


**何乃健**

马大农学系毕业。曾任职吉打州慕达农业发展局，负责全国最大稻产区水稻双造种植技术的推广和训练工作。曾以英文、国文发表百余篇农业学术论文。

依据靳德明主编的《现代生物学基础》，多数现代天文学家支持宇宙起源的大爆炸（Big Bang）假说，认为在130亿年前的大爆炸中产生了宇宙初期的物质，其中氢（H）约占80%，氦（He）约占20%。恒星核心在引力作用（gravitation）下发生由氢聚变成氦的核聚变（nuclear fusion）反应，并释放光能。氢在恒星内部聚变成氦之后，氦又聚变成碳（C），碳聚变产生氧（O）、氖（Ne）和镁（Mg）；氧在聚变中产生硅（Si）和硫（S），由硅聚变产生铁（Fe）。

### 硅含量在地壳中仅次于氧

硅（silicon，亦称矽，元素符号为Si）是地壳中含量仅次于氧（oxygen，元素符号为O）而居于第二位的元素。硅与氧结合，形成了二氧化硅（silicon dioxide，亦

称硅石 silica，即 $\text{SiO}_2$ ）。硅石占地壳质量的87%以上。自然界中硅石的存在形式约200余种，包括晶态的石英（quartz，亦称水晶）和云母（mica）。花岗石中白色或黑色鱼鳞状的薄片晶体就是云母。白云母中含钾（potassium）与铝（aluminium），黑云母中含铁和镁。

土壤矿物质（soil minerals）是由地壳中的岩石与矿物经过各种风化作用演变而成，其中氧含量约49%、硅含量约33%、铝约7%、铁约4%，其余90多种元素合在一起，仅7%左右而已。石英（ $\text{SiO}_2$ ）与碳酸钠（ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ）、碳酸钙（ $\text{CaCO}_3$ ）混合加热熔炼，就形成普通的玻璃，用途非常广泛。

土壤中的原生矿物，均属于硅酸盐（silicate）矿物。在砂粒（sand）和粉粒（silt）中，石英含量介于70至90%，其余的成分主要为钾、钠、钙、镁的无水铝硅酸盐

# 硅对稻作的增产效果

硅是地壳中含量仅次于氧的第二元素。硅对稻作的增产作用，主要是：叶直紧凑增大植株光合面积，提高光能利用率；增强稻作对真菌、细菌、害虫的抵抗力；减少重金属对稻作的毒性；减少角质层的蒸腾作用，提升作物用水效率；提升稻作的抗倒伏能力。稻农实在不能忽视硅肥的重要性。



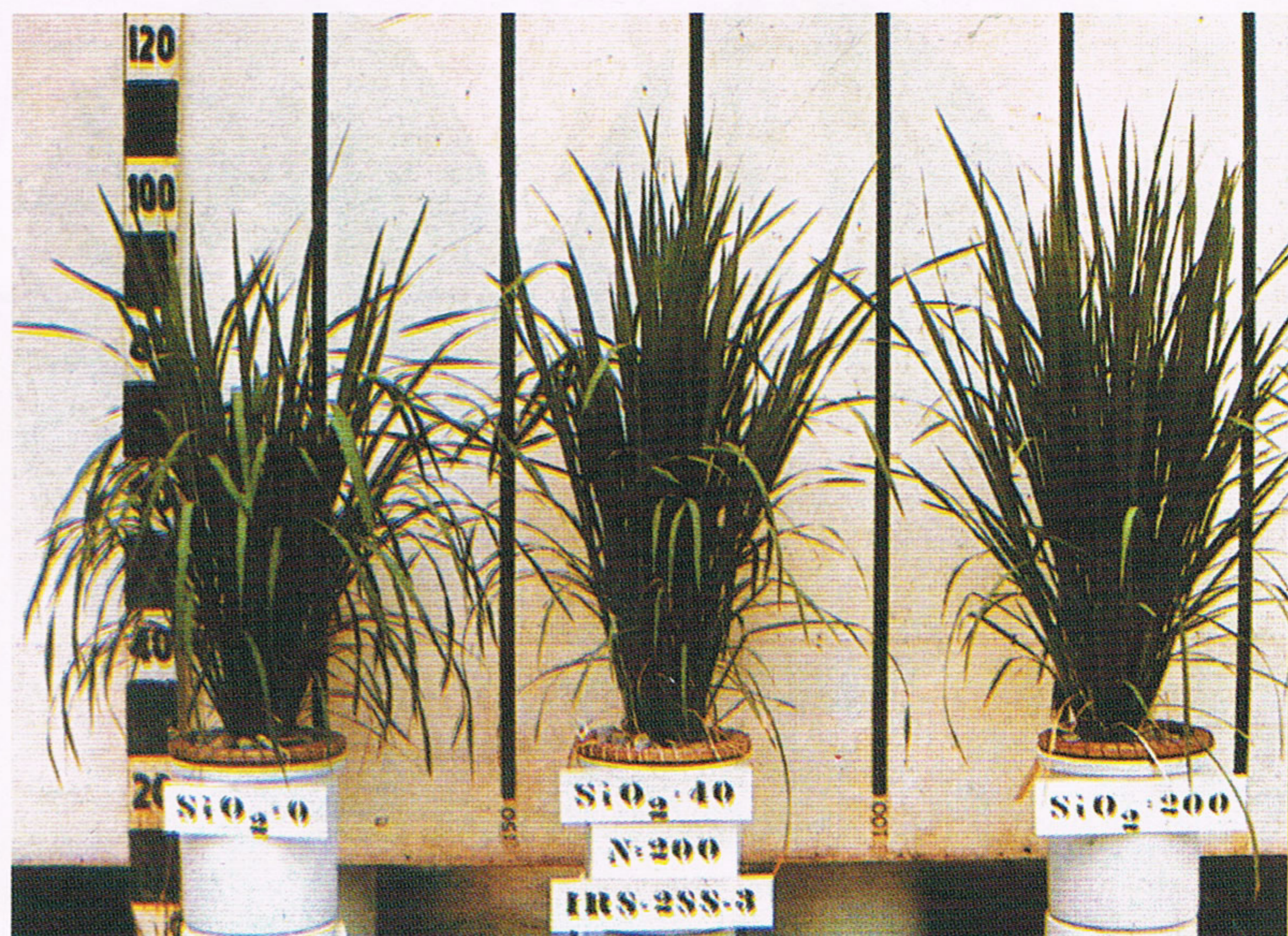
矿物。原生矿物经过化学蚀变，在成土过程 (soil formation) 中形成的层状硅酸盐，是粘粒 (clay) 的主要成分。粘粒的矿物结晶，是硅氧四面体 (tetrahedron) 与铝氧八面体 (octahedron) 组合而成的构造。土壤砂粒、粉粒和粘粒结构中硅的溶解度极低，很难让植物的根部吸收。不过，随着成土因素的变化，土壤作为不断演化的自然体，在气候和生物的作用下，难溶的硅酸盐经过水合作用 (hydration) 会形成微量的正硅酸 (orthosilicic acid)。硅酸具有微弱的溶解度 (silicic acid  $H_4SiO_4$  is weakly soluble)，因此有一小部分可为植物吸收。

## 不同植物对硅的吸收力有别

植物对硅的吸收能力存在很大的差异，能将硅吸收后累积于组织内的称为硅累积者 (silicon accumulators)，其中包括一些低等植物如木贼科的问荆 (*horsetail*, *Equisetum* spp) 和湿地禾本植物，一般能于叶中储存 4 至 7% 硅素。至于非硅累积者 (silicon nonaccumulators)，包括旱地的谷类作物，其叶中硅储存量仅 0.5 至 1.5%，一般双子叶植物的硅含量不高。

水稻是禾本科植物中吸收硅酸最多的作物 (rice shows the greatest uptake of silicic acid in the family Poaceae)。这种喜硅作物，若施用大量硅肥，能使硅素 (Si) 在茎叶中的含量高达干重的 10 至 15%。

根系是水稻吸收水分与矿质盐类的主要器官。根系对矿质盐类的吸收具有选择性。吴丁主编的《水稻应用生理》中指出：在同一成分的培养液内，水稻吸收的铵态氮 (ammonium nitrogen) 与硅多于番茄。根部吸收硅与其他矿质盐的机理包括被动吸收和主动吸收。被动吸收包括扩散 (diffusion)，也就是当硅离子在水中的浓度大于细胞内浓度时，即以扩散方式进入细胞。被动吸收不需要消耗能量，与代谢 (metabolism) 没有直接关系。主动吸收 (active absorption) 是细胞表层的高分子物质，例如卵磷脂，可通过本身的合成与分解，像车辆一样，反复运载硅离子进入细胞内部，这种吸收法需要消耗能量。在主动吸收过程中，硅酸盐可抑制硫酸盐 (sulphates) 的吸收，但不能抑制磷酸盐 (phosphates) 或硝酸盐 (nitrates) 的吸收，说明硅酸盐和硫酸盐有共同的离子载体 (ionic carrier)，这种载体与磷酸盐或硝酸的载体不同。



缺硅的水稻叶片下垂，而正常的稻株叶片上举。

硅离子由根吸收后，透过蒸腾作用 (transpiration)，与水分一起在水稻维管束 (vascular bundle) 中的木质部 (xylem) 自由流动、上升。水分由叶片蒸腾出体外，大部分硅则积累于表皮细胞表面。中国科学家估计：每公顷若产稻谷 7.5 吨，稻禾将从土壤中吸收二氧化硅 750 至 1,500 公斤，平均约 1,125 公斤左右，远远超越氮、磷、钾的吸收量。

## 硅对稻作的种种好处

硅对稻作的增产作用，主要是通过以下的效应来完成：

### 1) 叶直紧凑增大植株光合面积，提高光能利用率 (increasing canopy photosynthetic efficiency by keeping leaves erect and compact)

稻作中凡是绿色并且含有叶绿素 (chlorophyll) 的部位都能进行光合作用。光合作用是以光能为动力，将二氧化碳 ( $CO_2$ ) 和水转化为碳水化合物 (carbohydrate)。

水稻产量与光合产物的积累息息相关。光合产物则与光合时间、光合面积、光合能力等性能关系密切。光合面积主要指叶面积，对产量的影响最大。水稻合理密植和水肥管理等农艺措施，就是积极扩大光合面积来达致增产效果。然而，单凭扩大光合面积也会造成面积过大而影响到稻作群体的通风和透光，引起光合产物积累与消耗的矛盾。稻叶近似水平伸展，光能反射的损失大，加上下层叶片受光较少，甚至因为光合生产率低而变成消耗器官。



增加稻中的硅含量，能减少大螟的破坏。



硅能降低稻瘟病的侵染。



优良的株型 (ideal plant type) 是矮株、紧凑、叶短直、叶片小而厚，光透射损失率低。硅肥的施用能增强表皮细胞的机械强度，使稻叶呈直立型，角度和弯曲度小，减少叶片间的相互遮荫。由于叶直就能增加密植程度，增大光合面积，充分利用光能，提高光能利用率，满足水稻群体积累最高经济产量的要求。

## 2) 增强稻作对真菌、细菌、害虫的抵抗力 (increasing resistance to fungi, bacteria and insect pests)

水稻的叶、茎、根的细胞于施用硅肥后会硅质化，其中以表皮细胞(epidermal cells)的硅质化最多。硅在细胞壁与细胞间空隙 (intercellular spaces) 以二氧化硅凝胶 (silica gel) 或非晶体硅石 (amorphous  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) 的形态存在于植物组织中，从而增强防御病虫害的作用。

日本植物营养学家I. Onodera于1917年发表的论文〈稻瘟病的化学研究〉中指出：染病稻体内的硅含量比健康的稻少。R. Kawashima于1927年进一步证实硅肥施用会提高稻株对稻瘟病的抵抗力。其他日本学者也在多项田间实验中显示：在缺硅的水田中施用每公顷1.5至2.0吨各种硅肥，能大大降低稻瘟的侵染 (many Japanese researchers demonstrated that application of 1.5 to 2.0 tons/ha of various Si sources in Si-deficient paddy soil dramatically reduced the intensity of blast)。

华裔学者S. J Chang于2002年发表的研究论文中指出：硅能令白叶枯病 (bacterial leaf blight, *Xanthomonas oryzae pv. oryzae*) 的病斑缩短5至22%。病斑缩小与硅降低稻叶中可溶性糖 (soluble sugar) 有相互关联。

稻穗污染 (dirty panicle, 亦称grain discolouration)

是由真菌 *Bipolaris* sp, *Curvularia* sp, *Phoma* sp, *Microdochium* sp, *Nigrospora* sp 和 *Fusarium* sp 等造成的谷壳杂色斑点。每公顷施用200公斤二氧化硅能降低约18%的感染，同时提高20%稻谷重量。

王人潮编写的《水稻营养综合诊断及其应用》一书中指出：土壤中的有效硅 (available  $\text{SiO}_2$ ) 由60ppm增加到220ppm，剑叶的含硅率会从7.4%增至18.7%，穗颈瘟 (neck rot) 的受害率从8.6%降低至1.5%，而大螟 (*sesamia inferens*) 的受害茎从33.6%降低到6.6%。

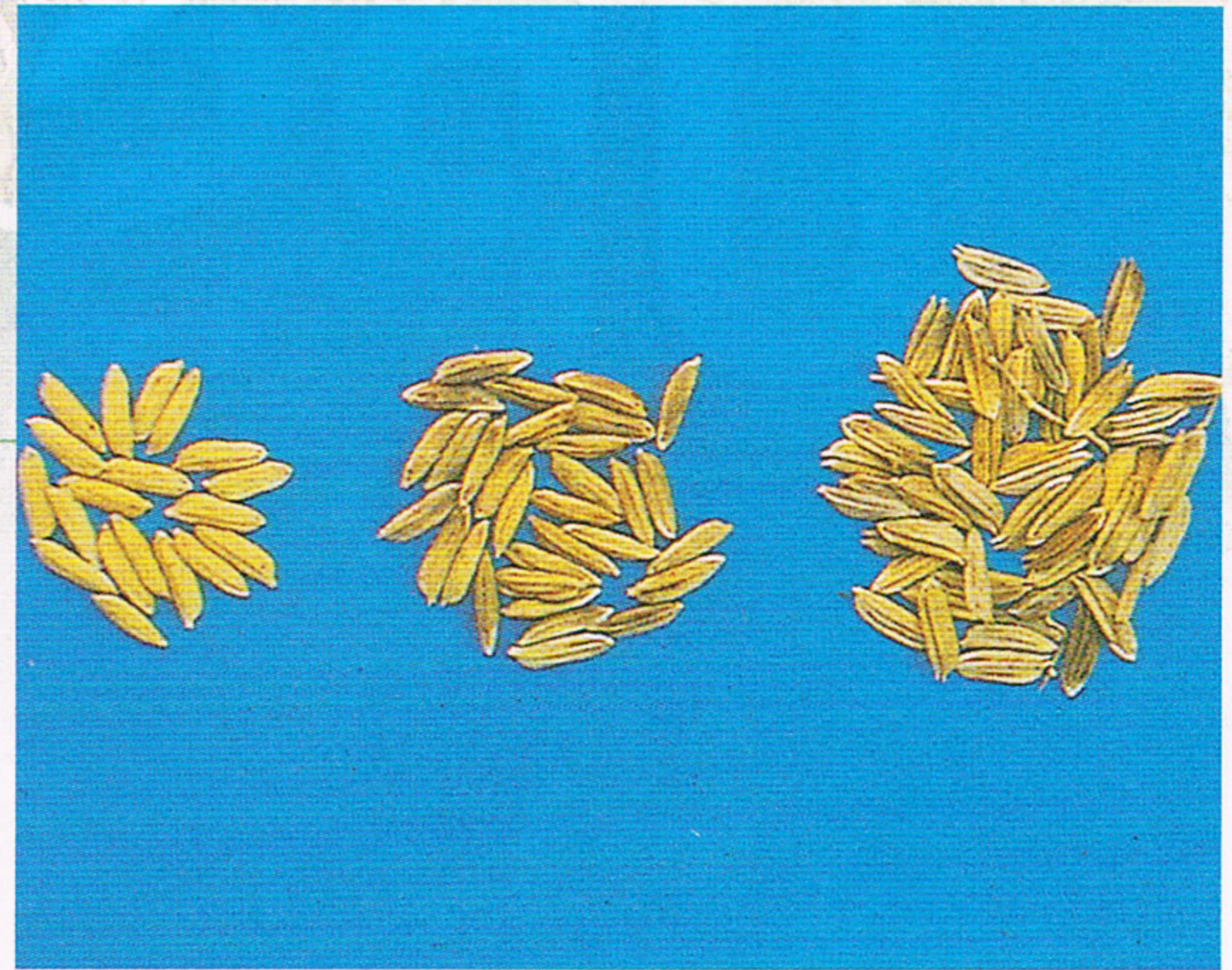
硅在表皮细胞的角质层 (cuticle) 之下硅质化，除了能起到防御病虫害之外，还能促进铵的同化 (promote ammonium assimilation)，抑制可溶性氮化物，以及不稳定的氨基酸 (amino acid) 和酰胺 (amide) 在细胞中积累。这些不良物质，能为病原菌提供繁衍的养料。

## 3) 减少重金属对稻作的毒性 (reduce the toxicity of heavy metals)

水稻受到某种物质的毒害，在生理上会产生变异而枯萎。最常见的中毒病害包括酸害、盐害、矿毒害、残毒害与肥害等。

长期积水的稻田因为缺氧而造成厌氧微生物 (anaerobic micro-organism) 变得异常活跃，特别是土壤含有较多易分解的有机质在缺氧条件下分解时，会降低土壤的氧化还原电位 (redox potential) 而产生还原性有毒物质。

氧化还原电位的代表符号是 Eh，单位是毫伏 (millivolt，既千分之一伏特，符号为mV)。Eh值高说明土壤通气良好，氧化过程强劲。Eh值低显示土壤缺氧，还原物质大量积累。



硅能减少稻谷出现斑点。

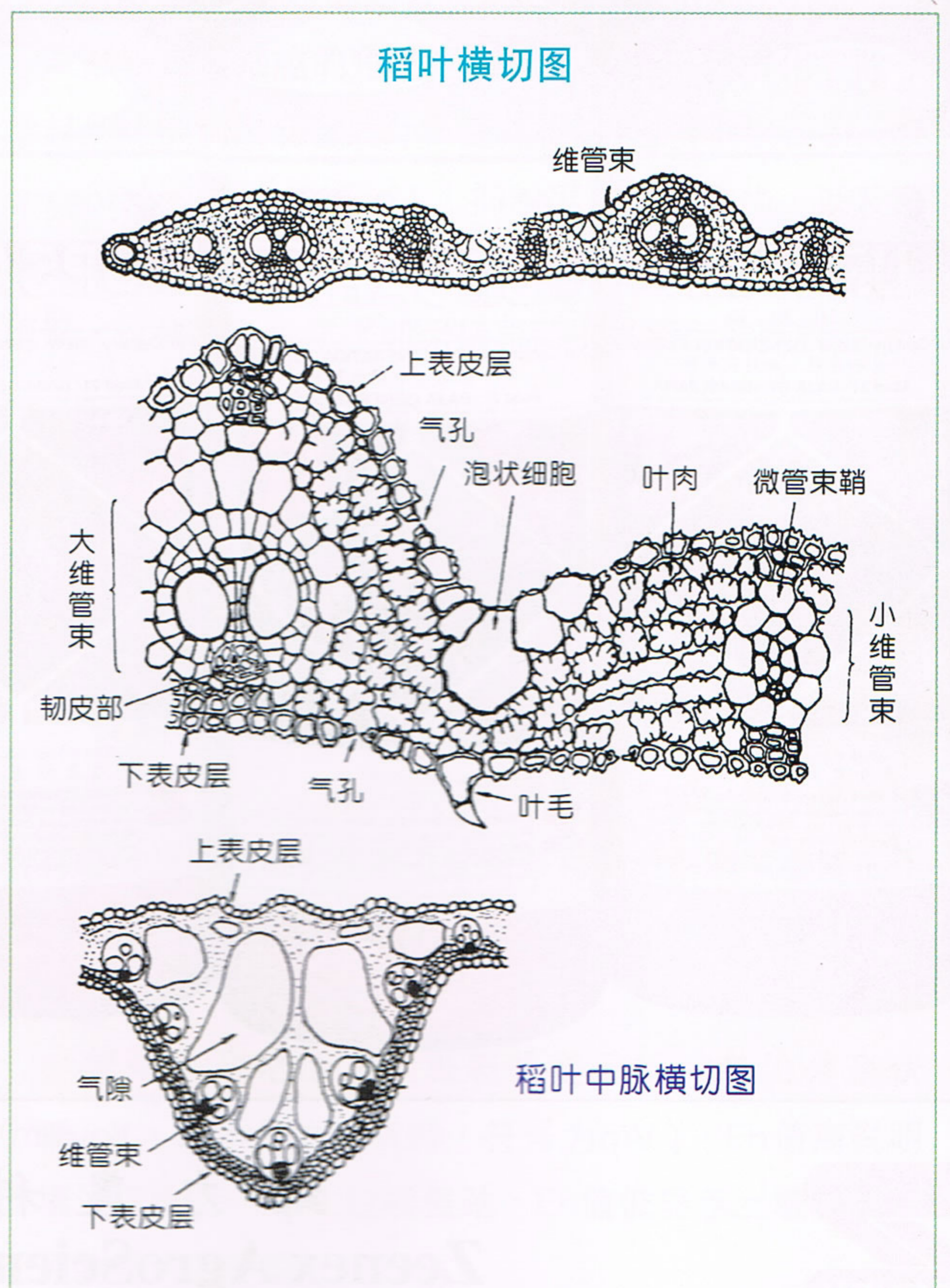
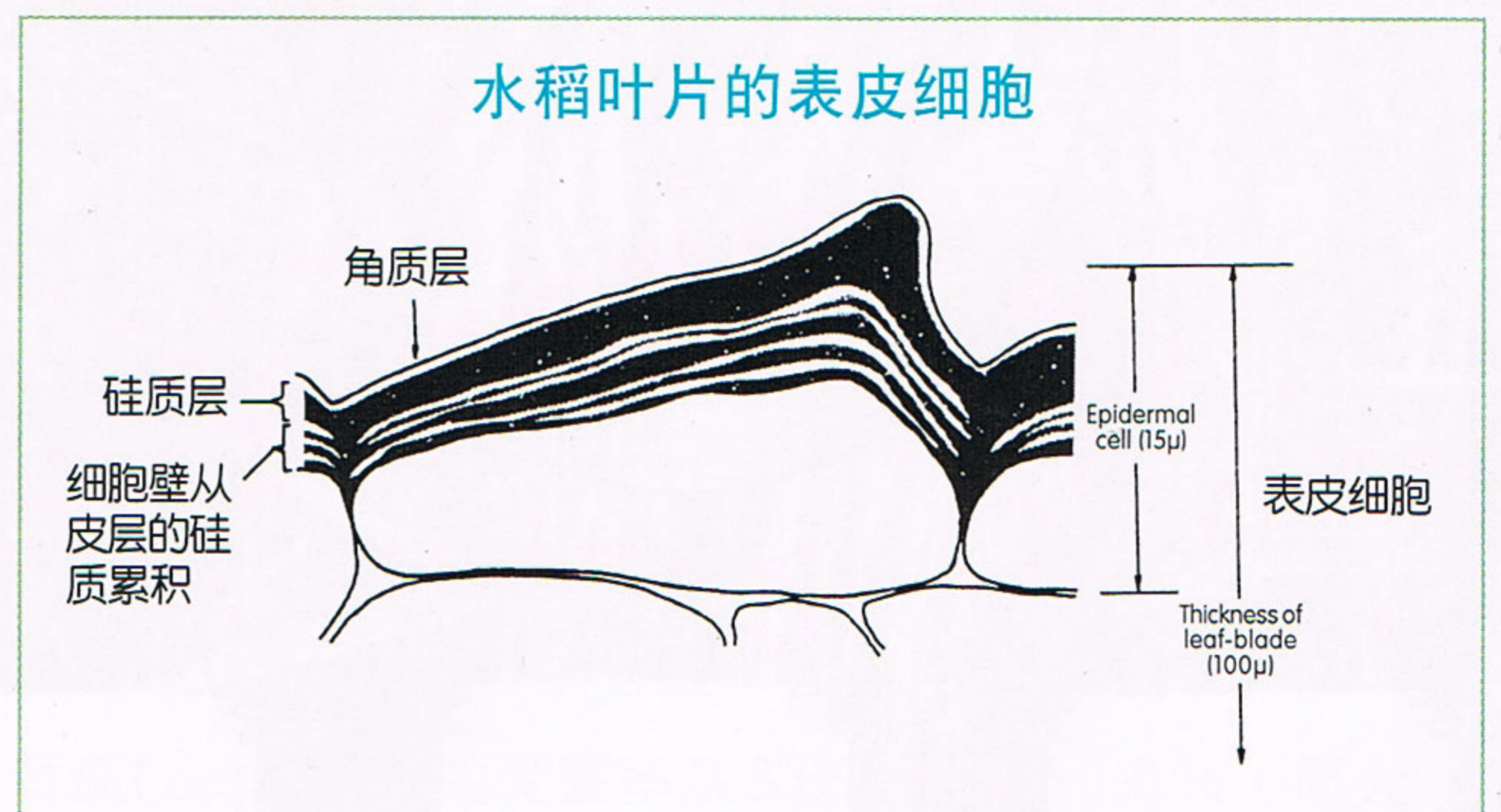
稻田灌水后，土壤开始进行还原过程。当Eh值降至600~500mV时，氧气消失殆尽，Eh值降至400mV时， $\text{NO}_3^-$ 在还原作用之下分解，发生脱氮现象(denitrification)，具毒性的有机酸也开始形成。Eh值降至300mV时，锰( $\text{Mn}^{+4}$ )大量还原为亚锰( $\text{Mn}^{+2}$ )，3价铁( $\text{Fe}^{+3}$ )还原为2价铁( $\text{Fe}^{+2}$ )。当Eh值降至负值时，硫酸离子( $\text{SO}_4^{-2}$ )还原为硫化物(sulphide)。当Eh值降至-150与-190mV之间等，沼气(methane,  $\text{CH}_4$ )产生。在-190mV之下，所有的锰、铁、硫都转化为还原性物质，严重损伤稻根。锰毒造成下部叶片、叶鞘的脉出现竭斑，新叶萎黄(chlorosis)。铁毒造成叶片出现锈斑，严重时叶片呈紫褐色，根变黑腐烂，分蘖减少，产量骤降。

增加土壤的有效硅，能提高氧运向稻根，促进根的氧化力，增强水稻对土壤还原环境的抗性，使2价的铁与锰离子氧化而沉积于根表面，减少这些还原物质进入稻体而引发中毒症状。

硅还可调整酸性土壤，减少重金属的有效性，可以形成硅酸铝(aluminium silicate)、硅酸镉(cadmium silicate)与硅酸汞(mercuric silicate)等沉淀物，减少这些重金属被作物吸收后，进入食物链而危害人体健康。

#### 4) 减少角质层的蒸腾作用，提升作物用水效率 (improving water use efficiency by reducing cuticular transpiration)

稻的叶片是暴露在生态环境中面积最大的器官，其形状和结构最容易随环境而改变。叶片表面覆盖着一层由扁平细胞组成的表皮，分为上表皮和下表皮。表皮细胞之间有许多气孔(stomata)，能进行气体交换。禾本科植



物，包括水稻的叶片上表皮还有泡状细胞 (bulliform cell)，位于两条叶脉 (veins) 之间。从横切面观察，每组泡状细胞呈扇形。气候干燥时，叶片蒸腾失水过多，泡状细胞萎缩，叶片就向内卷成筒状，以减少蒸腾；当天气湿润，蒸腾减少时，泡状细胞又吸水膨胀，而叶片又再次舒展。

表皮细胞的外壁较厚，角质化，形成角质层 (cuticle)，能防止水分散失过多和病虫侵害。

水分通过稻根的皮肤层输送到根的木质部 (xylem)，然后由木质部中的导管将水分转运到稻体的各个部位。叶片在进行蒸腾作用时，靠近气孔的细胞水分减少，细胞质变浓，并且开始从周围细胞吸水，周围细胞又从叶脉的导管内吸水，产生蒸腾拉力，使水在导管内上升，造成蒸腾液流。蒸腾作用愈强，对水的拉力也愈大。

硅的积累增加了表皮细胞壁的厚度，造成角质层蒸腾显著下降 (silica effectively reduces cuticular transpiration)。日本科学家的研究显示：生产稻体干物质的蒸腾耗水，在施用硅肥后能降低30%左右。稻作生产1公斤的稻谷需水5,000公斤，硅肥能减少水分在蒸腾作用中的消耗，从而提升用水的效率。

### 5) 提升稻作的抗倒伏能力 (Silica enhances rice plant's resistance to lodging)

倒伏是禾本科作物在生长过程中的一种生理障碍。倒伏往往造成秆茎与稻叶在田面挤压，影响光合作用与光合产物的输送。收割前发生严重倒伏，茎秆和稻穗久浸于田水之中，穗粒会发芽和生霉。



硅能增强水稻抗倒伏的能力。