

土壤的化学性质与作物生长的关系

土壤作为养分和水分供给源，给作物提供了其生长所需的养分和水分。土壤的养分储备能力和实际存在的养分量、向作物提供养分的能力以及影响作物生长的各种化学方面的因素统称为土壤的化学性质。土壤的化学性质主要由土壤 pH（土壤酸碱度）、EC（电导率）、CEC（阳离子交换容量）、交换性阳离子和阳离子饱和度、有效磷、全氮量、有机碳量等因素所构成。图 1 是土壤化学性质的这些因素与作物生长之间的关系模式图。

在土壤的化学性质中，pH（土壤酸碱度）直接影响着作物的生长，而土壤 EC（电导率）、CEC（阳离子交换容量）、交换性阳离子和阳离子饱和度、有效磷、全氮量、有机碳量等则影响了土壤中养分数量和存在状态以及能够被作物吸收利用的程度，间接地影响作物的生长。本篇简单地解说土壤的化学性质与作物生长的关系。



图 1. 土壤的化学性质与作物生长的关系

1. pH（土壤酸碱度）

土壤 pH 值代表了土壤溶液中以及吸附在土壤胶体表面上的氢离子（H⁺）的浓度，pH 7 为中性，小于 7 的为酸性土壤，大于 7 的为碱性土壤。表 1 是日本根据 pH 值的大小对土壤酸碱度进行的分类表。

表 1. 日本根据 pH 值对土壤的酸碱度进行的分类

土壤 pH 值	土壤酸碱度的分类
< 4.4	极强酸性土壤
4.4~4.9	强酸性土壤

5.0~5.4	明酸性土壤
5.5~5.9	弱酸性土壤
6.0~6.5	微酸性土壤
6.6~7.2	中性土壤
7.3~7.5	微碱性土壤
7.6~7.9	弱碱性土壤
>8.0	强碱性土壤

原始土壤的 pH 值由形成土壤的母岩种类和土壤形成后的有机质含量及种类而决定。母岩的种类不同，其经过风化变质而形成的原始土壤的 pH 值会有较大的差异。一般来说，由花岗岩、玄武岩和火山灰为母岩所形成的土壤多呈酸性，而由石灰石为母岩所形成的土壤往往呈碱性。有机质对土壤中的阳离子有较高的吸附力和保持能力，因此含有丰富有机物的土壤多呈弱酸性~中性。

改变土壤 pH 值的最大原因是降雨。雨水中含有的微量的氢离子 (H^+) 能够与吸附在土壤胶体上的交换性阳离子 (钙、镁、钠、钾等阳离子) 进行交换，将这些阳离子置换出来，随着雨水的渗透而淋洗到地下水里。雨水的这种作用称之为阳离子溶脱效果。这就是为什么在降雨量多的地区土壤多呈强酸性的原因。这是因为土壤中的阳离子不断地被雨水中的氢离子置换出来，导致土壤中的氢离子不断增加，使得土壤 pH 逐渐下降而呈酸性。相反，在降雨量少的地区，因为土壤中的阳离子不易溶脱，所以土壤 pH 会偏高。特别是在降雨量少，蒸发量大的地区，随着地下水的不断上升和蒸发，溶解在地下水中的钠和钙离子可将土壤中的氢离子置换出来，并且在水分蒸发后析出残留在土壤表层，形成盐碱性土壤。

改变土壤 pH 值的另一个重要因素是化肥的施用。例如，长期施用或过度施用本身就是酸性的肥料，如过磷酸钙、重过磷酸钙等，或者肥料中的养分被吸收后残留下来的成分会使土壤偏向酸性的肥料，例如硫酸铵、硫酸钾和氯化铵等就容易引起土壤 pH 值的下降。相反，如果施用石灰氮或钙镁磷肥等碱性肥料，土壤 pH 则会上升。另外，当施用硫酸铵、氯化铵等含有铵态氮的肥料时，硝酸菌会通过土壤的硝化作用将铵态氮转化为硝态氮，在铵态氮的转化过程中会释放出氢离子，使土壤暂时性的呈现出酸性。

为了避免土壤酸化或碱化对作物生长带来不良问题，施用能够调节土壤 pH 的酸性或碱性资材是一种非常简单有效的方法。

如果土壤 pH 值呈强酸性，施用强碱性的熟石灰可以很快地与土壤中的氢离子发生反应，迅速地提高 pH 值。另外，同属于石灰质资材的苦土石灰 (白云石粉) 和石灰石粉虽然不能马上矫正土壤 pH，但它们可以逐渐地与土壤中的氢离子发生反应，具有长期性提高 pH 值的效果。若是为了改良微碱性和弱碱性土壤，可施用过磷酸钙、硫酸铵、硫酸钾等酸性肥料来中和碱性。另外，在改良强碱性土壤方面，施用硫磺粉或石膏粉等强酸性资材有一定的效果。

2. EC (电导率)

EC（土壤电导率）是表示土壤溶液电导率（传导电荷的能力）的值。纯水几乎不能传导电荷，属于绝缘体，但溶解了无机盐类的溶液却很容易导电。EC 值与土壤溶液中无机盐的浓度呈正相关关系，是表示土壤肥力的重要数据。

在一般情况下，除了钠含量较高的盐碱性土壤外，土壤 EC 值与土壤中水溶性养分的含量，特别是硝态氮的含量有很强的正相关关系。因此土壤 EC 值常被用作估算土壤中养分含量的手段。如果土壤 EC 值低于最佳 EC 值下限，可以推测出土壤中养分不足，不能满足作物生长的需求，从而导致生长缓慢，产量降低。当土壤 EC 值超出最佳 EC 值上限时，证明土壤溶液中的盐类浓度偏高，会给作物造成渗透压胁迫和离子胁迫，抑制根的营养和水分吸收机能，同样会给作物生长带来不良影响。此外，在 EC 值较高的土壤中经常可以观察到盐分积累现象。

因为 EC 完全受到水溶性盐类浓度的影响，施用尿素，氯化铵，氯化钾之类的速溶性化肥后，土壤 EC 值会有迅速增高的趋势。但是不溶于水或难溶于水的肥料，例如枸溶性肥料、缓释性肥料、有机肥料等的施用对土壤 EC 值的影响不大。表 2 给出了各种蔬菜生长的最佳土壤 EC 值和出现生育障碍的 EC 值。表 3 则是根据土壤 EC 值来确定追肥量的一个参考标准。

表 2. 土壤 EC 值与各种蔬菜生长的关系

蔬菜种类	最佳 EC 值 (mS/cm)			出现生育障碍的 EC 值 (mS/cm)		
	砂质土	壤质土	粘质土	砂质土	壤质土	粘质土
卷心菜、萝卜	0.4~0.8	0.5~1.0	1.0~2.0	1.1~1.6	1.6~2.5	2.7~4.1
菠菜、芜菁、大白菜	0.3~0.7	0.5~1.0	0.8~1.5	1.0~1.5	1.5~2.2	2.4~3.6
芹菜	0.2~0.5	0.3~0.8	0.5~1.3	0.7~1.0	1.0~1.6	1.8~2.7
茄子、大葱、生菜、胡萝卜、菜椒	0.2~0.5	0.3~0.7	0.5~1.0	0.7~1.0	1.0~1.5	1.7~2.5
西红柿	0.2~0.4	0.3~0.6	0.4~0.8	0.6~0.9	0.9~1.3	0.8~1.4
辣椒、黄瓜、甜瓜、芦笋	0.2~0.3	0.2~0.5	0.3~0.8	0.4~0.6	0.6~0.9	1.0~1.5
蚕豆、洋葱	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	0.3~0.5	0.5~0.7	0.8~1.2
菜豆、草莓	0.1~0.2	0.1~0.3	0.2~0.5	0.3~0.4	0.4~0.6	0.7~1.0

表 3. 根据土壤 EC 值来确定追肥量的判断基准

土壤 EC	是否需要追肥及追肥施用量
低于最佳 EC 值的下限	需要进行追肥，施用正常的追肥量
处于最佳 EC 范围内	需要进行追肥，但追肥量可减少 20~50%
超出了最佳 EC 值的上限	不需要追肥

3. CEC（阳离子交换容量）

土壤 CEC（阳离子交换容量）是表示一定重量的土壤所能够吸附保持的阳离子数量。

土壤能够吸附保持阳离子的机制在于土壤胶体上。土壤胶体主要是粘土矿物和腐殖质构成的复合体，结合了从土壤溶液中析出的铁、铝、锰、硅等元素的不溶性氧化物和氢氧化物等形成的直径为数纳米~数微米的微细颗粒状物质。土壤胶体在整体上是带有正电荷和负电荷的一种两性胶体，负电荷通常分布在胶体颗粒的表面，可以通过克隆力来吸附和保持带正电荷的钙、镁、钾、钠等阳离子。

施入耕地里的无机态肥料成分一旦被溶解后，会离解分成阳离子和阴离子。肥料中的铵态氮，钾，镁等阳离子因为土壤胶体对阳离子的吸附功能，可以被吸附和保持在土壤中，随时供作物吸收利用。一般来说，土壤的 CEC 值越高，能够吸附和保持肥料成分的能力越大，保肥力越强。另外，高 CEC 值的土壤因为阳离子交换容量大，土壤 pH 和 EC 都比较稳定，不易发生大的变动。表 4 是一些代表性土壤的 CEC 值。

表 4. 代表性土壤的 CEC 值

土壤种类	CEC (meq/100g)
砂壤土	3~10
浅色火山灰土	15~25
腐殖质暗色火山灰土	20~30
富腐殖质暗色火山灰土	30~40

土壤的 CEC 主要受到构成土壤胶体的粘土矿物含量和种类以及腐殖质含量的影响。通常，高 CEC 的土壤多是粘土矿物多的粘土质土壤和腐殖质多的火山灰土壤，而缺乏粘土矿物的砂质土壤和腐殖质含量低的土壤则其 CEC 值偏低。

增加土壤 CEC 值的最佳方法是施用堆肥和腐植酸。实验结果表明，土壤中腐殖质每增加 1%，CEC 大约升高 2meq/100g。通过持续施用含有大量腐殖质的有机肥料和腐植酸类肥料，例如堆肥、腐植酸、腐植酸镁、腐植酸钾、腐植酸铵等，可以增加土壤中腐殖质的含量，将其转变为具有高保肥力的土壤。

4. 交换性阳离子和阳离子饱和度

被土壤胶体吸附保持并容易被其他阳离子所置换的阳离子中，除了氢离子以外的所有阳离子被统称为交换性阳离子 (Exchangeable Cations)。

交换性阳离子与 CEC 的比率称为阳离子饱和度。当 CEC 在一定值时，阳离子饱和度越低，则表明被土壤胶体吸附保持的氢离子 (H^+) 比例越高，土壤酸性度越大，pH 值越低。而阳离子饱和度越高，则表明氢离子 (H^+) 比例越低，土壤越接近中性。当阳离子饱和度继续增高，氢离子减少到一定值以下时，土壤就会呈现出碱性。

由于交换性阳离子最容易被作物吸收利用，因此阳离子饱和度高的土壤一般都是肥沃的土壤。但如果交换性阳离子的数量超过 CEC 能够吸附保持的限度，阳离子饱和度达到 100% 的话，大概率是交换性阳离子中的钙离子 (Ca^{2+}) 和镁离子 (Mg^{2+}) 数量过剩，会造成某些肥

料成分和微量元素难溶化，降低了作物吸收利用的可能性，容易诱发微量元素缺乏症，阻碍作物生长。有很多关于最适作物生长的阳离子饱和度的研究和实验，其结论是最适作物生长的阳离子饱和度因作物种类和种植季节等的不同而有一定的差异，而一般认为阳离子饱和度在70~80%为最佳。

此外，交换性阳离子种类之间的平衡也很重要。一般来说，如果土壤 pH 值保持在适当的水平上，就不容易出现钙、镁和钾的缺乏症状。然而，当设施栽培等过量施用水溶性肥料造成盐分积累、或在菜地连续大量施用堆肥，在大田施用大量熟石灰时，有可能会破坏阳离子之间的平衡状态而造成某种阳离子过多产生拮抗现象，阻碍作物对其他阳离子的吸收利用。

表 5 是适合西红柿、菠菜和生菜生长的土壤最佳阳离子饱和度和阳离子组成比例。

表 5. 土壤最佳阳离子饱和度和各种阳离子的最佳组成比例

作物名	最佳阳离子饱和度 (%)	各种阳离子的最佳组成 (%)		
		钙离子	镁离子	钾离子
菠菜	85	75	20	5
生菜	80	65	25	10
西红柿	75	70	25	5

土壤中的各种养分若保持在一个良好的平衡状态下是最有利于作物的生长。因此，在施用肥料时需要注意保证氮磷钾各种肥料养分的平衡和适当地施用石灰质肥料和镁质肥料，这样可以将各种交换性阳离子保持在一个最佳的平衡状态。

5. 有效磷（土壤的磷固定系数）

磷肥被施用到土壤后，部分磷酸阴离子会与钙，铁，铝等阳离子结合形成难溶性磷酸盐化合物而失去被作物吸收的可能性。这种现象被称为土壤的磷固定。土壤的磷固定机理是磷肥施用后，溶于土壤溶液后离解出的磷酸离子会与土壤溶液中的铝离子和铁离子结合形成难溶性的磷酸铝和磷酸铁化合物并沉淀下来，降低了土壤中有效磷的浓度。另外，土壤溶液中的钙离子也可以与磷酸离子结合形成难溶的磷酸钙化合物。土壤的磷固定能力用磷固定系数来表示，磷固定系数越高，土壤的磷固定能力越强，可以被作物吸收利用的有效磷就越少。

土壤的磷固定系数因土壤类型的不同而有很大的差异。冲积土和砂壤土中的粘土矿物较少，因此其磷固定系数较低，而火山性土壤，特别是火山灰土，含有大量粘土矿物和大量能够在酸性环境中溶解出来的活性态铝，导致磷固定吸收系数很高。由于磷固定系数基本上是由土壤的基本特性所决定，因此难以通过改良土壤来达到降低磷固定系数的目的。

通过改良土壤来降低磷固定系数、增加有效磷的方法仅限于施用堆肥和腐植酸资材。这是因为堆肥中的有机物可以包容磷酸离子，减少磷酸离子与土壤胶体的接触。另外，土壤微生物在分解堆肥时会大量增殖，在增殖时会吸收土壤中的磷，将其变成有机磷作为构成自身的组成成分。微生物死亡后，随着微生物遗体的分解和无机化，磷又被释放出来供作物吸收利用。

腐植酸可以与土壤溶液中的铁、铝和钙离子形成相对稳定的化合物，防止这些阳离子与磷酸阴离子结合形成难溶性磷酸盐化合物。此外，腐植酸在遇到难溶性磷酸盐化合物时，亦会与其中的铁、铝和钙形成络合物，使磷酸离子再度恢复到有效磷的状态供作物吸收利用。

还可以通过改进施肥方法来避免土壤的磷固定。对于磷固定系数较高的火山性土壤，最好是依照土壤的磷固定系数以及土壤中有效磷的含量来确定磷肥的施用量，以免出现磷养分不足或过剩的现象。在施肥方式上，可以将过磷酸钙或重过磷酸钙与腐植酸或堆肥混合后施用。在磷肥品种上，钙镁磷肥等枸溶性磷肥因为不溶于水，只溶于酸性溶液，不易被土壤固定，适合施用于土壤磷固定系数高的土壤。另外，在冬春季或作物生长初期，作物的养分吸收能力较弱时，最好将钙镁磷肥和过磷酸钙各半混合后施用，或者施用同时含有水溶性磷和枸溶性磷的重烧磷，可以提高磷肥的利用率。

一些作物如荞麦、花生和鹰嘴豆等以及豆科绿肥的根会分泌出强烈的根酸，可以溶解和吸收利用土壤中的一些难溶性磷酸盐化合物。此外，在湛水的水田环境中，由于铁离子被还原沉淀，可以降低土壤的磷固定系数，增加磷的溶解度，这是被认为水稻可以吸收较多磷的原因之一。因此，磷固定系数较高的火山灰土最好是作为水田来种植水稻，可以减轻磷固定，提高磷肥的利用率。

构成土壤化学性质的还有总氮量和有机态碳等因素，但这些因素的重要性远远不及上面提到的 pH、EC、CEC、交换性阳离子和有效磷，因此在此省略不提。