

粘着力是指液体吸附在固相表面的能力，例如水分子粘附于土壤颗粒的表面或与土壤接触的物体，粘着力可使耕作时曳引力增加，操作不方便。但也可使土壤粘成团块，改变土壤的分散状态。土壤粘着力与含水量的关系是呈抛物线的变化关系[8,13,48]。然而它的起点和峯值出现的位置及粘着力的大小与土壤性质有关。Nichols 指出：土壤产生粘着力时的土壤含水量要超过最大水膜粘结力所具有的含水量，一般比塑性下限所含的水量略高。Качинский 认为是相对湿度60—70%，Вадюнина 根据黑土的研究指出：它的始点在最大分子持水量。这些仅是湿度表示的术语不同，实际是接近同一数值。至于土壤结构破坏后，粘着力出现的含水量要比较低，变幅较小。根据 Качинский 的研究结果，土壤粘粒愈多，粘着力愈大；黑土的粘着力随土壤含水量的增加而逐渐上升，柱状碱土则因土壤含水量的增加而骤然上升，

这种差异是由于结构不同的缘故。

根据 Бахтин[5] 收集的资料，粘着力的大小与所吸着的阳离子种类有关，依 K^+、Mg^{++}、Ca^{++}、H^+、Fe^{+++}、Al^{+++} 的序列而降低。土壤酸度减小到 pH7，粘着力也减低到最小，此后 pH 增加，土壤粘着力又强烈增大。他又指出，胡敏酸钠有减低土壤粘着性的作用，而活性腐殖质会增加土壤的粘着性。

上述研究结果一般与田间观察的资料相符合。Вадюнина 在前高加索粘质碳酸盐黑钙土上发现，土壤湿度大于 70% 时(相对湿度)，犁的工作部件强烈产生粘着。此外，她在高加索东部用康拜因做试验发现，当相对湿度达到 70—83% 开始呈现粘着力，而在分散的土壤上，其相对湿度为 60—67%。达到 120% 时出现峯值，其后粘着力降低。但在西西伯利亚黑土上要含水量很高时才能出现粘着性。按 Бахтин 的意见，此与腐殖质的性质和吸收性阳离子有关。

由于实验室的测定结果可以评价土壤的粘着性，Качинский 根据在毛管饱和含水量时测定的结果将土壤划分为 5 级：>15 克/厘米^{2}最大粘着性土壤，5—15 克/厘米^2 强烈粘着性土壤，2—5 克/厘米^{2}中度粘着性土壤，0.5—2 克/厘米^{2}弱粘着性土壤，0.1—0.5 克/厘米^{2}松散土。

关于土壤粘着力发生的机制，以前一直是用推论来解释。Baver，Вадюнина 等认为，由松束缚水形成的水膜媒介产生，Дерягин 认为可以某种分子力的吸引现象来解释。但最近 Кротови 等研究指出，仅以分子力的概念来说明粘着力的性质是不够的，他们认为还有胶体电荷的作用。

虽然对粘着力的发生原因有各种说明，但一直无确切的证据，近来 Fountaine[34] 用特殊的装置对粘着力的机制作了较详细的研究，他认为土壤对外物的粘着完全由水膜所产生，固体与固体的吸力没有意义，所以外物的性质是不重要的(除非完全不会被湿润或特别干的物体)。在粘点范围内，粘着力的值等于接触面积和其中张力的乘积。他同时指出，粘着板脱离的速度对测定值有很大影响。快速脱离较缓慢脱离表现出较大的粘着力，因粘着板迅速脱离时张力局部增加，土体中的水来不及平衡此张力。所以一般测得的粘着力的大小，从理论上说不是土壤真实的粘着力。

Koenigs[47] 根据粘着力发生的理论，对犁工作时土垡发生粘闭的原因作了新的解释。犁先对土壤挤压，原状土被扰动因而张力增加，由于张力增加土粒间的粘着力也随着提高了，于是阻力增大而挤压更大，土体完全剪切而粘闭。犁壁上加水使其界面上的土吸力降低，可使粘着力减小而垡片顺利滑移。

四、土壤的适耕性和耕性

所谓土壤的适耕性，是指土壤最适宜耕作的含水量，具体的要求是：(1)耕作后能很好形成疏松多孔团聚化的土壤条件，(2)牵引阻力最小，机具能量消耗少，操作方便。Baver[22] 根据 Nichols 土壤动力学研究的资料指出，土壤的抗剪力、抗压力、抗拉力、粘着力及粘结力在塑性下限以下的含水量时是小的，分别到塑性下限或以上为最大。Nichols 直接用模拟试验证明，干土曳引阻力大，随着含水量增大而降低，至塑性下限又复增大。土壤湿度在塑性范围内也是容易压板的。于是英美的土壤工作者都认为塑性下限稍低的土壤含水量为适耕性，即所谓松软结持阶段。Качинский[13-14]等亦曾研究指出，干土曳引阻力大，含水量增大，土粒间粘结力变小，至粘着力出现后，土壤曳引阻力又复增大。Пигулевскии 认为含水量为1.5倍的最大吸湿水是适耕性的下限，其上限为毛管持水量的 0.9 倍。Качиниский 反对这一范围，认为 1.5 倍最大吸湿水的含水量正是雕萎湿度，对植物生长不利，同时也不能保证形成良好团粒结构。而其上限已使机具容易打滑，故含水量又太高了。他认为土壤开始呈现粘着力时，耕作既能形成良好结构，曳引阻力也最小，是最好的适耕性，这个湿度相当于相对湿度 50—60%，在生产条件下可扩大到相对湿度 30—70%，在某些情况可高至 80%（如碱土）。但最近 Бахтин[4,7] 等研究指出，土壤适耕的含水量可随耕作速度提高而提高。于是认为适耕性不是固定不变的常数，而与耕作的工艺性有关。

正确耕作，是为植物创造良好的土壤物理环境，即要有适宜的水热气条件。目前已用耕性的术语来表征此总的特性。耕性与土壤结构的状况有关，但土壤含水量不同，可表现出不同的性状，因此还包含有一定结持阶段的含义。

用某种指标来表示土壤耕性，曾有不少研究者从事探索，迄今为止，尚无一致意见。从已有的文献来看，可概括为下列四个方面：

1. 土块大小的组成：耕层土块大小曾为某些

研究者作为重要的耕性指标。Keen[45] 首先从事田间干筛，后来改为在苯中筛分，他们很重视小于5/8 吋直径的土块，认为耕作后小于 5/8 吋的土块耕性都好。而 Krause 认为主要由 2—3 毫米的团聚体组成的种床最适宜植物生长。Yoder[74] 研究指出，1/8—1/4 吋的团聚体占一半，而其他各种大小的团聚体占一半的耕层棉花发芽最快。

2.土壤孔隙度：Pendeton[56] 的研究资料表明，总孔隙与甜菜等的生长有很高的相关性，但适宜的量因土因作物而异。Russell 在土壤结构的文献综述中指出，总孔隙度中毛管与非毛管孔隙各占一半为最好，非毛管孔隙占 10% 以下是坏耕性。还有其他一些资料指出，非毛管孔隙的量是作物生长好坏的可靠指标。Baver 认为，测定土壤孔隙度，必须将其孔径大小分级，所谓非毛管孔隙，是指零张力与对数 1.5—2.0 张力（水柱高）孔隙量的差。

3.土壤压缩性：Scott-Blair[65] 提出，土壤的压縮性可表达土壤耕性，他从理论分析指出，耕性好的土壤，压縮变形与荷载平方根成直线关系，任何实际的压縮变形曲线与此理论曲线之偏离情况可以反映土壤耕性，土壤愈可压縮，耕性愈好。

4.土壤坚实度：测定土壤坚实度可以判断土壤结持力、紧实层存在的位置及表面结壳，土壤坚实度对植物根系的穿扎有影响。表示的方法除了直接用单位面积的阻力外，也可用坚实度随深度变化的理论曲线和实测曲线两者所做功的比值来表征。后者适合于同一种土壤由于耕作和含水量不同而引起变化的比较。

土壤的紧实度是结构和孔隙度的综合反映，对植物生长的关系很大，目前有很多人从事研究。

许多较早期的工作指出，容重在 1.95 以上任何植物的根系已不可穿入，而容重为 1.8 对强主根尚可穿入，支根发展很少。近来 Zimmerman[75] 用苏丹草和大豆做试验指出（四种底土）：粉砂壤土容重 1.8 根不能扎入，砂土为 1.9，粘壤土为 2.0。根的生长量随容重增大而降低。但苏丹草的根比大豆的根易于扎入紧土。Scott[66] 的资料指出，粘壤土容重在 1.95 甜菜和番茄的根不能扎入，但不能阻止苜蓿根的生长。由此可见，极限容重与土壤质地及根系本身（如直径）有关。Zimmerman 还从田间观察发现，根不能扎入自然土壤的容重比实验室装置的土壤低。土壤中的肥力状况和酸度也有影响。

根系虽能扎入较紧的土层中，但可抑制植株的生长。Phillips[57] 在恒温条件下研究指出，土壤容重从 0.94—1.3 玉米根的生长速度依次降低。Третьяков[18] 在生草灰化土上做的试验表明，最适合玉米生长的土壤容重为 1.1—1.2，大于这个范围生长变坏。其他一些研究者用棉花、大麦、马铃薯及番茄所做的试验也有类似的结果，但不同的作物对适宜生长的容重要求并不一致。Канарае[12]研究指出，容重在 1.02—1.42 范围内，维持土壤湿度于田间持水量的 60—80—100%，燕麦的生长受水的影响大，容重不同影响很小。Rosenberg[63] 的大豆试验，容重在 1.3—1.65 差异也不明显。Adams[19] 研究表土镇压的结果指出，容重从 1.07 增加到 1.19，马铃薯产量减低 54%，甜菜和小麦减低 13%，玉米减低 7.5%。砂土压紧对作物的生长有相反的影响，根据 Rosenberg[62,63] 的试验（缺乏灌溉的条件下），砂土从容重自 1.3 增到 1.6，大麦可增产 50%，这是由于水分条件改变的缘故。

土壤压紧后，必然引起其抗机械强度的增大，并同时减少通气性和改变导水性。Gill[36] 等在研究机械阻力和 O_2 影响谷物幼根的生长速度中指出，根周压力增加，生长速度迅速降低，为了维持根能克服机械阻力，使其有不变的生长速度，则需更多的氧气。Barley 进行了关于直接控制土壤的机械阻力影响植物生长的试验表明，包围的压力 0.6 公斤/厘米^{2}阻止了玉米根的增长。同样，Taylor[68] 的试验指出，棉花根的穿透与土壤坚实度有很高的相关性（相关系数 -0.96），根系的穿扎与强度之间的关系比容重的关系大。根系在低张力湿度的土壤中穿过比高张力的土壤容易，Scott[66] 在原来根系不能扎入的土壤中放入氧化剂作为氧源，根系就能扎入。从这些试验使我们可以归纳得出：紧实度抑制植物生长大概是机械强度、O_2 扩散及土壤水分特性改变的综合影响结果。

五、结 语

四十年来，土壤物理机械性质的研究已有较大进展，到目前研究的趋向已转向于对土壤某些机械现象的实质性探讨及机具对土壤的影响方面；什么是作物生长的良好土壤环境已为研究者所注意，这主要表现在耕层土块组成、耕作深度及紧实度对作物生长的影响研究。土壤的抗机械强

度过去只从对机具的关系来阐明，目前已注意研究对作物根系的影响，把土壤膨胀收縮的性质结合在内已发展了土壤力学环境的概念。静止的简单测定土壤力学性质的工作不多了，但动态的与机具联系起来的研究正在发展；流变学为这方面的需要渐被重视。

参 考 文 献

[1] M. H. 戈里特什腾：土壤的力学性质。153—154，人民交通出版社，1954年。

[2] Bekker, M. G.（王金明译）：拖拉机及其它野行车辆的行驶易动性(一)，农机译丛，No. 1, 31—39页，1963年。

[3] 山中金次郎：土壤の凝集力に关する研究。农业技术研究所报告。B 第6号，pp. 66—71，1955。

[4] Бахтин, П. У.: Физическая спелость почвы и скорость вспашки. Почвоведение, № 5, 461—473, 1952.

[5] Бахтин, П. У.: Динамика физико-механических свойств почв в связи с вопросами их обработки. Труды почвенного института им. В. В. Докучаева, Том XLV, 43—210, 1954.

[6] Бахтин, П. У., Львов, А. С.: Динамика твердости некоторых почв Среднего Заволжья Южного Зауралья. Почвоведение, № 5, 53—62, 1960.

[7] Бахтин, П. У., Николаева, И. Н. Волоцкая, В. Н.: Сопротивление сдвигу, Коэффициент трения и сцепление темно-каштановых почв и южного чернозёма. Почвоведение, № 11, 68—77, 1963.

[8] Вадюнина, А. Ф.: Динамика липкости различных почв в зависимости от влажности и культурного состояния почвы. Почвоведение, № 8, 91—97, 1939.

[9] Вадюнина, А. Ф., Львов, А. С.: Зависимость тяговых сопротивлений комбайнов от свойств почвы и деформация почвы комбайнами. труды почвенного института им. В. В. Докучаева, Том XLV, 5—42, 1954.

[10] Вершинин, П. В., Поясов, Н. П. Косарчук, А. Н.: Обработка почвы на повышенных скоростях. Вестник сельскохозяйственной Науки, № 2, 92—98, 1959.

[11] Жук, Я. М., Рубин, В. Ф.: О сопротивлении почвы различным деформациям. Сб. висхом: «почвообрабатывающие машины», вып. 3, 1940（参见南京工学院农业机械教研组：土壤的物理机械性质，1960）。

[12] Канараке, А., Талер, Р.: К вопросу обеспечения растений влагой и воздухом при различном уплотнении почв. Почвоведение, № 5, 106—113, 1962.

[13] Качинский, Н. А.: Свойства почвы как фактор, определяющий условия работы с.-х. машин. Почвоведение, № 8, 1119—1138, 1937.

[14] Качинский, Н. А.: Определение удельного сопротивления почвы при пахоте по сопротивлению почвы расклиниванию. Почвоведение, № 9, 15—48, 1939.

[15] Некрасов, П. А.: Агрофизические методы оценки почвообрабатывающих машин и орудии. Физика почв в СССР. Том V, 234—246, 1937.

[16] Пигулевский, М. Х.: Сопротивление сдвигу почв и грунтов. Почвоведение, № 1, 24—36, 1936.

[17] Сидери, Д. И.: Сравнение методов определения объемного веса почвы в применении к испытанию качества работы сельскохозяйственных машин и орудий, физика почв в СССР, Том V, 265—273, 1937.

[18] Третьяков, Н. Н.: Плотность почвы и корневая система растений, земледелие, № 4, 56—62, 1963.

[19] Adams, E. P. et al.: Influences of Soil compaction on crop growth and development. Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci., 1: 607—615, 1960.

[20] Baver, L. D.: The relation of exchangeable cations to the physical properties of soils. J. Amer. Soc. Agron., 20: 921—941, 1928.

[21] Baver, L. D.: The effect of organic matter upon several physical properties of soils. J. Amer. Soc. Agron., 22: 703—708, 1930.

[22] Baver, L. D.: Soil Physics. Third Edition. pp. 95—115, 387—402, New York, 1956.

[23] Bodman, G. B., Rubin J.: Soil puddling. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 13: 27—36, 1948.

[24] Bodman, G. B.: Methods of measuring soil consistency. Soil Sci., 68:37—56, 1949.

[25] Bruce, R. R.: An instrument for the determination of soil compactibility. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 19: 253—257, 1955.

[26] Casagrande Arthur: The structure of clay and its importance in foundation engineering. J. Boston Soc. Civ. Eng., 19: 168—221, 1932.（参见 William, R. Gill and Carl A. Reaves: Relationships of Atterberg limits and cation-exchange capacity to some physical properties of Soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 21: 491—494, 1957）.

[27] Childe, E. C.: The physical aspects of some concepts in soil mechanics. Proc. Nat. Acad. Sci. India, 24A: 86—92, 1955.

[28] Christensen, O.: An index of friability of soils. Soil Sci., 29:119—135, 1930.

[29] Culpin, C.: Studies on the relation between cultivation implements, Soil structure and the

crop. J. Agric. Sci., 26: 22—35, 45—59, 1936.

[30] Day, P. R., Holmgren, G. G.: Microscopic changes in soil structure during compresstion. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 16: 73—77, 1952.

[31] Doneen, L. D., Henderson, D. W.: Compaction of irrigated soils by tractors. Agric. Eng., 34: 94—95, 102, 1953.

[32] Emerson, W. W.: The structure of soil crumbs. J. Soil Sci. 10(2): 235—244, 1959.

[33] Fisher, R. A.: On the capillary forces in an ideal Soil; Correction of formulas given by W. B. Haines. J. Agric. Sci., 16:492—505, 1926.

[34] Fountaine, E. R.: Investigations into the mechanism of soil adhesion. J. Soil Sci., 5(2): 251—262, 1954.

[35] Fountaine, E. R., Brown, N. J.: Shearing resistance of top soil under small normal load. J. Agric. Eng. Res., 4: 53—59, 1959.

[36] Gill, W. R., Miller, R. D.: A method for study of the influence of mechanical impedance and areation on the growth of seedling roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 20(2): 154—157, 1956.

[37] Gill, W. R., Reaves, C. A.: Relationships of Atterberg limits and cationexchange capacity to some physical properties of soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 21: 491—494, 1957.

[38] Greacen, E. L.: The strength of cultivated soil. J. Agric. Eng. Res., 4: 60—61, 1959.

[39] Greacen, E. L.: Aggregate strength and soil consistence. Trans. 7th Int. Congr. of Soil Sci., 1: 256—264, 1960.

[40] Greacen, E. L.: Water content and soil strength. J. Soil Sci., 11: 313—332, 1960.

[41] Haines, W. B.: The volume-change associated with variations of water content in soil. J. Agric. Sci. 13: 296—310, 1923.

[42] Haines, W. B.: Studies in the physical properties of soils. I. Mechanical properties concerned in cultivation. J. Agric. Sci., 15: 178—200, 1925.

[43] Haines, W. B.: Studies in the physical properties of soils. II. A note on the cohesion developed by capillary forces in an ideal soil. J. Agric. Sci., 15: 529—535, 1925.

[44] Keen, B. A., Haines, W. B.: Studies in soil cultivation. I. II. III. J. Agric. Sci., 15: 375—406, 1925.

[45] Keen, B. A., Staff of the soil physics Dept.: Studies in Soil cultivation. V. Rotary Cultivation. J. Agric. Sci., 20: 364—389, 1930.

[46] Keen, B. A., Cashen, G. H.: Studies in soil cultivation. VI. J. Agric. Sci., 22: 126—134, 1932.

[47] Koenigs, F. F. R.: The puddling of clay soils. Netherlands J. Agric. Sci., 11: 145—155, 1963.

[48] Nichols, M. L.: Methods of research in soil dynamics as applied to implement design. Alabama Agric. Exp. Sta. Bull. 229, 1929. (参见参考文献 22)

[49] Nichols, M. L.; Baver, L. D.: An interpretation of the physical properties of soil affecting tillage and implement design by means of the Atterberg consistency constants. Proc. 2nd Intern. Congr. Soil Sci., 6: 175—188, 1930.

[50] Nichols, M. L., Kummer, T. H.: Method of analysis of plow moldboard design based upon dynamic properties of soil. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 26:51—57, 1932. (参见 Trullinger R. W.: Soil Science and engineering. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1: 7—19, 1936)

[51] Nichols, M. L., Reaves, C. A.: Soil structure and consistency in tillage implement design. Agric. Eng., 36: 517—520, 522, 1955.

[52] Nichols, M. L., Reaves, C. A.: Soil reaction: To subsoiling equipment. Agric. Eng., 39: 340—343, 1958.

[53] Nichols, M. L., Reed, I. F., Reaves, C. A.: Soil reaction: To plow share design. Agric. Eng., 39: 336—339, 1958.

[54] Petezval Lemos, Lutz, J. F.: Soil crusting and some factors affecting it. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 21:485—491, 1957.

[55] Payne, P. C. J.: The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. J. Agric. Eng. Research, 1: 23—50, 1956.

[56] Pendleton, R. A.: Soil compaction and tillage operation effects on sugar beet technologists, 1950. (参见 Cooper, A. W., M. L. Nichols: Some observation on soil compaction tests. Agric. Eng., 40: 264—267, 1959.)

[57] Phillips, R. E., Kirkham, D.: Mechanical impedance and corn seedling root growth. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26: 319—322, 1962.

[58] Reaves, C. A., Nichols, M. L.: Surface soil reaction to pressure. Agric. Eng., 36: 813—816, 820, 1955.

[59] Reaves, C. A., Cooper, A. W.: Stress distribution in soils under tractor loads. Agric. Eng., 41: 20—21, 31, 1960.

[60] Richards, S. J.: A soil penetrometer. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 6: 104—107, 1941.

[61] Romano, F.: Shear strength of the soil surface, according to the norms adopted by the N.I.A.E. (Silsoe England). Soils and Fertilizers 23:: 105, 641, 1960.

[62] Rosenberg, N. J.: The effect of compaction on the physical condition of several soils and on the growth of plant. Soils and fertilizers, 25: 207, 1498, 1962.

[63] Rosenberg, N. J., Willits, N. A.: Yield and physiological response of barley and beans grown in artificially compacted soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26: 78—82, 1962.

[64] Russell, E. W.: The interaction of clay with water and organic liquids as measured by specific volume changes and its relation to the phenomena of crumb formation in soils. Phil. Trans. Roy. Soc. London. 233A: 361—389, 1934. (参见参考文献 [22] 137 页)

[65] Scott-Blair, G. W.: Compressibility curves as a quantitative measure of soil tilth, J. Agric. Sci., 27:541—556, 1937.

[66] Scott, T. W.: The influence of Several physical soil factors on the development and activity of plant roots. Soils and Fertilizers, 24:439, 3084, 1961.

[67] Shaw, B. T., Haise, H. R., Farnsworth, R. B.: Four years' experience with a soil penetrometer. Soil Sci., Soc. Amer. Proc., 7: 48—55, 1942.

[68] Taylor, H. M., Gardner, H. R.: Penetration of cotton seedling taproot as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. Soil Sci., 96: 153—156, 1963.

[69] Vandenberg, G. E. et al.: Soil pressure distribution under tractor and implement traffic. Agric. Eng., 38: 854—855, 859, 1957.

[70] Vomocil, J. A. et al.: The influence of speed and drawbar load on the compacting effect of wheeled tractors. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 22: 178—180, 1958.

[71] Walter Soehne: Fundamentals of pressure distribution and Soil compaction under tractor tires. Agric. Eng., 39: 276—281, 290, 1958.

[72] Weaver, H. A., Jamison, V. C.: Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. Soil Sci., 71: 15—23, 1951.

[73] Gill, W. R.: The effects of drying on the mechanical strength of Lloyd Clay. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 23: 255—257, 1959.

[74] Yoder, R. E.: The significance of soil structure in relation to the tilth problem. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 2: 21—33, 1937.

[75] Zimmerman, R. P., Kardos, L. T.: Effect of bulk density on root growth. Soil Sci., 91: 280—288, 1961.

[76] Hvorslev, M. J.: Über die festigkeitseigenschaften gestarter bindiger Böden. Ingen. Vidensk. Skr. A. 45, 159. (参见参考文献 [40])

[77] Hénin, S.: Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Monograpb National Center of Agronomic Researcb, pp. 52—54, Paris. (参见参考文献 [22] 139 页)