

土壤中铝的胁迫与水稻生长

王建林

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

根盒微观试验表明,土壤植稻后,根际活性铝与土体有明显差异,而差异的大小与土壤熟化度有关;土壤中活性铝的分布随距根面的远近而出现空间变异,从而导致水稻吸收养分和生长上的差异。盆栽试验所得结果与根盒试验结果相一致。溶液培养则揭示了铝胁迫下水稻响应的可能生理机制。

在很多酸性土壤中,铝毒是限制植物生长的重要因素之一;另外,工业发展和新城市的兴起,导致酸雨危害日甚,促使一些土壤中活性铝增加,从而导致植物根系生长不良,吸收受阻,生长滞缓^[1,2]。60年代以来,国外对铝胁迫下植物耐铝和铝毒机制的研究已得到广泛重视^[2,3],并寻求从基因工程上筛选和培育耐铝品种^[1]。70年代起,对植物根—土界面相互作用的研究已取得很大的进展^[4],但有关铝在根际中的存在状况、化学行为及对植物养分吸收和生长的影响迄今未见报道^[3,5]。本文用根盒试验和盆栽试验相结合的方法,初步研究了不同土壤植稻后根际中活性铝的状况及对水稻吸收养分和生长的影响,并以溶液培养的方法初步探讨了铝胁迫下水稻响应的可能机制。

一、材料和方法

(一)供试土壤和作物

以第四纪红土发育的熟化红壤性水稻土(QP);太湖湖积物发育的淀浆白土(WP);新垦第四纪红土(QR)及发育于花岗岩的赤红壤新土(LR)为供试土壤,其基本性质列于表1。供试作物为水稻(*Oryza sativa* L.),品种为盐粳2号。

(二)试验方法

1. 用自制根盒制备各土壤的根际土及离根面1,2,3,4,5,10,20和30mm的非根际土,并设盆栽试验,以观察活性铝量不同的土壤中水稻的养分吸收及生长情况^[6]。

表 1 供试土壤的基本性质

土壤和代号	地 点	pH	有机质	全氮 g·kg ⁻¹	游离Fe ₂ O ₃	活性组分(mg/100g土)		
						Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO
红壤性水稻土(QP)	浙江金华	6.13	19.6	1.62	14.9	79.4	310	10.9
淀浆白土(WP)	浙江长兴	6.17	14.9	1.12	10.6	70.9	312	5.29
第四系红土(QR)	江西刘家	5.04	3.57	0.27	44.2	367	141	1.22
赤红壤(LR)	广州石牌	5.26	5.42	0.43	52.2	224	84.7	0.55

* 本文系蒙刘正宇教授指导并大为修正,谨致谢意。

2. 以酸性草酸-草酸铵缓冲溶液一次提取各土壤的活性铝^[7], 以试铁灵比色法测定。

3. 根盒及盆栽试验中的水稻根和茎叶分别洗净, 烘干称重。样品磨细后, 60℃烘干, 用三酸消化^[7], 直流等离子体光谱法测定磷和铝的含量。

(三) 溶液培养试验

以Espino营养液(pH4.5左右)培养水稻, 设对照、加铝10和30mg·kg⁻¹ 3个处理, 铝以硫酸钾铝供给, 并以硫酸钾校正加入的钾, 各处理重复3次。生长约4周后, 以DMP-2型pH计测定已更换1天后的水稻培养液的pH值。生长约5周后, 观察根系生长情况, 从每个重复中取出10个根尖(0—1.5cm), 加水10ml, 在30℃下放置24小时(重复3次); 另取10个根尖, 加水10ml, 煮沸3分钟, 再在30℃放置24小时, 以DDS-11A型电导仪测定各处理根尖的电导率, 并以30℃与100℃时的电导率之比定义为电导率常数, 该值越大, 则根尖细胞膜的透性越大。

二、结果与讨论

(一) 根际中活性铝的状况

若以离根面20—30mm处的土壤为非根际土, 则根际土与非根际土中活性铝的差异见表2。由表可见, 熟化水稻土的根际土中活性铝量稍低于非根际土或差异不明显。而新垦红壤中则相反, 在根际中有富集的趋势。表明红壤植稻后, 因根系生理活动和根表面物理化学过程的影响, 根周围土壤中铝被活化, 且超过水稻正常生长的需要, 因此在根际中出现累积。这也可能是新垦红壤上作物易出现生理病害的重要原因之一^[5,8]。而熟化水稻土因可活化的铝含量较低, 当水稻正常生长吸收了一部分铝以后, 在根际中稍有亏缺。但无论是根际土还是非根际土, 各土壤中活性铝含量依次为: 第四纪红土>赤红壤>熟化红壤性水稻土>淀浆白土, 这与各土壤的母质及发育过程有关。

离根面不同距离的土壤中活性铝的分布(图1)表明, 活性铝的分布与土壤熟化度有明显关系, 在各种土壤中出现空间分异。在两种熟化水稻土中, 随着离根面距离增加, 土壤中活性铝呈现近似“M”型分布, 而在新垦红壤中则相反, 呈现类似“W”型分布。如上所述, 这也与根表面的化学过程及根系生理活动有关。离根面近, 新垦红壤中活性铝因被活化而增多, 而熟化水稻土中则因吸收而稍有亏缺。

(二) 土壤中铝胁迫对水稻养分吸收和生长的影响

植物对无素的吸收及其生长, 受到根—土界面上有效养分含量和营养元素相互作用等因素的影响^[4,6]。因而根—土界面上铝分布的差异, 导致水稻对养分吸收和生长的不同(表3)。

表2 根际中活性铝的状况

土壤代号	活性铝(Al ₂ O ₃ ·g·kg ⁻¹)	
	非根际土	根际土
QP	3.44	3.26
WP	2.73	2.72
QR	6.17	6.39
LR	4.33	5.52

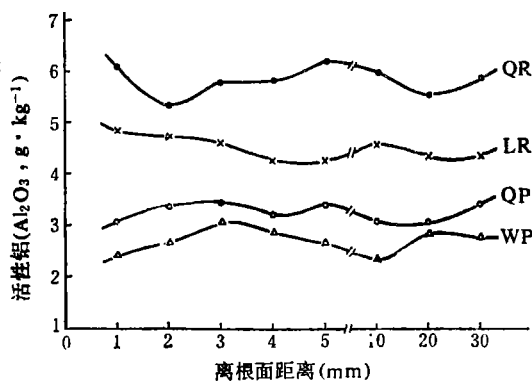


图1 距根面远近对土壤中活性铝分布的影响

从表中根盒试验结果可见，水稻的生长以熟化水稻土均优于新垦红壤，其根生长量表现为：熟化红壤性水稻土>淀浆白土>赤红壤>第四纪红土；而茎叶生长量除第四纪红土略大于赤红壤外，其余与根生长量顺序相同；总干物重则两种新垦红壤几乎相等，而两种熟化水稻土较大，其中又以熟化红壤性水稻土大于淀浆白土。

水稻根部对元素的吸收在两类土壤上也出现分异。因新垦红壤根际中铝富集，所以稻根中的铝吸收量远高于熟化水稻土，约为后者的3—4倍(表3)。前者吸收的磷量较低，看来主要是新垦红壤中根周围的铝富集起到阻碍磷进入根系的作用，其机理可能通过根表面上磷与铝发生共沉淀或磷被铝吸附等物理化学过程将磷固定^[9]，或因根际沉淀的铝阻塞了磷的吸收位^[4]，或是根周围铝通过对根系的直接作用而使水稻对磷吸收和生长受阻^[2]。各土壤上稻根中元素含量次序为：

$$P: WP \geq QP > QR > LR,$$

$$Al: QP < WP < QR < LR.$$

茎叶中两元素的吸收与根类似，但是茎叶中磷的吸收量在新垦红壤和熟化水稻土中的差异特别显著(表3)，即红壤上生长的稻株，地上部与根吸收的磷之比值较熟化水稻土为低，表明根中吸收的过量铝束缚了一部分进入根中的磷，使其活动性下降，因而难以向上运转进而影响地上部的生长。茎叶中的铝吸收量在两类土壤上差异也很显著，新垦红壤上稻株含铝量约为熟化水稻土上植株的3—4倍，但若以根中含铝量与茎叶中含量相比较，则4种土壤上的

表 3 水稻对铝、磷的吸收和生长

土壤代号	根			茎叶		
	P × 10 ² mg·kg ⁻¹	Al	DW g	P × 10 ² mg·kg ⁻¹	Al	DW g
根盒 QP	10.9	24.7	3.54	18.4	0.763	6.39
WP	11.0	27.3	2.21	18.9	0.890	4.43
盆 QR	7.01	88.4	1.56	8.96	2.95	2.57
LR	5.31	109	1.72	7.40	3.06	2.50
盆栽 QP	15.1	35.2	6.77	29.2	2.49	19.3
WP	14.3	36.7	5.16	26.9	2.98	14.5
栽 QR	5.88	81.4	3.67	18.7	5.41	8.42
LR	6.08	66.4	3.54	20.3	9.70	8.32

比值都几乎在30左右，进一步说明茎叶中的铝量反映了根内的含铝量，它们又主要取决于根际中活性铝的供应。

盆栽试验中各土壤上水稻的养分吸收和生长状况与根盒试验的结果是类似的(表3)。这表明尽管试验条件有较大差异，但根盒试验的结果可以说明较大系统中的植物生长情况；同时表明根际中活性铝的状况极大地影响水稻生长和养分吸收。

(三) 溶液培养中铝胁迫下水稻的响应

已有的研究表明，铝对植物毒害的生理机制，主要是因为铝对根细胞膜结构和功能的破坏，影响DNA合成、细胞分裂和伸长，阻碍营养元素的吸收和代谢^[2,5]。为探讨铝毒机制，进行了铝对水稻生长影响的纯溶液培养(表4)。从表4可见，培养4周的稻株，在新换正常培养液1天后，pH值即下降1.30单位，表明水稻在吸收了介质中NH₄⁺—N后，为维持电中性而释放出H⁺的缘故^[4]。但是随着溶液中铝浓度的增加，介质pH下降率逐渐减小，10mg Al·kg⁻¹处理下降1.13单位，当浓度增至30mg·kg⁻¹时，则pH下降仅为0.13单位，表明铝的

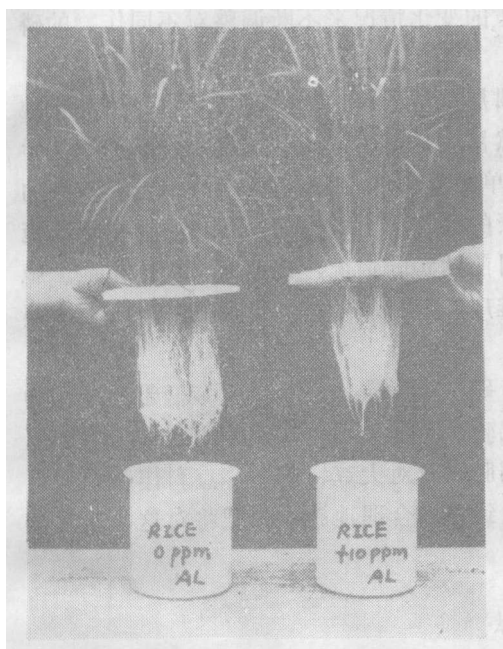
存在阻碍了水稻对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收, 从而导致 pH 下降幅度较小。也可能是因为水稻产生对铝胁迫的生理适应性而使介质 pH 升高 [1, 3], 因而表观上 pH 下降较小。

从表 4 中还可看到, 经 $10\text{mgAl}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理后, 水稻根尖细胞膜透性增大, 即电导率指数由 0.155 增至 0.172, 表明加铝处理后根尖细胞膜遭破坏, 透性增大, 进而妨碍对养分的吸收。

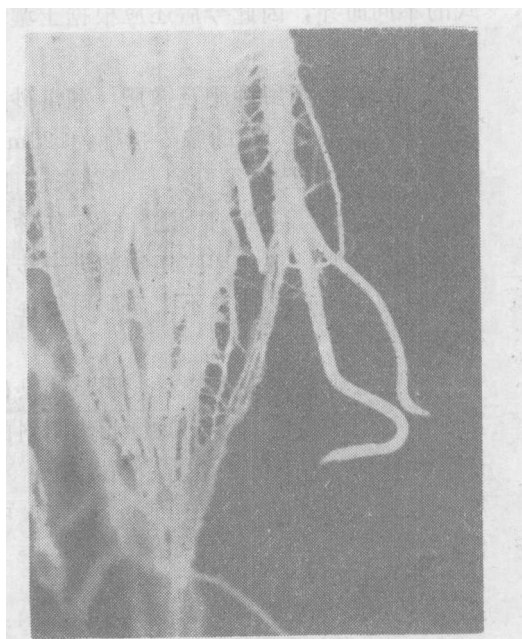
表 4 铝胁迫下根渗出液的电导率变化及介质 pH 响应

铝浓度 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	电 导 率 ($\times 10^{-3}\text{ds}\cdot\text{m}^{-1}$)		电导率指数	ΔpH
	100 $^{\circ}\text{C}$	30 $^{\circ}\text{C}$		
0	23.4	3.61	0.155	1.30
10	38.8	6.67	0.172	1.13
30				0.13

* 生长 4 周的水稻在新换培养液中吸收一天后介质 pH 的下降值。



照片 1 铝胁迫作用对水稻根系生长影响



照片 2 在铝胁迫作用下水稻根尖异常生长的状况

这可能是铝取代了细胞膜上的钙, 或与膜脂及膜蛋白结合, 导致膜结构破坏 [2]。

形态观察进一步表明受铝胁迫的根系生长较差, 根短而粗, 地上部分蘖少 (照片 1)。另外根尖卷曲, 呈鱼钩状, 出现异常生长 (照片 2)。这些都表明在铝胁迫下水稻根系生长受到明显抑制。

总之, 土壤中活性铝在根际的分布出现空间分异, 在新垦红壤水稻根际中富集, 而在熟化水稻土根—土界面上稍有亏缺或差异不明显, 这导致两类土壤上水稻生长和养分吸收的差异。其机制可能是通过铝对根系生理活动及生长的抑制。

参 考 文 献

- [1] Foy, C. D., Commun. Soil Sci. Plant Anal., 19: 959-987, 1988.
- [2] Taylor, G. J., In: "Metal. Ions in Biological Systems", (ed. by H. Sigel and A. Sigel), Vo. 24: Aluminum and its role in biology, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 123-163, 1988.
- [3] Taylor, G. J., Commun. Soil Sci. Plant Anal., 19: 1179-1194, 1988.
- [4] 刘芷宇, 土壤—根系微区养分环境研究概况, 土壤学进展, 8 卷 3 期, 1—11 页, 1980.

- [5] Wright, R. J., Commun. Soil Sci. Plant Anal., 20: 1479-1497, 1989.
- [6] 王建林等, 根际中硅、铁、锰和铝的状况与水稻生长, 应用生态学报, 2卷3期, 233—237页, 1991。
- [7] 中国科学院南京土壤研究所, 土壤理化分析, 上海科技出版社, 283—286页和360—361页, 1980。
- [8] 邓铁金等, 红壤新开稻田黄叶黑根的研究, 土壤通报, 第4期, 22—24页, 1980。
- [9] 王建林、陈家坊, 可变电荷表面磷的解吸特性, 土壤学报, 28卷1期, 14—23页, 1991。

(上接第313页)

的有效性将有所下降,因此在种植水麦等旱作物时,还应适当施用少量磷肥或施用一定量的含磷复合肥,以补充土壤供磷能力的不足。由于土壤中有效磷含量随着肥料投入量以及耕作方式的不同而异,因此今后还应根据土壤中速效磷含量的变化情况来不断调整对不同作物的磷肥施用量。

(四)合理施用钾肥及微肥 泗洪砂姜黑土地区耕层土壤的质地大多属重壤土,这种质地的土壤一般缺钾(K)的临界指标为 120mg kg^{-1} 。虽然目前从整体上看土壤速效钾的含量高于缺钾临界值,但是必须看到长期以来该地区基本上不单独施用钾肥,而主要依赖于土壤自身的供钾能力。因此,如前所述,随着作物对土壤中钾素的吸收量不断增加,若仍不重视合理施用适量的钾肥,将会影响作物的进一步高产。根据目前的实际情况,该地区大部分耕地上施用单质钾肥的必要性并不大,而可以在每季作物上推广应用适量的含钾复合肥,以补充土壤钾素的损失。

泗洪县近期的调查资料表明,该县砂姜黑土锌、硼、钼的有效态含量大多低于满足作物正常生长的临界值,因此微量元素肥料的施用应在试验示范的基础上,逐步引起重视并加以推广。特别是应注意对水稻施用锌肥,对油菜施用硼肥以及对大豆、花生等豆科作物施用钼肥,其施肥方法以做种肥或喷施为宜。可以预计,做到科学合理地施用微肥将对这一地区的作物起到进一步的增产作用。

参 考 文 献

- [1] 张俊民, 论砂姜黑土的生产潜力和综合治理, 砂姜黑土综合治理研究, 安徽科学技术出版社, 1988。
- [2] 吴文荣等, 砂姜黑土磷素状况及磷肥施用, 砂姜黑土综合治理研究, 安徽科学技术出版社, 1988。
- [3] 朱兆良等, 黄淮海地区石灰性土壤上不同混施方法下氮肥的去向和增产效果, 土壤, 第20卷, 第3期, 1988。
- [4] 曾志洪等, 土壤肥力特征和合理施肥, 黄淮海平原区域治理技术研究, 科学出版社, 1987。