

File No. 22

植物与硅

硅 (Si) 是位于元素周期表上第 4 族第 3 周期上的元素，具有很强的反应性，在自然界内都是与其他元素结合形成化合物，不会以单体的形态而存在。在自然界中的硅绝大多数是与氧结合成的硅酸盐，再加上硅和铝氧化物形成的铝硅酸盐构成了地球上的大多数岩石。根据著名的美国地球化学家弗兰克·克拉克 (Frank W. Clarke, 1847~1931) 的数据，硅是地壳中第 2 位的元素，其重量仅次于氧，约占地壳重量的 25%。

因为硅不以单体状态存在于自然界，植物所能够吸收的硅和吸收后积储在植物体内的硅都是二氧化硅 (silicon dioxide)。二氧化硅是硅的氧化物，分子式 SiO_2 ，随温度和压力不同，二氧化硅以多种结晶相 (结晶多形) 的形态存在于地壳中。最常见的有石英和水晶之类的纯粹的二氧化硅结晶和形成粘土矿物的层状硅酸盐矿物结晶，以及存在于硅藻土和生物中的非结晶型水和二氧化硅等。

植物生长所需元素共有 16 种，缺少其中 1 种都会导致植物不能生长。硅不属于这 16 种必需元素，但具有促进植物生育，提高环境抵抗力的作用，与钠一起被称为植物生长的有用元素。

硅被称为植物生长的有用元素的主要理由是，硅可以有效地提高植物对各种不良环境的抵抗力。许多实验结果证明施用了硅肥的作物其抗病性，耐盐性，抗旱性，抗虫性，抗倒伏性等各种抵抗力都有所提高。

通过使用水稻为材料所做的许多实验研究结果，可将硅能够提高植物对不良环境的抵抗力的机理归纳如下。植物只能吸收非结晶性的二氧化硅。二氧化硅被植物根吸收后，会积储在特定细胞的细胞壁上形成玻璃质的细胞体。例如，被水稻吸收了的二氧化硅和水分一起通过导管输送到地上部的茎叶后，会在叶片表皮组织最外层细胞外侧析出形成一层二氧化硅层，处于叶片表面的角质层下面，形成硅化角质层。同时还会与纤维素结合在叶片表皮细胞的细胞壁和细胞膜之间形成一层二氧化硅纤维素膜。这种叶片表皮组织中具有硅化角质层和二氧化硅纤维素膜的细胞通称为硅化细胞 (图 1)。

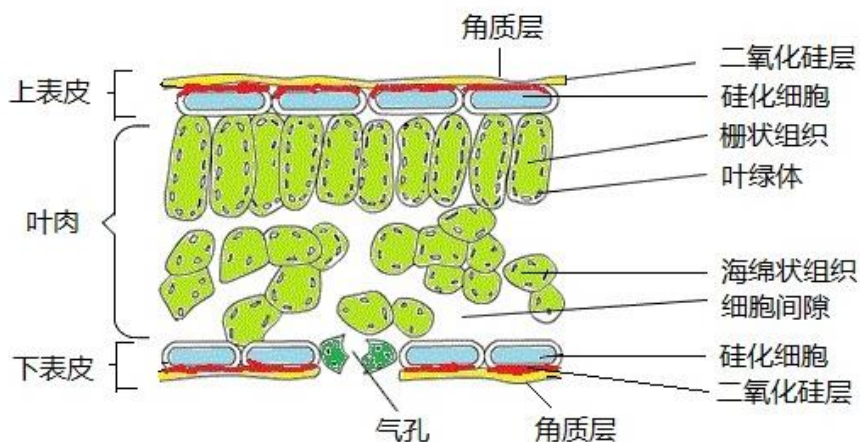


图 1. 水稻叶片的结构和硅化细胞的示意图

水稻叶片表皮的硅化细胞除了具有抑制水分蒸发的功能之外，最大的特征是具有强韧的细胞壁和细胞膜，对病原菌的侵入和害虫的食害有较好的阻止作用，增强了植株对病虫害的抵抗力。另外，由于硅化细胞的存在，可使叶片直立不下垂，受光姿势好，有助于光合作用。还会使茎秆强韧不易倒伏。谷壳也是二氧化硅含量最高的组织之一，析出黏附在细胞壁上的二氧化硅构成了坚硬的谷壳，可以保护内部的米粒不易受到椿象虫的食害，减少斑点米的出现。

植物中的硅和钙之间有很强的拮抗关系。按照植物中硅和钙含量的比例关系可以将植物分成喜硅植物和非喜硅植物。喜硅植物中的硅含量超过钙含量，即硅与钙的含量比超出 1.1: 1，而非喜硅植物则硅含量远远低于钙含量。有研究人员在调查同一土壤上生长的 175 种植物的硅和钙的比例后发现喜硅植物的平均硅含量达到 1.96%，而非喜硅植物的平均硅含量为 0.25%，仅是喜硅植物的 1/8。

最有名的喜硅植物是水稻。水稻一生中所吸收的硅重量超过了氮磷钾这三大元素的总和。水稻的叶片约含有 10~20% 的非结晶性水和二氧化硅。若叶片的二氧化硅含量低于 10% 的话，会使得茎叶软弱，容易倒伏和患病虫害，对异常气候（冷害，高温障害等）的抵抗力显著下降。稻壳里也积累了大量的二氧化硅，谷壳燃烧后遗留下的灰烬里二氧化硅的含量高达 87~97%。1000m²（1.5 亩）的稻田若收获 600 公斤稻米的话，水稻在生长期就需要吸收约 120 公斤二氧化硅。除了水稻之外，苔藓植物，蕨类植物的石松类，木贼类植物的一部分，禾本科植物，莎草科植物中也有很多喜硅植物。

植物吸收的硅主要来源有 3 处。① 土壤溶出的硅，② 植物残骸分解后释放出的硅，③ 灌溉水带来的硅。

硅是地壳中含量排第 2 位的元素。虽然绝大部分是以结晶性的石英和硅酸盐矿物存在，完全不溶于水。但也有相当部分的硅以硅酸铝盐结晶存在土壤粘土矿物中，这些硅酸铝盐是以层状结晶存在的，其溶解度强烈受到土温和 pH 和水分的影响。有调查结果表明，在正常的环境条件下，土壤溶液中的二氧化硅浓度可达到 30~40ppm。通常，非喜硅植物只需吸收土壤中的硅就可以满足其需要，但喜硅植物需要吸收大量的硅，土壤粘土矿物溶出的硅难以满足其需求，特别是水稻等的需求。

植物体内的硅是以非结晶性的水和二氧化硅的状态存在的。收获后残留在土壤里的植物残骸被土壤微生物分解后，水和二氧化硅就会被释放出来。虽然水和二氧化硅属于难溶性化合物，但其溶解性还是高于结晶性的二氧化硅和铝硅酸盐，可以较易被植物吸收利用。因此，将稻秆和谷壳留在稻田里，让其腐熟分解会有利于下一造的水稻生产。

水稻所吸收的硅大部分是来自灌溉水。降雨降雪等降落到地面上的水会渗透到地表下成为地下水。地下水经过漫长的岁月通过地层时会从岩石中溶解出微量的硅。当地下水涌出到地表形成河流和湖泊等地表水后，在用于灌溉作物时，水中所含的硅也一起供给了作物。特别是稻田中的硅约有一半是通过灌溉水补给的。另外，若灌溉水中的硅含量不高的话，土壤溶出的硅亦会有所增多。

图 2 是水稻吸收的硅的来源以及吸收后的硅在水稻体内分配率的示意图。稻田的硅有一半

是来自灌溉水，不足部分则来自土壤粘土矿物的溶出。植物残骸能够供给的硅并不多。这是因为水稻收获后，稻秆和谷壳基本上都不会返回稻田，所以限制了来自植物残骸分解后放出的硅量。

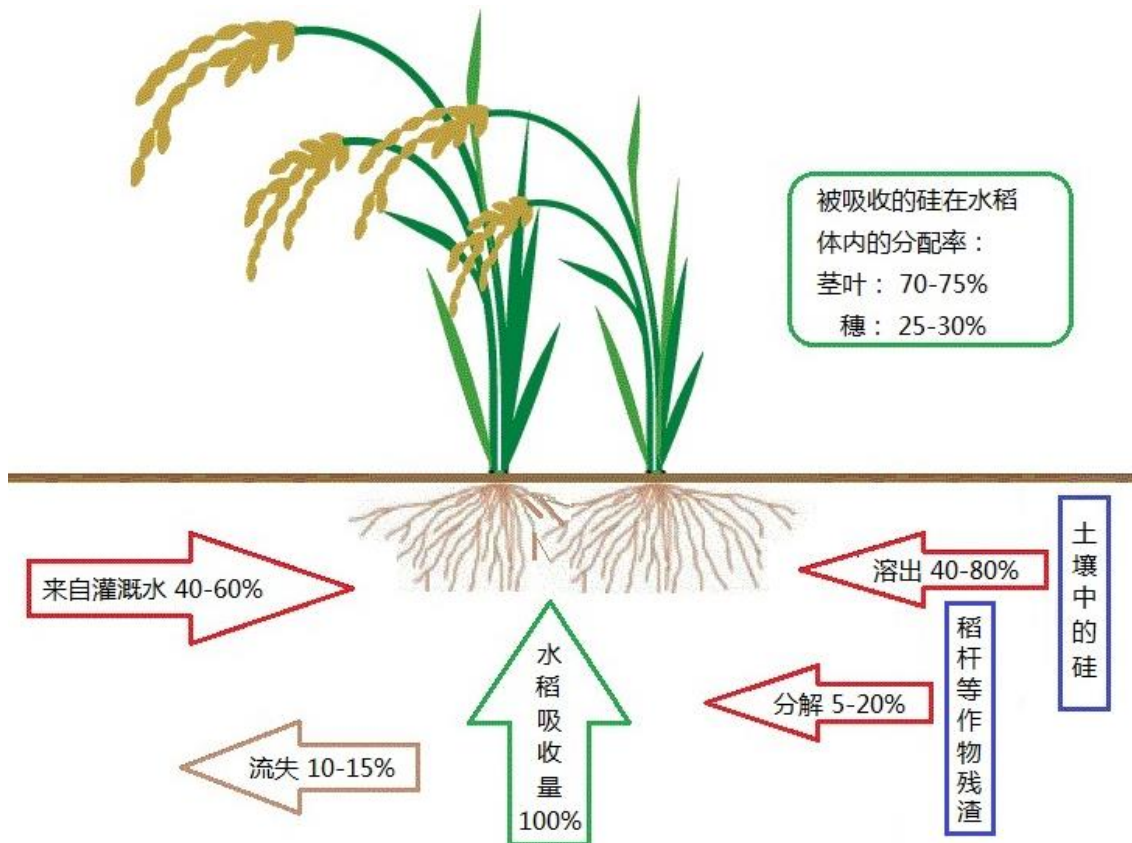


图 2. 水稻的硅来源和吸收后的硅在水稻体内的分配示意图（以水稻的硅吸收量为 100）

河溪水中的硅含量与该河流的流域地质状态有很大的关系。在日本，从火山熔岩形成的流纹岩和浮石，火成岩变质而成的安山岩，玄武岩和花岗岩涌出的地下水含有较高的二氧化硅，其含量可达 10~20ppm。从沉积岩类的砂岩和石灰岩涌出的地下水则含硅量较低，通常不满 10ppm。雨水和融雪水则基本不含硅。但是，湖泊和池塘水的硅因为被水中的硅藻吸收和金属氢氧化物的吸附，含量会大大降低。有调查结果表明，流入日本琵琶湖的河水含硅量均在 8~10ppm 左右，但琵琶湖水的含硅量年平均在 1ppm 以下。

土壤溶出的硅不足，灌溉水也不能供给足够的硅的话，喜硅植物的生长会受到抑制，对不良环境的抵抗力下降，收获量受到影响。因此，有必要施用硅肥来补充土壤中不足的硅。

常用的硅肥有硅钙肥（矿渣硅肥），钙镁磷肥，硅胶等含有非结晶性无定形二氧化硅的肥料或土壤改良剂。性价比最高的是硅钙肥和硅胶。

硅钙肥是钢铁厂的高炉或转炉生产钢铁时产生的熔融矿渣在出炉时注入喷射冷水中使其急速冷却，同时粉碎成细粉状的肥料。因为经过急冷，矿渣中的硅来不及形成结晶，其构造保持在非结晶性的水和二氧化硅。通常高炉矿渣制成的硅钙肥含有 20~30%的可溶性二氧化硅，

还含有大量植物所需的钙，镁，铁，锰等中微量元素，化学性质为碱性，价格便宜，还能改良酸性土壤。在日本，除了稻田之外还广泛施用在旱地作物和牧草栽培上。

硅胶是非结晶性无定形水和二氧化硅微粒子的凝聚物，可溶性二氧化硅含量高达 85~95%。特别是粉碎后的硅胶粉其表面积增大，溶解性高，在紧急需要给作物提供硅时是最佳的硅肥。

硅不是植物生长的必须元素，对于非喜硅植物来说，土壤可供硅的多寡基本上不会对其生长产生影响。对于喜硅植物来说，只要土壤和灌溉水能够供给足够的硅，是否施用硅肥对其生长亦没有影响。在日本，冬季降雪量大的北海道，东北地区和北陆地区，施用硅肥后可以看到有明显的肥料效果，但在其他地区则难以看出硅肥的效果。这是因为雪中的硅含量非常低，使用融雪水作为灌溉水的地区，稻田中的硅供给能力总是处于不足状态，不能满足水稻的需求。施用硅肥后能够补充不足的硅，显示出明显的肥料效果。而使用温暖地区多数是以富含硅的河流溪水作为灌溉水，稻田并不缺硅，即使是施加了硅肥也不过是锦上添花而已，看不出有明显的肥料效果。

作为杂谈，植物吸收了二氧化硅基本上都是被积储在硅化细胞里。植物死亡分解后，有部分硅化细胞的二氧化硅层和二氧化硅纤维素膜会变成透明玻璃质的植硅体（phytolith）半永久性地留在土壤里。特别是水稻的植硅体容易残留，在探索稻作起源时是考古学上的重要证据。图 3 是水稻的植硅体的光学显微镜和电子显微镜相片。

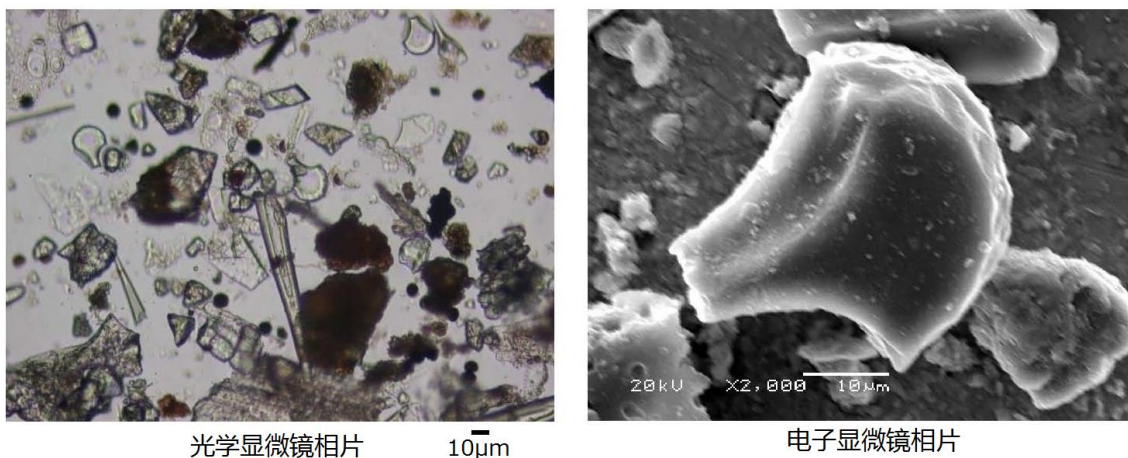


图 3. 水稻植硅体的显微镜相片（引自冈山理科大学小林博昭教授）