

2 矿质元素的缺乏和毒害

T. Fairhurst¹, A. Dobermann², C. Quijano-Guerta², and V. Balasubramanian²

2.1 氮的缺乏

氮的功能及其移动性

氮能促进植株快速生长，增加叶面积和穗粒数，氮素影响所有的产量构成因子，叶色是植株氮素状况的指标，与叶片光合速率和作物生产有密切关系，当植株施用了足够的氮后，对其它的营养元素如磷和钾的需要量会增加。

氮的缺素症状及对生长的影响

发育迟缓，植株矮小变黄。老叶或整个植株呈黄绿色（附件A-7, A-10, A-13）。

氮素缺乏原因

- ▶ 土壤供氮能力低；
- ▶ 矿质氮肥施用不足；
- ▶ 氮利用率低（挥发和反硝化、施用时间和地点不当、渗漏或径流等造成的损失）。

由于土壤不能为现代高产品种提供足够的氮素，所以缺氮在水稻种植区是普遍存在的。在几乎所有的低地水稻土上，增施氮肥都会使产量显著提高。

1 CTP Holdings Pte Ltd., Singapore; 2 International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.

氮素缺乏的发生

- ▶ 土壤有机质含量低（如：有机碳 $<0.5\%$ ，粗质地的酸性土壤）；
- ▶ 土壤自身供氮能力低（如：酸性硫酸盐土壤、盐碱土壤、缺磷土壤、灌溉不良的湿地土壤）；
- ▶ 土壤有机质缺乏的碱性和石灰性土壤。

淹水对氮的有效性与吸收的影响

如果铵态氮肥（如：尿素）在淹水后施入土壤还原层，铵离子会被被土壤胶体吸附，或暂时被土壤微生物固定，或被非生物固持，如被土壤有机质如酚类化合物所束缚。除在质地较差的土壤之外，渗漏损失一般是非常小的。

表施尿素很快被水解（在2-4天内），并且很容易以氨挥发的形式损失掉。

在分蘖中期以后，形成密集的浅层根系，植株吸收施入水层中氮的效率会增加（ ≤ 10 公斤/公顷/天），而氨挥发损失将会很小。

氮素的一般管理方法

对氮缺乏的症状处理比较简单，施用氮肥的效果也非常明显。一般在2-3天后就可以观察到施肥效果（变绿，促进了植株的生长）。需要基于土壤和植株的动态管理来达到优化每季氮肥效率的目的（见1.8）

2.2 磷的缺乏

磷的功能及其移动性

磷是植株体内能量储存和转移的基本元素，磷可以在植株体内移动并且促进分蘖、根系生长、开花和成熟，磷在植株早期的生长阶段尤其重要。

磷的缺素症状及对生长的影响

植株矮化、呈深绿色，叶片直立、分蘖减少
(附录A-10,A-15)

土壤中磷的丰缺

对于含较低或没有游离态 CaCO_3 的低地水稻土,Olsen-P和Bray-1P测试的结果可以将磷含量做如下的分类:

磷的效应	Olsen-P	Bray-1 P (mg P/kg)
缺乏	<5	<7
中度	5-10	7-20
丰富	>10	>20

磷缺乏的原因

- ▶ 土壤供磷能力低;
- ▶ 矿质态磷肥施用不足;
- ▶ 由于土壤高的固磷能力或水土流失(只在旱稻中)导致磷肥利用率低;
- ▶ 氮肥用量过高而磷肥施用不足;

- ▶ 品种对缺磷的敏感性和对磷肥的响应程度存在差异；
- ▶ 种植方法的差异（由于直播稻密度过高，根系较浅容易发生缺磷）。

易于缺磷的土壤

- ▶ 含有机质较少和磷库较小且质地较差的土壤；
- ▶ 石灰性土和盐碱土；
- ▶ 火山岩（固磷能力强）、泥炭和酸性硫酸盐土壤。

磷素缺乏的发生

- ▶ 过量施用氮肥或氮肥与钾肥共同施用而磷肥施用不足。

淹水对磷的有效性与吸收的影响

干燥的土壤淹水可以使土壤中磷的有效性提高。

磷素的一般管理方法

磷素需要长期管理策略，施用的磷肥具有残留效果并且可以持续数年。管理的重点应该是建立和维持土壤中的有效磷水平，保证磷不限制植物生长、产量和氮的利用率（见1.8）。

2.3 钾的缺乏

钾的功能及其移动性

钾在植物细胞和光合产物运输中起重要作用。钾可以增加细胞壁强度，促进冠层光合作用和作物生长。与氮、磷不同，钾对分蘖没有显著的影响。钾增加了穗粒数、灌浆率和千粒重。

钾的缺素症状及对生长的影响

植株呈深绿色，叶片边缘黄化或在老叶尖部先出现坏死的深棕色斑点（附录A-10, A-17）。

如果氮肥施用过量而钾肥施用不足，病害（棕色叶斑、褐斑病、白叶枯病、纹枯病、叶鞘枯萎病、茎腐病和稻瘟病）出现的几率上升。

土壤中钾的丰缺

对于低地水稻土，交换性钾土壤测试结果可做如下分类：

钾的效应	交换性钾(cmol _c /kg)
缺乏	<0.15
中度	0.15–0.45
丰富	>0.45

因为低地水稻土固钾能力很强，所以用1当量醋酸铵浸提出的交换性钾的量通常很小(<0.2 cmol_c/kg)，用这样的土壤测试值来评定钾的供应量是不可取的。

钾缺乏的原因

- ▶ 土壤供钾能力低;
- ▶ 矿质态钾肥施用不足;
- ▶ 秸秆全部移除;
- ▶ 灌溉水中钾的输入量很小;
- ▶ 由于土壤固钾能力很强或淋洗损失较大, 使得钾肥的吸收效率很低;
- ▶ 由于排水不畅, 导致大量还原性物质累积 (如: H_2S 、有机酸、 Fe^{2+}), 阻碍了根系发育和钾的吸收;
- ▶ 盐碱条件下土壤中钠钾比、镁钾比或钙钾比过高。由超基性岩的存在使土壤含有过量的镁。灌溉水中重碳酸盐浓度过高。

钾素缺乏的发生

- ▶ 过量施用氮肥或氮磷肥而钾肥施用不足;
- ▶ 直播稻在生长初期由于群体过密和根系尚浅;
- ▶ 杂交水稻对钾需求过大。

易于缺钾的土壤

- ▶ 土壤质地较差, 阳离子交换量低, 且钾库容量较小;
- ▶ 高度风化的酸性土壤, 阳离子交换量低, 且钾库容量较小;
- ▶ 含有2:1型粘土矿物的低地粘土, 固钾能力很强;
- ▶ 土壤钾含量很高, 但是 $(\text{Ca}+\text{Mg}):\text{K}$ 比例过高;

- ▶ 老成淋溶性的酸性硫酸盐土壤；
- ▶ 排水不良和强还原性土壤；
- ▶ 有机土壤。

淹水对钾的有效性吸收的影响

淹水导致溶液钾浓度增加并且增强了钾扩散到水稻根系的能力，特别是在固钾能力较弱的土壤上（如：土壤的主要成分是1:1型的高岭石类粘土矿物）。

含有2:1型粘土矿物的低地水稻土，在淹水的情况下会增加钾的固定和减少溶液浓度，所以水稻只能依靠非交换性钾库提供钾营养。

钾素的一般管理方法

钾的管理应该作为长期土壤肥料管理的一部分考虑，因为钾不同于氮，它不会轻易由于短期微生物的作用和化学过程从根区损失或在根区增加。

钾素管理中一定要保证钾不会降低氮肥利用率。（见1.8节）

2.4 锌的缺乏

锌的功能及其移动性

锌是水稻植株内的多种生物化学反应的基本元素，锌在根中积累并且可以从根中转移到生长旺盛的部位。因为在叶片中锌的再转移比较微

弱，特别是在氮缺乏的情况下，植株锌的缺乏症状更容易在幼叶中出现。

锌的缺乏症状及其对生长的影响

植株矮小在上部叶片上有棕色斑点，一般发生在移栽后2-4周（附件A-10, A-19）。

生长紊乱，植株矮化。

土壤中锌的缺乏

锌缺乏的临界值

- ▶ 0.6 mg Zn/kg:1 N醋酸铵，pH 4.8;
- ▶ 1.0 mg Zn/kg:0.05 N盐酸;
- ▶ 2.0 mg Zn/kg:0.1 N盐酸。

锌缺乏原因

- ▶ 土壤中有效锌含量较少;
- ▶ 种植了容易缺锌的品种（例如：IR26）;
- ▶ 高pH（厌氧条件下大于7）;
- ▶ 有机质高的石灰性土壤在还原条件下 HCO_3^- 浓度过高，或者因为灌溉水中 HCO_3^- 浓度过高导致土壤中高的 HCO_3^- 浓度;
- ▶ 由于淹水后铁、钙、镁、铜、锰、磷的有效性增加使锌的吸收受到抑制;
- ▶ 由于大量施用磷肥使锌固定（磷可以引发锌缺乏）;
- ▶ 灌溉水中磷浓度过高（只发生在用污水灌溉地区）;

- ▶ 大量施用有机肥和秸秆;
- ▶ 石灰施用过量。

锌缺乏的发生

- ▶ 过去大量施用氮磷钾肥（不包含锌）的集约化种植土壤;
- ▶ 一年三季水稻的种植系统。

易于缺锌的土壤

- ▶ 易渗漏的土壤、老成酸性硫酸盐土、盐碱土、石灰性土壤、含泥炭层的土壤、砂土、高度风化的土壤、酸性和质地较差的土壤。
- ▶ 磷、硅有效性高的土壤。

淹水条件对锌的有效性及其吸收的影响

在淹水条件下，由于pH值的上升导致了锌的溶解性下降，降低了锌的有效性。

锌缺乏的预防措施

- ▶ 品种：选择锌高效品种;
- ▶ 种植方式：深播或在2—4%氧化锌悬浮液浸种（如：每升水放入20—40克氧化锌）;
- ▶ 肥料管理：施用有机肥。为了防止锌的缺乏，在育苗和移栽前每公顷施用5—10公斤Zn（硫酸锌、氧化锌或氯化锌），或在移栽前几天施入苗床。在大多数土壤上，每隔2—8季作物要全面施用一次硫酸锌;
- ▶ 水管理：对种植三季作物的土壤定期排水，

不要用高pH值(>8)的水灌溉。

锌缺乏的处理

施用锌肥可以很有效的解决锌的缺乏。在高pH值土壤上，表施比深施入土更有效。硫酸锌是最普遍的锌源（但是氧化锌更便宜）。下面的方法，不论是单独使用还是配合使用都是有效的，但是要在症状开始出现的时候立即施肥：

- ▶ 如果缺锌的症状在大田中发现，在土壤中每公顷表施10–25公斤 $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 或20–40公斤 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。硫酸锌（25%）与沙土（75%）混合施用使锌的施用更均匀。
- ▶ 植株生长缺锌的紧急处理措施是叶面喷施0.5–1.5公斤Zn/公顷（如：每公顷0.5% ZnSO_4 溶液200升）。

2.5 硫的缺乏

硫的功能及其移动性

硫对于蛋白质合成、植物器官功能的发挥和植株结构的形成是必须的，硫也在碳水化合物代谢中起作用，与氮相比它的移动性较差，所以缺素症状首先出现在幼叶中。

硫的缺乏症状和对生长的影响

植株淡绿色，幼叶浅绿（附件A-10, A-21）。

土壤中硫的缺乏

缺硫的症状有时会 and 缺氮的症状相混淆。对土壤硫的测试是不可信的，除非包含无机硫和可矿化的有机硫（硫酸酯）

土壤硫缺乏的临界值如下：

- ▶ $<5 \text{ mg S/kg土}$: 0.05M 盐酸；
- ▶ $<6 \text{ mg S/kg土}$: 0.25M KCl 加热到 40°C 持续 3 小时；
- ▶ $<9 \text{ mg S/kg土}$: $0.01\text{M Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 。

硫缺乏的原因

- ▶ 土壤有效态硫的含量低；
- ▶ 由于集约化的耕作耗竭了土壤中的硫；
- ▶ 施用不含硫的肥料（尿素代替了硫酸铵，三过磷酸钙代替了普通过磷酸钙，氯化钾代替了硫酸钾）；
- ▶ 在发展中国家的许多农村，由于工业排放的气体很少，降雨中的硫含量也很少；
- ▶ 硫的浓度在地表水中变幅很大，灌溉水中的 SO_4^{2-} 浓度往往较小；
- ▶ 燃烧秸秆使硫大量损失。

易于缺硫的土壤

- ▶ 含水铝英石的土壤（如：火山灰土）；
- ▶ 低有机质土壤；
- ▶ 风化程度高、含大量铁氧化物的土壤；

- ▶ 易淋溶的砂质土壤。

硫缺乏的发生

- ▶ 在气体排放量较高的工业中心地区，附近的水稻产区缺硫现象较少。

淹水条件对硫的有效性及其吸收的影响

- ▶ 在淹水条件下硫的有效性降低。

硫缺乏的预防措施

在大多数的低地土壤上，从环境或从肥料中获得的硫等于或超过籽粒带走的硫。

硫缺乏可以通过施用含硫肥料得到补充。

- ▶ 自然环境输入：估算由大气沉降带进的硫量；
- ▶ 育苗期：将含硫肥料（硫酸铵、普通过磷酸钙）施入苗床；
- ▶ 肥料管理：通过施用含硫的氮磷肥（如：硫酸铵[含硫24%]，普通过磷酸钙[含硫12%]）来补充作物带走的硫，该措施根据实际情况可不定期实施；
- ▶ 秸秆管理：要将秸秆还田而不要移走或焚烧，秸秆中40–60%的硫在燃烧时损失掉；
- ▶ 土壤管理：优化土壤管理来提高硫的吸收：
 - ▶▶ 保持充足的渗漏性（大约每天5毫米）避免土壤过度还原；
 - ▶▶ 在休闲期，排水干田耕作来增加土壤硫的氧化率。

硫缺乏的处理

在生长初期如果确定植株缺硫，那么增施硫肥是非常有效的，一般在5天内缺硫的症状将得到纠正。

- ▶ 如果出现中度缺硫症状，每公顷施10公斤S。
- ▶ 如果土壤出现了严重的硫缺乏，每公顷施20–40公斤S。

2.6 硅的缺乏

硅的功能及其移动性

硅对水稻来说是有益元素。硅可促进叶片、茎和根系的发育。由于缺硅植株的蒸腾损失量增加，其水分利用率降低。

硅的缺素症状及其对生长的影响

茎和叶片软化，下垂（附录A-11, A-23）。缺硅的植株特别易于倒伏。

土壤中硅的缺乏

土壤出现硅缺乏的临界浓度为40 mg Si/kg土（1M醋酸钠，pH 4的缓冲溶液）

硅缺乏的原因

- ▶ 老成水稻土或强烈风化导致土壤供硅能力下降；
- ▶ 母质中含硅较少；

- ▶ 在集约化栽培条件下由于秸秆长期被移走导致土壤有效硅的耗竭。

缺硅的发生

在亚洲热带地区，集约化水稻种植体系硅缺乏并不常见。

易于出现硅缺乏的土壤

- ▶ 温带或亚热带的老成、退化水稻土；
- ▶ 矿质硅含量较少的有机土壤；
- ▶ 高度风化和淋溶的热带土壤。

淹水条件对硅有效性及其吸收的影响

淹水后植物有效硅含量增加

硅缺乏的预防措施

- ▶ 环境输入：在某些地区灌溉水会持续的带入硅，特别是用火山岩地貌下的地下水灌溉。
- ▶ 秸秆管理：从长期来看，可以用秸秆还田来避免硅缺乏的发生，要考虑水稻秸秆（5–6%的硅含量）和稻谷外壳（10%的硅含量）的循环利用。
- ▶ 肥料管理：在磷钾肥不足的情况下避免施用过多的氮肥。

硅缺乏的处理

在退化的水稻土或泥炭土上定期施用含硅酸钙的矿渣，每公顷1–3吨。

施用粒状硅肥可以快速弥补硅的缺乏

- ▶ 硅酸钙：120–200公斤/公顷
- ▶ 硅酸钾：40–60公斤/公顷

2.7 镁的缺乏

镁的功能及其移动性

镁是叶绿素的组成成分同时参与光合作用，镁的移动性较强，可以从老叶转移到幼叶。因此缺素症状通常最先出现在老叶上。

镁的缺素症状及其对生长的影响

在老叶上出现橘黄色脉间黄化病（附录A-10, A-25）。

土壤中镁的丰缺

镁浓度 $<1 \text{ cmol}_c \text{ Mg/kg土}$ ，表明土壤已经极度缺镁。浓度 $>3 \text{ cmol}_c \text{ Mg/kg}$ 对水稻来说一般是充足的。

缺镁的原因

- ▶ 土壤有效镁含量低；
- ▶ 由于交换性钾与镁的比例过高（如： $>1:1$ ）使镁的吸收下降。

镁缺乏的发生

一般灌溉水会带入足够量的镁，所以镁缺乏在大田中并不常见。由于镁被作物不断的带走，

在雨养低地稻和旱地稻田中经常会出现缺镁的症状。

易于发生镁缺乏的土壤

- ▶ 酸性、阳离子代换量低的低地和旱地土壤；
- ▶ 渗漏量和淋洗量较大的粗质砂壤；
- ▶ 盐基含量低的淋溶性的老成酸性硫酸盐土壤。

淹水条件对镁的有效性及其吸收的影响

淹水后土壤溶液中的镁浓度将会增加。

镁缺乏的预防措施

- ▶ 作物管理：施用足够的镁肥、有机肥或其他养分资源来平衡籽粒和秸秆带走的镁；
- ▶ 水分管理：通过整地压实表土来减少粗质土壤的渗漏量；
- ▶ 土壤管理：通过适合的水土保持方法减少旱地体系中水土侵蚀和地表径流造成的损失。

对镁缺乏的处理

镁缺乏应该做如下处理：

- ▶ 施用含镁肥料。施用可溶性镁肥（如：硫酸镁、无水钾镁矾、氯化镁等）可以迅速改善缺镁症状；
- ▶ 喷施含镁的叶面肥（如：氯化镁）；
- ▶ 在酸性旱地土壤上，施用白云石供镁同时提高土壤pH值（缓解铝毒；2.17节）。

2.8 钙的缺乏

钙的功能及其移动性

缺素症状首先在幼叶发生。钙缺乏也会导致根系功能减弱，并使植株易于受到铁的毒害（2.13节）。

供应足够的钙可以增加植株对病害的抵抗能力，如枯叶病、棕斑病。

钙的缺素症状及其对生长的影响

幼叶尖部裂开、卷曲并萎黄坏死（附录A-11，A-27）。

土壤中钙的丰缺

当土壤中交换性钙 $<1 \text{ cmol/kg}$ 或阳离子代换量中钙的饱和度 $<8\%$ 可能出现钙缺乏的现象。阳离子交换量中钙的饱和度应大于 20% ，才适合植株生长，同时可交换性土壤的钙镁比应该为 $3-4:1$ ，土壤溶液中应为 $1:1$ 。

钙缺乏的原因

- ▶ 土壤有效钙含量低（退化、酸化、砂质土壤）；
- ▶ 高pH下，交换性钠钙比过高，导致了钙吸收的下降；
- ▶ 铁钙比或镁钙比过高导致钙的吸收减少；
- ▶ 过量施用氮或钾肥，导致了铵钙比或钾钙比过高，使钙吸收下降；

- ▶ 过量施用磷肥，降低了钙的有效性（在碱性土壤中形成磷酸钙）。

钙缺乏的发生

缺钙在低地水稻土上不常出现，因为土壤中有施肥和灌溉水带来足够的钙。

易于缺钙的土壤

- ▶ 强烈淋溶的、阳离子交换量低的酸性旱地和低地土壤；
- ▶ 由蛇纹岩发育而来的土壤；
- ▶ 高渗漏或淋溶的砂土；
- ▶ 低盐基含量的淋溶、老成酸性硫酸盐土。

淹水条件对钙有效性及其吸收的影响

淹水后土壤溶液钙的浓度会增加。

钙缺乏的预防措施

- ▶ 作物管理：施用有机肥或秸秆（施入或燃烧）平衡从土壤中移出的钙；
- ▶ 肥料管理：用普通过磷酸钙(13–20%Ca)或三料过磷酸钙(9–14%Ca)作为磷源。

对钙缺乏的处理

钙缺乏应做如下处理：

- ▶ 当缺钙严重时施用氯化钙（固体或溶液态）或含钙叶面肥作为快速处理方法；
- ▶ 在缺钙的高pH土壤上施用石膏（如：含钠和高

钾土壤)；

- ▶ 在酸性土壤上施用石灰增加pH值和钙的有效性；
- ▶ 施用钙的同时也要施用镁或钾，因为钙可能导致这些元素的缺乏；
- ▶ 施用黄铁矿可减轻富含 NaHCO_3 的灌溉水对钙吸收的抑制作用。

2.9 铁的缺乏

铁的功能及其移动性

光合作用需要铁。缺铁可能会抑制钾的吸收，由于铁在植物体内的移动性较差，所以幼叶首先出现缺铁黄化症状。

铁的缺素症状及其对生长的影响

新叶出现黄色带状斑纹，并出现萎黄病（附录A-11, A-29）。

土壤铁的缺乏

土壤铁为如下浓度时很可能出现缺铁：

- ▶ $<2 \text{ mg Fe/kg土}$ ：醋酸铵，pH 4.8
- ▶ $<4\text{--}5 \text{ mg Fe/kg土}$ ：DTPA- CaCl_2 ，pH 7.3

铁缺乏的原因

- ▶ 在旱地上可溶性 Fe^{2+} 的浓度过低；
- ▶ 在淹水条件下，土壤还原能力较弱时（如：含有机质较少的土壤）；

- ▶ 淹水条件下高pH值碱性或含钙土壤（如：由于重碳酸盐浓度过高导致铁的溶解度和吸收降低）；
- ▶ 土壤磷铁比过高（如：由于过量施入磷肥形成磷酸铁沉淀）。

铁缺乏的发生

- ▶ 中性、含钙和碱性的旱地土壤；
- ▶ 有机质较少的碱性和含钙的低地土壤；
- ▶ 用碱性水灌溉的低地土壤；
- ▶ 由花岗岩发育成的粗质土壤。

淹水条件对铁的有效性和吸收的影响

淹水后铁的有效性增加， Fe^{3+} 在有机质分解过程中被还原为可溶的 Fe^{2+} ，在淹水土壤中，铁的缺乏经常是由于有机质的分解不充分而不能使 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} 而造成的。

铁缺乏的预防措施

- ▶ 品种：选择含铁较高的品种来增加人体的铁营养。
- ▶ 土壤管理：施用有机物质（如：秸秆，动物粪便）。
- ▶ 肥料管理：在高pH值土壤上用酸性肥料（如：用硫酸铵而不用尿素），施用含铁的肥料。

铁缺乏的处理

铁元素缺乏的纠正是最困难、最昂贵的。在土

壤中施用无机铁对防止铁缺乏效果较差，除非施用量很高。出现铁缺乏时应该作如下处理：

- ▶ 紧邻水稻行条施（约30公斤Fe/公顷）或撒施（施用量较大时可撒施）；
- ▶ 用铁的螯合物或硫酸铁（2–3%的溶液）作为叶面肥。因为植株体内铁的移动性较差，为了持续的为植物生长提供足够的铁营养，每隔两周喷施2–3次（从分蘖期开始）。

2.10 锰的缺乏

锰的功能及其移动性

锰对于光合作用是必需的。锰在转移到地上部之前，在根部累积，部分锰可以从老叶转移到幼叶。

锰的缺素症状和对生长的影响

在幼叶顶部出现脉间萎黄病（附录A-11, A-31）。

土壤锰的缺乏

土壤出现锰缺乏的临界浓度

- ▶ 1 mg Mn/kg土：对苯二甲酸+氯化钙，pH值7.3。
- ▶ 12 mg Mn/kg土：1 N醋酸铵+0.2%对苯二酚，pH值7。

锰缺乏原因

- ▶ 土壤有效锰含量低;
- ▶ 由于土壤中铁浓度过高, 导致锰缺乏;
- ▶ 由于土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 或 NH_4^+ 的浓度过高, 导致锰吸收下降;
- ▶ 在酸性土壤上过量施用石灰;
- ▶ 由于硫化氢的积累导致了锰吸收下降。

锰缺乏的出现

旱地水稻土经常出现锰缺乏, 在淹水条件下锰的溶解性提高, 所以在低地或雨养水稻土上不易出现缺锰。

易于缺锰的土壤

- ▶ 酸性旱地土壤 (老成土、氧化土);
- ▶ 有机质含量低并且还原态锰含量小的碱性或含钙土壤;
- ▶ 含有大量活性铁的退化水稻土;
- ▶ 含锰较少的易淋溶的砂质土壤;
- ▶ 盐基含量低的淋溶性老成酸性硫酸盐土;
- ▶ 碱性和含钙的有机土壤 (有机土);
- ▶ 总锰含量低的高度风化土壤。

淹水条件对锰的有效性及其吸收的影响

淹水后 Mn^{4+} 被还原为植物可利用的 Mn^{2+} , 锰的有效性提高。

锰缺乏的预防性措施

- ▶ 栽培管理：施用有机肥或秸秆（混入土壤或燃烧）。
- ▶ 肥料管理：使用酸性肥料，如用硫酸铵而不用尿素。

对锰缺乏的处理

缺锰很容易处理，可以通过施用含锰叶面肥或在施用酸性肥料之后条施锰肥。缺锰应该作如下处理：

- ▶ 在水稻栽培行旁边条施硫酸锰或小颗粒的氧化锰（5–20公斤Mn/公顷）。
- ▶ 施用硫酸锰作为叶面肥来快速处理锰缺乏（1–5公斤Mn溶入200升水/公顷）。
- ▶ 使用螯合物质效果较差，因为铜铁可取代锰。

2.11 铜的缺乏

铜的功能及其移动性

铜在下列反应中起主导作用：

- ▶ 氮、蛋白质和激素代谢；
- ▶ 光合作用和呼吸作用；
- ▶ 花粉的形成和授精。

铜的移动性对水稻而言部分依赖于叶片中氮营养状况；在缺氮植株中铜一般很少发生再转移，幼叶更易出现缺铜症状。

铜的缺乏症状和对生长的影响

出现黄色条纹，叶片蓝绿色，叶尖发黄（附录 A-11, A-33）。

土壤铜的丰缺

出现铜缺乏的土壤临界值：

- ▶ 0.1 mg Cu /kg, 0.05 N 盐酸；
- ▶ 0.2–0.3 mg Cu/kg, DTPA+CaCl₂, pH 7.3。

缺铜的原因

- ▶ 土壤中有效铜含量较少；
- ▶ 胡敏酸和富啡酸对铜的吸附较强（泥炭土）；
- ▶ 母质中含铜较少（由石英发育的砂质土壤）；
- ▶ 氮磷钾肥施用过多，植物生长迅速，加速了土壤溶液中铜的耗竭；
- ▶ 酸性土壤上过量施用石灰；
- ▶ 土壤中锌过多，抑制了铜的吸收。

缺铜症状的发生

- ▶ 土壤中有机质含量过高（有机土、有机火山灰土、泥炭土）；
- ▶ 红壤及高度风化土壤（老成土、氧化土）；
- ▶ 由海水沉积物发育的土壤（石灰石）；
- ▶ 砂质土壤，钙化土壤。

淹水对土壤铜有效性及其吸收的影响

在淹水条件下，铜的有效性会下降。

铜缺乏的预防性措施

- ▶ 作物管理：在移栽前一小时用1%CuSO₄的悬浊液沾根；
- ▶ 土壤管理：避免在酸性土上过量施用石灰，因为这样做会降低铜的吸收；
- ▶ 肥料管理：在铜缺乏的土壤上，为了长期保持土壤中铜的含量施用氧化铜或硫酸铜（每隔5年施入或拌入土壤5–10公斤Cu/公顷）。

对铜缺乏的处理

- ▶ 对于快速处理铜缺乏的症状，可施用硫酸铜（每公顷施用1–5公斤Cu，固态或液态）。若进行土壤施用，将细的硫酸铜原料撒施（条施）或作为基肥混施入土壤；
- ▶ 可以在分蘖期到抽穗期之间施用铜的叶面肥，但是这有可能导致叶片生长组织烧伤；
- ▶ 由于铜缺乏和铜毒害的浓度范围较窄，所以要注意不要过量施用铜肥。

2.12 硼的缺乏

硼的功能及其移动性

硼是细胞壁的重要组成成分，硼缺乏降低了授粉能力。

由于硼不能转移到新组织中，所以缺硼症状首先出现在幼叶上。

硼缺乏和对生长的影响

幼叶变白，叶尖部卷曲（附录A-11）。

土壤硼的丰缺

缺硼症状的土壤临界值是0.5 mg B/kg（用热水进行浸提）。

硼缺乏的原因

- ▶ 土壤中有效硼的含量较少；
- ▶ 有机物质，粘土矿物和倍半氧化物对硼的吸附；
- ▶ 由于干旱使硼的移动性降低；
- ▶ 过量施用石灰。

硼缺乏的发生

- ▶ 高度风化的土壤以及酸性红壤和砂质水稻土；
- ▶ 由火成岩发育的酸性土；
- ▶ 含有机质高的土壤。

淹水对硼的有效性及其吸收的影响

当 $\text{pH} < 6$ 时，硼主要以未解离的硼酸形式 $\text{B}(\text{OH})_3$ 存在，作物主要依靠质流吸收。当 $\text{pH} > 6$ 时， $\text{B}(\text{OH})_3$ 解离增加，水化形成 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ ，植物可主动调节硼吸收。随着 pH 值的增加，有机质、倍半氧化物、粘土矿物对硼的吸附增加。因此，在淹水后，硼在酸性土壤上的有效性下降而在碱性土壤上有效性提高。

对硼缺乏的预防性措施

- ▶ 水分管理：避免过量淋失，因为硼在淹水水稻土中的移动性很强；
- ▶ 肥料管理：在缺硼的土壤每隔2–3年，施用缓效硼肥（如：硬硼酸钙石）。

对硼缺乏的处理

- ▶ 施用可溶态的硼肥（硼砂，每公顷0.5–3公斤B）能迅速解决硼缺乏症状，在移栽前混施、表施、撒施或在水稻营养生长期作为叶面肥施用；
- ▶ 硼砂和硼酸类肥料不要和铵肥混合，因为这会导致氨挥发。

2.13 铁的毒害

铁毒害的产生机理

铁毒害的发生主要是由于土壤溶液中铁浓度的增加导致对铁的过量吸收而引起的。刚刚移栽的秧苗可能受到毒害，主要是在淹水后大量的 Fe^{2+} 迅速累积。在生长后期，由于根系较高的渗透率和微生物铁在根际中还原，导致了 Fe^{2+} 的过量吸收，影响了植株的生长。铁的过量吸收导致叶片呈现青铜色。植物体内大量的铁会对植物产生毒害，铁的毒害与多种营养胁迫有关，最后使根系的氧化能力下降。根表出现黑色的硫化铁斑点（过度还原条件和铁毒症状）。

铁毒的症状及其对生长的影响

在下部叶片的尖部开始出现棕色斑点或整个叶片的颜色从桔黄色渐变成棕色。根表出现黑斑（附录A-37）。

植株中铁的丰缺

铁中毒的植株，体内铁的浓度一般（但不总是）很高(300–2,000 mg Fe/kg)，但是铁的临界浓度要根据植株年龄和营养状况而定。由于营养不均衡，一般在低肥力土壤上临界值都很低。

淹水条件对铁毒害的影响

在大多数土壤上， Fe^{2+} 的浓度一般在淹水后2–4周达到高峰。土壤中铁浓度过高会抑制钾和磷的吸收。在强还原条件下，产生硫化氢和硫化亚铁，导致根系氧化能力减弱。水稻根系泌氧使 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ，使根际酸化并且形成铁膜。

引起铁毒的原因

- ▶ 由于土壤的强还原条件和/或低pH值，使土壤溶液中 Fe^{2+} 浓度过高；
- ▶ 较差的或不平衡的植物营养状况。由于磷、钙、镁、钾缺乏导致对根系的氧化能力或二价铁的排除能力下降；
- ▶ 由于根际有机酸、硫化氢或硫化亚铁的积累抑制呼吸作用，导致根系对 Fe^{2+} 的排除能力下降

(2.14节)；

- ▶ 施用大量未腐解的有机残渣；
- ▶ 山上流下的水或地下水不断供应的铁离子；
- ▶ 用含有大量铁的城镇或工业污水灌溉。

铁毒害的发生

铁毒害在多种土壤上都会发生，但是经常发生在连续淹水的低地水稻土上。通常发生铁毒的地点总是排水不畅，阳离子代换量低，大量元素缺乏，铁毒害发生的pH范围较宽（从 pH 4–7）。易于出现铁毒害的土壤有如下的特点：

- ▶ 旱地酸性土壤上的物质流入内陆排水不良的河谷地土壤（潮新成土、潮始成土、潮老成土）；
- ▶ 阳离子代换量和有效磷、钾含量低的高岭土；
- ▶ 冲积的、塌积的酸性粘土；
- ▶ 新形成的酸性硫酸盐土壤；
- ▶ 酸性低地或泥炭土高地土壤。

预防铁毒害的管理措施

- ▶ 品种：选用抗铁毒的品种（如：IR8192-200, IR9764-45, Kuantik Putih, Mahsuri）。
- ▶ 籽粒处理：在温带直播地区，采用氧化剂进行种子包衣（如：占种子重量50–100%的过氧化氢钙），并通过增加氧气供应来提高发芽率。
- ▶ 栽培管理：推迟播种躲过土壤 Fe^{2+} 浓度的高峰（如：不要在淹水后10–20天后播种）。

- ▶ **水分管理**: 间歇灌水, 避免对铁含量和有机质含量较高并且排水不良的土壤连续淹水。
- ▶ **肥料管理**: 平衡施肥 (氮磷钾肥或氮磷钾肥+石灰) 避免养分胁迫。在酸性土壤上施用石灰。在含铁和有机质较高或排水不良的土壤上不要施用过量的有机物质 (有机肥、秸秆)。
- ▶ **土壤管理**: 在收获后对耕地进行排水, 可以在休闲期使土壤中的铁氧化。

对铁毒害的处理方法

在栽培期处理铁毒害是非常困难的, 所以预防性措施非常重要。对铁毒的处理方法建议如下:

- ▶ 多施用钾、磷和镁肥;
- ▶ 在酸性土上将石灰与表土混合以提高土壤pH;
- ▶ 每公顷将100–200 kg MnO_2 混入表土以减少 Fe^{3+} 的还原;
- ▶ 在作物生长季的中期进行排水, 防止土壤中 Fe^{2+} 的累积。在分蘖中期(25–30 DAT/DAS)进行7–10天的排水为分蘖期提供氧气但要保持土壤湿润。

2.14 硫的毒害

硫毒害的产生机理

土壤中硫化氢浓度过高抑制了根系的呼吸作用进而减少了对营养元素的吸收。吸收过量硫化

氢会对植物的代谢产生很严重的负面影响。

水稻根系可分泌氧气氧化根际的硫化氢。硫化氢毒害的程度依赖于根系氧化能力、土壤溶液中硫化氢的浓度和根系的健康状况。幼嫩的水稻根系在根际氧化条件形成之前特别易于受到硫化物的毒害。严重的硫化氢毒害会造成作物的生理紊乱，如日本发生的秋衰病和美国发生的青枯病。

硫毒害症状及其对生长的影响

正在展开的叶片出现脉间失绿症状。根系粗糙、稀少、变黑（附录A-39）。

硫毒害造成的叶片症状与缺铁造成的叶片黄化现象比较相似（2.9节）。其它的诊断标准也和铁毒害类似（但是铁毒害在叶片上具有不同的症状，2.13节）。

- ▶ 根系粗糙、稀疏、颜色为暗棕色到黑色。新挖出的受毒害的根系通常发育不良，出现大量的黑根（硫化铁斑点）。而健康的根系被一层均匀光滑、棕色的氢氧化物和铁膜所包被。
- ▶ 植物组织中钾、镁、钙、锰和硅的浓度较低。

硫毒害出现的一般范围和临界值

硫毒害的出现没有固定的临界值。硫毒害取决于土壤溶液中的硫浓度，一般与根系的氧化能力有关。当土壤溶液中硫化氢 H_2S > 0.07 毫克/升时就会出现硫化氢毒害症状。

淹水条件对硫毒害的影响

在淹水土壤上硫酸盐还原成硫化物对于水稻栽培而言意味着以下3点:

- ▶ 单质硫缺乏;
- ▶ 铁、锌、铜变为固定态;
- ▶ 在含铁较少的土壤中易发生硫化氢毒害。

在淹水土壤上, 硫酸盐在低氧化还原电位(< -50 mV, $\text{pH} = 7$)被还原为硫化氢, 然后形成难溶性硫化物如 FeS 。

硫化铁对水稻没有毒害, 但是他们降低了养分的吸收(2.13节)。

硫化物毒害的产生原因

- ▶ 土壤溶液中硫化氢的浓度过高(由于强烈的还原条件和 FeS 沉淀量少);
- ▶ 作物的营养状况不良或养分不平衡, 导致根系氧化能力下降(特别是缺钾的土壤, 而且磷、钙、镁的缺乏也同样会造成不良的影响);
- ▶ 在排水不畅、还原性强的土壤上过量施用含硫酸盐肥料或用城镇和工业污水进行灌溉。

易于受硫化氢毒害的土壤

- ▶ 排水良好的砂质土壤, 有效铁含量低;
- ▶ 退化的水稻土, 有效铁含量低;
- ▶ 排水不畅的有机土壤;
- ▶ 酸性硫酸盐土壤。

易于受到硫化物毒害和铁毒害的土壤具有以下相似特征，即：含有大量的有效铁、CEC低以及交换盐基浓度低。

对硫化物毒害的预防性措施

- ▶ 品种：种植耐硫化物品种，一般根系分泌氧气能力较强。
- ▶ 种子处理：在温带地区，用氧化物作种衣（如：过氧化钙）来提高作物出苗时的氧气供应。
- ▶ 水管理：避免对硫含量高、有机质含量高且排水不畅的土壤连续淹水，要进行间歇灌溉。
- ▶ 肥料管理：平衡施肥（NPK或NPK+石灰）避免养分胁迫，增加根系氧化能力。施用充足的钾肥（2.3节）。避免在含铁高、有机质含量高且排水不畅的土壤上施用过量的有机物质（有机肥、秸秆）。
- ▶ 土壤管理：在收获后对耕地进行排水干田耕作，提高休闲期硫和铁的氧化。

硫毒害的处理方法

- ▶ 使用钾、磷和镁肥；
- ▶ 在低铁土壤上施用铁肥（盐或氧化物），使 H_2S 沉淀为固定态的 FeS ；
- ▶ 在作物生长季的中期进行排水，减少 H_2S 和 Fe^{2+} 的积累量。在分蘖前期（移栽后或播种后25–30天）排水7–10天来增加分蘖期氧气供应量，但要保持土壤湿润。

2.15 硼的毒害

硼毒害的产生机理

当土壤溶液中硼含量高，硼就会随着水分的蒸腾作用进入植株内部，导致硼在叶片边缘和叶尖积累。过量的硼阻碍了糖向淀粉的转化或形成硼-碳水化合物复合体，阻碍了籽粒的灌浆，但可维持正常的营养生长。

硼毒的症状及其对生长的影响

叶尖棕色，叶片出现椭圆型黑棕色斑点（附录 A-41）

植物

- ▶ 在叶片中硼的浓度梯度差异很大，叶片基部浓度较低而叶尖浓度较高；
- ▶ 在大田中种植的水稻的硼毒害临界值要比温室中的低，因为受降雨影响硼会从叶片上淋洗掉；
- ▶ 对不同水稻品种产量的影响差异很大。

土壤

土壤中产生硼毒害的临界值：

- ▶ $>4 \text{ mg B/kg}$: 0.05 N HCl
- ▶ $>5 \text{ mg B/kg}$: 热水浸提可溶性硼
- ▶ $>2.5 \text{ mg B/L}$: 土壤溶液

灌溉水

硼的浓度 $>2 \text{ mg B/L}$ 可能引起硼毒害

淹水条件对硼毒害的影响

- ▶ 酸性土壤淹水会降低硼的有效性；
- ▶ 碱性土壤淹水会增加硼的有效性。

硼毒产生的原因

- ▶ 由于用含硼较多的地下水灌溉并且温度较高，使土壤溶液中的硼浓度增加；
- ▶ 由于母质中含硼较多，导致土壤溶液中硼含量较高。在以海洋沉积物、火成岩和其他以火山岩为母质的土壤中，一般硼含量较高；
- ▶ 过量施用硼砂或城市废弃物。

硼毒害的发生

硼毒害一般出现在干旱或半干旱地区，但在其它地区的稻田中也可能会发生。

易于受硼毒害的土壤

- ▶ 在以火山岩为母质的土壤，通常与富含硼的深井地下水灌溉有关；
- ▶ 一些滨海盐土。

对硼毒害的预防性措施

- ▶ 品种：选用耐硼品种（如：IR42, IR46, IR48, IR54, IR9884-54）；
- ▶ 水分管理：用含硼较低的地表水灌溉。如果用地下水灌溉必须要进行监测。如果硼含量太高，用未被硼污染的水进行稀释；
- ▶ 土壤管理：当土壤干燥时进行翻耕，以使硼积

累在表土，然后用含硼少的水进行淋洗。

硼毒害的处理

在土壤的渗透性较好并且有适宜且充足水源的情况下，可以用低硼含量的灌溉水进行淋洗。

2.16 锰的毒害

锰毒的产生机制

在土壤pH较低或者淹水后土壤的氧化还原势较低的情况下，土壤溶液中锰的含量会升高。在根系缺乏排除或忍受机制时，土壤溶液中存在过量的锰会导致锰的大量吸收。锰在植物组织中的大量积累会改变代谢过程（如：酶活性和有机组成），出现锰毒症状如萎黄病或黑斑症。

锰毒的症状及其对生长的影响

叶脉间有淡黄褐色斑点，并会一直扩展到整个脉间区域。（附录A-43）

淹水条件对锰毒害的影响

在稻季淹水会对锰毒产生影响

- ▶ 由于氧化还原势的降低使锰的溶解度上升；
- ▶ 由于氧气的缺乏，在根系所进行的氧化反应大大减少。

锰毒的产生原因

锰毒可能由以下原因产生：

- ▶ 由于土壤较低的pH(<5.5)或者较低的氧化还原电势，而使土壤溶液中二价锰离子浓度较高；
- ▶ 不良和不平衡的营养状况；
- ▶ 根氧化作用和二价铁离子的排除能力较低，其原因为：
 - ▶▶ 硅、钾、磷、钙或镁的缺乏
 - ▶▶ 产生了抑制植物呼吸作用的物质（如：有机酸、硫化氢、硫化亚铁）（见2.14）
- ▶ 施用含有大量锰的居民或工业废弃物。

锰毒的发生

锰毒极少发生在低地稻田，除非溶液中含有大量的锰。锰毒并不常见，这是因为水稻对锰浓度有相对较高的忍耐力。水稻的根系可以排除锰，并且水稻内部组织对高浓度锰也有较强的耐性。锰毒可能发生的土壤：

- ▶ 在旱地酸性土壤(pH <5.5)锰毒通常伴随铝毒发生(2.17)；低地土壤往往含有大量易还原的锰，以及酸性硫酸盐类土壤；
- ▶ 受锰矿影响的地区（如：日本）。

预防锰毒发生的方法

- ▶ 种子处理：在温带气候下，使用氧化剂种衣（例如钙的过氧化物）以及提高氧气的供应来提高发芽率以及秧苗的萌发；
- ▶ 水分管理：地表排水会使锰的吸收量提高；
- ▶ 肥料管理：平衡肥料的施用（氮磷钾或氮磷钾

+ 石灰)，避免养分胁迫引起的锰毒。在酸性土壤上施用石灰以降低活性锰的浓度。在锰浓度以及有机物含量都很高的土壤以及排水不良的土壤上不要过量施用有机物质（有机肥、秸秆）；

- ▶ 秸秆管理：秸秆和草木灰还田可补充从土地中移走的硅和钾。供应足够的硅可以阻止锰的毒害，不仅可以降低作物对锰的吸收（提高根的氧化作用），而且可以提高植株内部对过量锰的忍耐。

锰毒的处理

- ▶ 在旱地土壤上使用石灰来降低土壤酸度；
- ▶ 施用硅渣（1.5–3吨/公顷）来缓和硅的缺乏(2.6)。

2.17 铝的毒害

铝毒的产生机制

铝毒的主要特征是阻止根系的生长。植物长期处于铝毒下会诱导养分（镁、钙、磷）缺乏以及干旱胁迫，从而抑制地上部的生长。

铝毒的症状及其对生长的影响

叶片出现脉间萎黄病，呈橘黄色。根系生长较差，植株矮小。（附录A-45）

土壤

在铝饱和度 $>30\%$ ，土壤pH (H_2O) <5.0 ，土壤溶液中铝浓度大于 $1\text{--}2\text{ mg Al/L}$ 的条件下会有潜在的铝毒发生。

淹水条件对铝毒的影响

在旱地有氧条件下以及酸性土壤条件下铝毒是一个主要的限制因素。在淹水时，土壤中铝浓度是随土壤pH值上升而下降的，一般可以降低到铝毒产生的临界值以下。在这种条件下，铁毒(2.13)发生的可能性要高于铝毒。

铝毒的产生原因

土壤pH <5 时会引起土壤溶液中形成过量的三价铝离子。土壤溶液中的铝浓度取决于土壤pH以及能与铝形成复合体的有机和无机化合物的数量。

铝毒的发生

铝毒极少发生在低地稻田，除非在淹水后一些土壤还原性进程缓慢的土壤上。铝毒会发生在以下土壤上：

- ▶ 有大量可交换性铝的酸性、旱地土壤（老成土、氧化土）上。铝毒经常伴随着锰毒的发生(2.16)；
- ▶ 酸性硫酸盐土壤，特别是旱作水稻在淹水前的几周；

- ▶ 在铁毒症状出现之前 $\text{pH} < 4$ 的淹水土壤。

预防铝毒发生的方法

- ▶ 品种：种植耐铝品种，如IR43, CO37, Basmati370（印度）、Agulha Arroz, Vermelho, IAC3（巴西）、IRAT109（科特迪瓦）、Dinorado（菲律宾）；
- ▶ 作物管理：延迟播种时间直到淹水后土壤 pH 上升到足够高（以固定铝）；
- ▶ 水分管理：为作物提供足够的水以保持土壤的还原条件，阻止表层土壤干旱；
- ▶ 肥料管理：在有铝毒发生的酸性旱地土壤，应特别注意镁肥的施用（2.7节）。施用碳酸钙并不一定很有效，施用白云石代替碳酸钙，不仅可以提高土壤 pH ，而且还可以给土壤补充镁。少量的硫酸镁石和无水钾镁矾（50公斤/公顷）所产生的效果可能与施用1000公斤以上的碳酸钙的效果相当。

铝毒的处理

- ▶ 每公顷施用1–3吨石灰来提高土壤 pH ；
- ▶ 通过表施石灰将钙淋洗到底土来改善底土的酸性，以此促进犁底层以下根系的生长；
- ▶ 在干旱酸性土壤上，建立土壤侵蚀存水弯，并混合施用1吨/公顷的活性磷矿石来改善磷缺乏的状况（2.2节）。

2.18 盐害

盐害的产生机制

盐害是指土壤中存在过量的可溶性盐，钠、钙、镁、氯化物和硫酸盐是盐害产生的主要离子，盐害对水稻生长的主要影响如下：

- ▶ 渗透性（水分胁迫）；
- ▶ 过量钠和氯等有毒离子的吸收；
- ▶ 拮抗效应减少养分的吸收（钾、钙）。

水稻在发芽期对盐害忍耐力较强，而生长早期（1-2叶期）对盐度非常敏感，到分蘖期和拔节期抗性较强，但到开花期又会对盐度很敏感。

盐害的症状及其对生长的影响

叶尖变白植株矮小，田间植株参差不齐（附录A-47）。

对水稻生长进一步的影响如下：

- ▶ 发芽率的降低；
- ▶ 株高和分蘖降低
- ▶ 根系生长较差；
- ▶ 不孕穗增多。

土壤

由于水稻生长在淹水土壤，因而需要测量土壤溶液的电导(EC)或饱和提取液的电导(EC_e)。对

于旱稻种植于达到或低于田间持水量的田块上时,土壤溶液的电导是饱和溶液的两倍。由于盐害引起减产的估计值为:

- ▶ $EC_e < 2 \text{ dS/m}$: 最优, 无减产发生
- ▶ $EC_e > 4 \text{ dS/m}$: 小幅度的减产(10–15%)
- ▶ $EC_e > 6 \text{ dS/m}$: 生长和产量中等程度降低(20–25%)
- ▶ $EC_e > 10 \text{ dS/m}$: 对于敏感品种可造成>50%的减产

可交换性钠的百分率(ESP):

- ▶ $ESP < 20\%$: 无显著减产情况发生
- ▶ $ESP > 20\text{--}40\%$: 小幅度减产(10%)
- ▶ $ESP > 80\%$: 50%的减产

钠吸附比(SAR):

- ▶ $SAR > 15$: 碱土(在饱和提取液中作为阳离子来测量)

灌溉水水质的分类标准

- ▶ $pH \text{ } 6.5\text{--}8$, $EC < 0.5 \text{ dS/m}$: 高质量
- ▶ $pH \text{ } 8\text{--}8.4$, $EC \text{ } 0.5\text{--}2 \text{ dS/m}$: 中等偏低
- ▶ $pH > 8.4$, $EC > 2 \text{ dS/m}$: 不适宜灌溉
- ▶ $SAR < 15$: 高质量, 钠含量低
- ▶ $SAR \text{ } 15\text{--}25$: 质量中等偏低, 钠含量高
- ▶ $SAR > 25$: 不适宜灌溉, 钠含量过高

淹水条件对盐害的影响

盐害的潜在影响主要有两个方面:

- ▶ 盐类的溶解度增加以及铁锰从微溶向可溶态的还原作用使得离子电导增加;
- ▶ 由于灌溉造成土壤的持续渗漏。如果灌溉水中的离子交换量高于土壤溶液, 那么土壤溶液中的盐浓度则会上升。

盐害的产生原因

高含量的可溶性盐(氯化钠)所引起的离子毒害、离子的不平衡以及对水平衡的破坏是植物在盐土上生长的主要影响因素。在碱土上, 植物的生长主要受高pH和高的 HCO_3^- 浓度的影响。

盐害、碱害引起的主要原因如下:

- ▶ 年际降水少并且灌溉方式不正确, 灌溉不充分;
- ▶ 高蒸发量;
- ▶ 地下水的含盐量上升;
- ▶ 沿海地区海水入侵、倒灌。

盐害的发生

受盐分影响的土壤可以分为以下几类:

- ▶ 盐土($\text{EC} > 4 \text{ dS/m}$, $\text{ESP} < 15\%$, $\text{pH} < 8.5$);
- ▶ 盐碱土($\text{EC} 4 \text{ dS/m}$, $\text{ESP} > 15\%$, pH 在8.5左右);

- ▶ **碱土**($EC < 4 \text{ dS/m}$, $ESP > 15\%$, $pH > 8.5$, $SAR > 15$)。

受盐分影响的土壤包括:

- ▶ **滨海盐土**（在很多国家沿海岸广泛分布）；
- ▶ **酸性硫酸盐类土壤**（例如：湄公河三角洲、越南）；
- ▶ **中性到碱性盐土、盐碱土和碱性内陆土壤**（例如：印度、巴基斯坦、孟加拉国）；
- ▶ **酸性砂质盐土**（泰国东北部Korat地区）。

预防盐害发生的方法

盐碱害的管理方法必须采取综合措施。主要可选择的措施如下:

- ▶ **作物体系**: 在水稻旱作种植体系, 如果水分较充足以及气候条件允许, 可以改为双季稻体系。土壤盐分淋失后, 在接下来的几年内作物种植模式应包括水稻和其他耐盐作物（例如: 豆科的三叶草和田菁属的作物）。
- ▶ **品种**: 种植耐盐品种（例如: Pobbeli, 印度尼西亚; IR2151, 越南; AC69-1, 斯里兰卡; IR6, 巴基斯坦; CSR10, 印度; Bicol, 菲律宾）。
- ▶ **水分管理**: 在种植水稻前将田块浸水2–4周。不能使用碱性灌溉水或者碱性-非碱性的交替水源。播种后进行间歇性的土壤淋溶以便移走过多的盐分。收集储存雨水以便在旱季进行灌溉

(建水库)。在沿海地区，应注意防止盐水的倒灌与侵入。

- ▶ **肥料管理**：施用5–10公斤Zn/公顷来缓解锌的缺乏（见2.4）。施用充足的氮磷钾肥。钾的补充是十分重要的（见2.3），因为可以提高植物的钾钠比、钾镁比、钾钙比。在作物生长的养分临界期，使用硫酸铵作为氮源，并进行氮肥的表施（见2.1）（在盐碱土上土壤氮的有效性很低）。在碱土上，钙取代钠会降低磷的有效性（施用石膏肥料），并导致对磷肥需求量的升高。
- ▶ **有机物质的管理**：施用有机物可通过提高二氧化碳分压以及降低pH促进盐碱土的改良。施用秸秆来促进钾的循环利用，还要注意农家肥的施用。

盐害的处理

盐害的处理措施：

- ▶ **盐土**：土壤盐度可以通过不含盐分的灌溉水淋洗来降低。由于水稻根系较浅，只有表土（0–20厘米）需要淋洗。成本消耗、适宜水源的可利用性、土壤的物理结构和排水性能决定着对盐分淋洗的可行性。为了降低受影响土壤的盐度，灌溉水的电导率应小于0.5 dS/m。使用高质量（EC约为0）的表层水，灌溉的水量需要把给定的 EC_e 降低到临界水平即 EC_c ，水的需求量的计算式如下：

$$A_{iw} = A_{sat} [(EC_e / EC_c) + 1]$$

A_{iw} 代表灌溉水量（厘米）

A_{sat} 代表土壤饱和水量（厘米）

例如：为了把粘砂质($A_{sat} = 8-9$ 厘米)表土20厘米的起始 EC_c 从16 dS/m降低到4 dS/m，需要40厘米的新鲜水。粘土则需要把盐分从亚表层排水淋洗出来。

- ▶ 碱土：施用石膏（硫酸钙）来降低土壤钠的浓度。

在分蘖末期和孕穗初期对叶面喷施钾肥，特别是在盐碱土上种植低忍耐性的品种时更应如此。