

# 根际中硅、铁、锰和铝的状况与水稻生长\*

王建林 廖宗文\*\* 刘芷宇 (中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**【摘要】** 本文以根盒试验与盆栽试验相结合的方法,研究了红壤性水稻土、淀浆白土、第四纪红土和赤红壤植稻后根际微生态系统中Si、Fe、Mn和Al等元素的状况及其与水稻生长的关系。结果表明,新垦红壤植稻后根际中活性Fe和Al富集,活性Mn量降低,但亏缺率小,活性Si则亏缺不明显,有时甚至富集。而熟化水稻土植稻后根际中活性Fe和Al则出现亏缺,Mn的亏缺较大,且差值明显,活性Si的亏缺现象更为显著。由于新垦红壤植稻后Fe和Al在根际微生态系统中富集,根茎叶中累积量较高,从而使Si、P和Mn等元素的吸收受阻,导致新垦红壤上水稻生长明显比熟化水稻土上的水稻要差。

**关键词** 富集 亏缺 根盒 根际

**Status of Si, Fe, Mn and Al in rhizosphere and its effect on rice (*Oryza sativa* L.) growth.** Wang Jianlin, Liao Zhongwen and Liu Zhiyu(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008). -Chin.J.Appl.Ecol.,2(3):232—237.

The present research investigated the status of Si, Fe, Mn and Al in rhizosphere of two red earths and two paddy soils after planting rice and its effect on rice growth and element absorption with the combination of rhizobox and pot cultivation experiment. The results show that active Fe and Al are accumulated in the rhizosphere of red earths after rice planting, active Mn is less in the rhizosphere, while active Si is not conspicuous deficient and accumulated on occasion. In paddy soils, after growing rice, active Fe and Al in the rhizosphere has a definite depletion, active Mn has a high depletion, while active Si is depleted very obviously. These differences result in the decrease of element absorption, such as Si, P and Mn during the rice growing period in two red earths. At the same time, Fe and Al are accumulated in both roots and shoots, and the element absorption and rice growth are hindered. All these findings should help to understand material cycling in rhizosphere microecosystem.

**Key words** Accumulation, Depletion, Rhizobox, Rhizosphere.

## 1 前言

元素在生态系统中的归趋与各子系统的相互作用有密切关系。在农田生态系统中,土壤和植物是主要的组成部分,其中宏观的物质流与能量流及系统的功能和生产力方面已有很多研究,但涉及到根系与土壤的相互作用及对物

质流的影响则很少报道。而元素在根-土界面(根际)中的迁移、转化对整个农田生态系统的功能有很大影响,因此这方面的研究有很重要的理论和实践意义。

元素在根际中的分布状况和化学行为与土壤本身的性质,植物根系的吸收和分泌作用及根表面的物理化学特性有密切关系<sup>[6]</sup>,近年来这方面的研究日趋活跃,正成为一个独立的分支领域<sup>[12]</sup>。但过去的研究多偏重中性和石灰性土壤<sup>[6]</sup>,而对我国长江以南广大地区的

\* 国家自然科学基金资助课题。

\*\* 华南农业大学土壤农化系。

本文于1990年4月3日收到。

酸性土壤尚未见报道。由于世界人口增长与土地资源缺乏的矛盾, 因而对低 pH 土壤的研究兴趣日增。已有研究表明, 红壤中有活跃的 Fe、Mn 迁移和转化, 特别是植稻后, 它们的淋溶淀积十分明显<sup>[1]</sup>。其特殊的成土过程常使新垦红壤植稻后出现黄叶生理病<sup>[4,5,10]</sup>, 发病原因归结为缺乏营养元素<sup>[4,10]</sup>和铁毒<sup>[8,10]</sup>等。廖宗文则用电子探针研究表明水稻黄叶生理病稻根表皮层中铁远高于正常稻根, 而内皮层中的 Si 则较少<sup>[7]</sup>。本文着重研究了熟化水稻土和新垦红壤植稻后根际微生态系统中 Si、Fe、Mn 和 Al 等元素的状况, 它们对水稻元素吸收和生长的影响, 并进而探讨红壤肥力演化过程中根际土壤化学环境的变化特征。

#### 表 1 供试土壤的基本性质

Tab.1 Fundamental properties of soils tested

土壤及代号 Soils & Code*	地 点 Location	pH	有机质 O.M. %	全 氮 Total N %	游离铁** Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	活性组分*** (mg/100g 土) <sup>[2]</sup> Active components		
						Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
红壤性水稻土(QP)	浙江金华	6.13	1.96	0.162	1.49	79.4	310	10.9
淀浆白土(WP)	浙江长兴	6.17	1.49	0.112	1.06	70.9	312	5.29
第四纪红土(QR)	江西刘家站	5.04	0.357	0.027	4.42	367	141	1.22
赤红壤(LR)	广州石碑	5.26	0.542	0.043	5.22	224	84.7	0.546

\* QP—Quaternary reddic paddy soil, QR—Quaternary red earth, WP—White bleaching paddy soil, LR—Lateritic red soil. \*\* Free iron oxide. \*\*\* Active components extracted by Tamm's solution.

料量, 设 3 次重复。供试作物为水稻(盐粳 2 号)。在根盒的小室中加入少量土(100g), 并将育好的稻苗贴于该室的土面上(每盒 20 株), 再盖上 300 目的尼龙筛网, 然后小心地与装好土的大室接触(装土容重分别为 QP: 1.01; WP: 1.12; QR: 1.30; LR: 1.33 g·cm<sup>-3</sup>), 用夹具夹紧, 置于温室中生长, 每天加 2—3 次水, 使土壤保持淹水状态。约 5 周后, 松开夹具, 小心取出土壤, 小室中与根相连的土壤即为根际土。大室中离根面 20—30mm 的土壤为非根际土。小室中的植株, 洗净后分成根和茎叶两部分, 烘干称重, 计算生长量, 样品备分析用。

称取一定量各种土壤的根际土和非根际土, 加入酸性草酸-草酸铵缓冲液, 一次提取各土壤的活性 Fe、Mn、Al 和 Si<sup>[2]</sup>, 以硅钼蓝比色法测定 Si, 试铁灵铁钼联合比色法测定 Fe 和 Al, 原子吸收分光光度

## 2 材料与方法

### 2.1 供试土壤

试验土壤为第四纪红土发育的植稻多年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心土(LR), 基本性质见表 1。

### 2.2 根盒(Rhizobox)试验

用自制根盒, 制备各种土壤的根际土与非根际土。取 2 个敞口的塑料半盒, 其中一半为大室(12×4×15cm<sup>3</sup>), 另一半为小室(12×1×15cm<sup>3</sup>), 中间隔一尼龙筛网, 即成一垂直根盒。试验时将土风干磨细过 40 目, 加入水稻生长所需的养分, N 为 50ppm, P 为 100ppm, K 为 100ppm, 分别以化学纯试剂尿素、磷酸二氢钙和氯化钾供给。每种土壤均加入相同的肥

法测定 Mn。

### 2.3 盆栽试验

将 4 种土壤, 风干, 磨细过 8 目。拌入与根盒试验相同的肥料量。每一盆装土 2.5kg, 栽入 4 丛稻苗, 每丛 4 株, 设 3 次重复。放于温室中生长约 6 周后, 取出盆中稻株, 洗净, 分成根和茎叶两部分, 烘干, 称重, 计算生长量, 样品备作分析用。

所有植株样品均磨细, 60℃ 烘干, 应用三酸消化法<sup>[2]</sup>制得样品待测液, 用直流等离子体光谱法测定 P、Fe、Al 和 Mn 等元素的含量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 根际土壤中 Si、Al、Fe、Mn 的状况

对 4 种土壤植稻后各元素在根际土壤和非根际土壤中的状况的研究结果见表 2。由表 2

可见,根际中活性  $\text{SiO}_2$  的量,除赤红壤根际中出现Si富集外,其余3种土壤根际中的含量均低于非根际土。这种根际中活性Si出现亏缺的现象,主要是由于水稻对根际土壤中活性Si吸收量增多的缘故。但各土壤间总的活性Si量

表2 各土壤根际土与非根际土中元素状况<sup>1)</sup>

Tab.2 Status of elements in rhizosphere and bulk soil

土 壤 <sup>2)</sup> Soils	$\text{SiO}_2$ $\text{MnO}$		$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
	mg/100g soil		%	
QPB	49.9	21.1	0.727	0.344
QPR	41.6	16.0	0.601	0.326
WPB	70.9	9.91	0.704	0.273
WPR	54.5	8.33	0.627	0.272
QRB	72.6	3.70	0.673	0.617
QRR	68.5	3.42	0.771	0.639
LRB	47.1	1.47	1.02	0.433
LRR	50.3	1.40	1.13	0.552

1) 各元素均是活性组分含量。Active fraction of elements.

2) B——非根际土 Bulk soil, R——根际土 Rhizosphere soil.

差异不明显。看来熟化水稻土本身活性Si量较丰富,而新垦红壤中则因植稻后,Fe、Mn活化使它们固定的Si较易释放出来,从而导致Si的活化<sup>[9]</sup>。赤红壤因发育于花岗岩母质,其中各种形态的含Si化合物较多,在根系生理活动及根系分泌物等作用下而活化,因而在根际中反而有累积的趋势。可见,红壤植稻后,水稻出现生理病害或生长不良的原因似与土壤有效Si的多少无关,而是其它因子限制了水稻对养分的吸收和生长。

活性Al在4种土壤根际中的状况出现分歧。熟化水稻土根际中的活性Al量稍低于非根际土或与之持平。而新垦红壤则相反,在根际中有富集的趋势。这表明植稻后,红壤根际中因根系分泌物的作用,Al被活化,活化的Al超过了水稻生长的需要,并在根际中累积,这可能是红壤上作物出现生长不良的重要原因之一。它可能通过沉淀、吸附等物理化学过程将

P和Si等元素固定<sup>[8]</sup>,或因为在根周围淀积阻碍了P、Si和其它养分元素的吸收位,或是根周围淀积的Al通过对根系的直接毒害作用而使作物生长受阻<sup>[11]</sup>。而熟化水稻土则因水稻正常生长吸收一部分Al,同时土壤中可活化的Al不多,因此在根际中稍有亏缺或无亏缺。

根际中活性Fe的状况与土壤熟化度有密切关系。2种熟化水稻土根际中活性Fe明显低于非根际土壤,而两种新垦红壤则相反,表现为根际中活性Fe的富集,这与石灰性土壤中根际有效Fe和无定形Fe富集的趋势是相同的,原因是根-土界面上根系生理活动和微生物分泌作用的影响<sup>[6]</sup>。这两种富集的结果是完全不同的。石灰性土壤根际中的活性Fe累积有利于改善这些土壤中的Fe素供应,促进作物生长<sup>[6]</sup>,而新垦红壤植稻后根际土壤中活性Fe的富集则可能:(1)使养分元素如P和Si等在根周围土壤中固定;(2)阻碍养分元素进入根系,导致生理失调病,从而在病根中可见到明显的高Fe低Si特征<sup>[7]</sup>。

活性Mn在水稻根际中有一定的亏缺趋势。但两种熟化的水稻土与新垦红壤相比,前者根际土壤中活性Mn量高,亏缺率大(16—24%),后者则不仅量低,亏缺也不明显,亏缺率仅为5—8%。这可能是熟化水稻土中Mn的活性相对较大,易被活化,也易为水稻吸收而促进生长,因而在根际中不仅量高而且亏缺明显。而新垦红壤中Mn化合物则大多处于老化状态,对根系分泌物的活化作用不敏感<sup>[1]</sup>,因而根际中活性Mn量较低。另外,可能由于红壤中在根际有Al和Fe的富集及另外原因,限制了水稻根系对Mn的吸收,因此在根际中活性Mn的亏缺率较小。

总之,两种水稻土和两种红壤分布于不同地域,起源于不同的母质,但其Si、Fe、Mn和Al等元素的根际分布明显地与熟化度有关,可归成两类,即熟化水稻土和新垦红壤。这种

根际中元素分布的共同特征可能反映了某些土壤演化的规律, 深入研究这一课题, 将有助于对养分有效性和元素相互作用的认识; 了解红壤熟化过程中根际土壤化学环境变化的规律, 也将推进对根际微生态系统中物质循环特征的认识。

### 3.2 水稻生长及其对养分的吸收

各种土壤上水稻的生长量及对元素的吸收受到土壤中有效养分含量和营养元素相互作用

等因素的影响, 因此根-土界面上养分的状况与其更有直接的关系。试验结果见表3。

从表3可见, 水稻的生长无论是根还是茎叶, 熟化水稻土均优于新垦红壤(根盒), 根生长量表现为: 红壤性水稻土>淀浆白土>赤红壤>第四纪红土; 而地上部生长量除第四纪红土略大于赤红壤外, 顺序与根生长量相同; 总干物重则2种红壤几乎相等, 而2种水稻土为红壤性水稻土大于淀浆白土。

表3 水稻生长和养分吸收

Tab.3 Rice growth and element absorption

土 壤 Soils*	根 Root					茎 叶 Shoot				
	P	Al	Mn	Fe	干重DW	P	Al	Mn	Fe	干重DW
	( $\times 10^3$ ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)	(g)	( $\times 10^3$ ppm)	(ppm)	(ppm)	(%)	(g)
根盒 QP	10.9	24.7	283	2.72	3.54	18.4	76.3	823	365	6.39
WP	11.0	27.3	226	2.75	2.21	18.9	89.0	433	423	4.43
RBT QR	7.01	88.4	49.0	3.04	1.56	8.96	295	225	572	2.57
LR	5.31	109	52.5	4.24	1.72	7.40	306	224	515	2.50
盆栽 QP	15.1	35.2	263	2.43	6.77	29.2	249	650	433	19.3
WP	14.3	36.7	215	2.90	5.16	26.9	298	515	471	14.5
PCT QR	5.88	81.4	53.2	2.12	3.67	18.7	541	303	651	8.42
LR	6.08	66.4	42.5	2.24	3.54	20.3	970	280	770	8.32

\* RBT—Rhizobox test; PCT—Pot cultivation test

从根盒试验中稻株各部分的元素吸收量来看, 因红壤和赤红壤上根中吸收的Fe和Al量较高, 尤其是Al, 远高于熟化水稻土中的含量, 约为后者的4倍(表3)。其它营养元素的含量如Mn则相反, 第四纪红土和赤红壤上稻根中的含量仅为熟化水稻土上的20%左右, 与根际中这些元素的亏缺或累积趋势十分吻合。前者吸收的P量也较低, 其含量仅为熟化水稻土的50—65%左右, 总吸收量约为熟化水稻土上的35%左右, 看来主要是根周围的Fe、Al富集使P沉淀或被吸附所致。也可能是大量的Fe、Al进入根中并主要分布在表皮层<sup>[7]</sup>, 使P难以进入根中, 最终使生长受阻。此外, 对赤红壤来说, 根中P量特别低, 这可能是由于其根际中Si的富集, 与P竞争根表面的吸附点或吸收位, 阻碍了P的吸收。各土壤上稻根中

元素含量的次序为:

P: WP>QP>QR>LR;

Al、Fe: QP<WP<QR<LR;

Mn: QP>WP>LR>QR。

根盒试验中, 各土壤上茎叶内各元素的分布状况与根中相类似。但是茎叶中P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), 即新垦红壤中生长的稻株, 地上部吸收的P与根吸收的P之比值比熟化水稻土上的要小, 表明根中吸收的过量Fe、Al束缚了一部分进入根中的P, 使其活动性下降, 因而影响地上部的生长。茎叶中Fe的含量在两类土壤上差异并不大, 但Al的差异却极显著。新垦红壤上植株含Al量约为熟化水稻土上植株的4倍, 但若以根中含Al量与茎叶中含量相比较, 则4种土壤上的比值却几乎相同, 均为30

左右,进一步说明,茎叶中的Al量反映了根内的含Al量,而后者主要取决于根际中Al的供应。茎叶中Mn吸收量虽比根内高,但在两类土壤上的差异,茎叶吸Mn量要小于根的吸Mn量,新垦红壤为熟化水稻土的1/4—1/2左右,说明红壤根际中Fe和Al的富集对Mn的吸收虽有明显的影响,但对Mn从根内向地上部运转的影响则较小。这表明新垦红壤与熟化水稻土植稻后这些元素在体内的差异受到根际中元素状况的影响,同时也与这些元素的相互作用有着密切关系。可见元素自土壤向植物的物质流受到了根-土界面上元素特定化学行为的制约,最终制约植物生长。

这些微观的研究结果能在多大程度上反映农田生态系统中养分流的情形?我们对这4种土壤用同一水稻品种在相同施肥条件下进行盆栽试验,结果(表3)表明两类土壤中水稻的生长和养分吸收状况与根盒试验结果相比,趋势基本上一致。根茎叶的生长量均为熟化水稻土大于新垦红壤;水稻根和茎叶内P、Mn量也是熟化水稻土大于新垦红壤;红壤上稻根内和茎叶内Al的浓度远大于熟化水稻土。但是根内Fe的浓度及吸收量均为红壤小于水稻土,这与根际中Fe在水稻土上出现亏缺的趋势,而在红壤上出现累积的趋势是相吻合的。虽然根盒与盆栽之间,盆栽与农田之间条件有较大差别,且植株内各元素的吸收在根盒和盆栽试验之间有些细微差别,但总的趋势在两类土壤上基本相同,因此进一步说明根际微生态系统中元素的化学行为及相互作用一定程度上制约了植物对元素的吸收和生长状况,而不管系统的大小和组成。

### 3.3 红壤肥力演化中根际土壤化学环境变化规律的初探

上述结果表明,红壤与水稻土这两类土壤植稻后根际中元素的状况有明显差异,这些有利于对红壤熟化本质的认识。熟化水稻土根际中活性Fe和Al亏缺、活性Si亏缺、活性Mn则

不仅量大,亏缺率也大。而红壤植稻后根际中活性Fe和Al则有富集的趋势,活性Si亏缺率较小,有时甚至富集,且量上与水稻土无明显差异,活性Mn则不仅量低,亏缺率也小(表4)。这些根际中元素分布的差异必然导致两类土壤上水稻对养分吸收和生长的差别(表5)。因此,红壤新土在熟化过程中伴随着根际土壤中Fe和Al的亏缺趋势,而外界条件促进Fe和Al富集区的消除,则有利于其它养分吸

表4 熟化水稻土与新垦红壤根际元素状况的比较

Tab.4 Comparison of element status in rhizosphere between red soils and paddy soils

元 素 Elements	根际状况 Rhizosphere status	
	新 垦 红 壤 Red soils	熟 化 水 稻 土 Paddy soils
Si	亏缺小,有时富集 Small depletion, occasional accumulation	亏缺大,但量上与新垦红壤 差异不大 Large depletion, no difference from red soils in quantity
Mn	量低,亏缺小 Low in quantity, small depletion	量高,亏缺大 High in quantity, large depletion
Fe	富集 Accumulation	亏缺明显 Large depletion
Al	富集 Accumulation	亏缺较小或无 Small or no depletion

表5 水稻生长和元素吸收在两类土壤上的差异

Tab.5 Difference of rice growth and element absorption in two kinds of soils

元 素 Elements	生长和吸收 Growth and absorption				
	新垦红壤 Red soils		熟化水稻土 Paddy soils		差 异 Difference
P	少	Less	多	More	明显 Obvious
Fe	多	More	少	Less	较明显 Less obvious
Al	多	More	少	Less	极明显 Very obvious
Mn	少	Less	多	More	极明显 Very obvious
生长量 (DW)	低	Low	高	High	明显 Obvious

收,进而有利于提高红壤-植物系统的功能和生产力。另外一个值得注意的现象是,根际土壤中Mn的状况与水稻生长有密切关系,但红

壤新土中活性 Mn 远低于水稻土, 根际的亏缺率较小也显示出 Mn 的活性较小, 因此加速红壤中老化态 Mn 的活化过程, 应当有利于红壤肥力的发展。进一步需要弄清的是, 旱作条件下在作物根际是否也出现 Fe 和 Al 的富集区, 这种富集对其它养分有效性的影响, 及何种农业措施可以促进 Fe 和 Al 富集区的消失等一系列问题, 这将对合理施肥, 弄清红壤这一生态系统中的物质流和能量流, 优化系统结构, 提高系统功能有十分重要的意义。

### 参 考 文 献

- 1 丁昌璞、于天仁。1958。水稻土中氧化还原过程的研究Ⅳ。红壤性水稻土中铁、锰的活动性。土壤学报, 6(2):99—107。
- 2 中国科学院南京土壤研究所。1980。土壤理化分析。上海科技出版社, 上海, 283—286, 360—361。
- 3 王建林、陈家坊。1991。土壤中可变电荷表面上磷的解吸特性。土壤学报, 28(1):14—23。
- 4 邓铁金等。1980。红壤新开稻田黄叶和黑根的研究。土壤通报, 11(4):22—24。
- 5 刘芷宇。1980。土壤-根系微区养分环境研究概况。土壤学进展, 8(3):1—11。
- 6 施卫明。1990。石灰性土壤中铁的生物有效性及其影响因素。土壤, 22(2):75—77。
- 7 廖宗文。1989。应用电子探针研究黄叶生理病的水稻根内硅和铁的分布。植物生理学报, 15(1):52—56。
- 8 Howeler, R. H. 1973. Iron-induced orange disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded oxisol. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37(3):898—903。
- 9 Jones, L. H. P. and Handreck, K. A. 1967. Silica in soils, plant and animals. Advance in Agronomy, 19:108—113。
- 10 Tanaka, A. and Yeshida, S. 1970. Nutritional disorders of rice plant in Asia. Tech. Bull. 10, IRRI, Manila, Philippines。
- 11 Taylor, G. J. 1988. The physiology of aluminum phytotoxicity. In: Metal ions in biological systems, ed. by H Sigel and A Sigel. Vol. 24: Aluminum and its role in biology. Marcel Dekker Inc., New York. 123—163。
- 12 Van Diest, A. et al. 1987. Plant and Soil: Interfaces and Interactions. Martinus Nijhoff Publishers。