

水肥状况对土壤剖面中锰的移动 和水稻吸锰的影响*

刘学军¹ 吕世华² 张福锁³ 毛达如⁴

(1, 3, 4 中国农业大学植物营养系, 北京 100094)

(2 四川省农科院土肥所, 成都 610066)

摘 要 水旱轮作条件下小麦缺锰是四川冲积性水稻土上主要的养分胁迫问题。为了深入探讨这一问题, 作者利用模拟土柱试验研究了不同水肥状况对四川两种典型冲积土中锰的迁移、转化及其对水稻吸锰的影响。结果表明, 淹水种稻后土壤活性锰减少, DTPA 态锰和交换态锰等可溶性锰的含量增加, 引起锰随渗滤液向剖面下部淋溶、淀积和水稻对锰的奢侈吸收, 造成土壤总有效锰库减少。湿润处理比相应淹水处理显著地减缓土壤中锰的这种转化, 并大大降低水稻对锰的吸收; 而施肥(有机肥和化肥)的效应远不如水分状况明显。目前尚未表现缺锰的灰棕潮土, 在淹水种稻过程中锰的活化淋溶规律与水旱轮作后缺锰的灰潮土相似, 说明灰棕潮土水旱轮作条件下也有潜在缺锰的可能。

关键词 水肥状况, 土壤, 锰, 淋溶, 空间分异, 水稻

中图分类号 Q945.12

锰的形态转化是水稻土干湿交替过程中氧化还原所引起的主要化学变化之一, 因此渍水土壤中锰的化学一直是土壤化学和土壤发生学研究的重要领域^[1-3]。淹水种稻后, 土壤中的锰容易通过活化、淋溶、淀积、固定等一系列化学过程改变其有效性, 不仅影响当季水稻的吸收, 而且还可能影响后季旱作物的锰营养状况。80 年代初, 国内胡思农等^[4]首次报道, 在成都平原一些河流沿岸的冲积性水稻土上小麦出现严重缺锰症, 施用锰肥有极为显著的增产效果。几乎同时, 在印度的 Punjab 邦也发现同样的小麦锰营养失调问题^[5]。此后, 水旱轮作土壤中小麦缺锰的报道迅速增加^[6, 7]。进一步的研究^[8, 9]发现, 小麦缺锰与种植水稻或水旱轮作有特殊的联系。但这种联系究竟如何, 目前仍缺乏定量的数据予以说明。为此, 作者利用土柱模拟试验研究了水肥状况对土壤剖面中锰的迁移、转化及生物吸收的影响, 为定量评价淹水种稻条件下土壤锰肥力变化规律提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为成都平原发育于不同两种母质的土灰潮土和灰棕潮土, 土壤的有关理化性状如表 1。

* 国家自然科学基金杰出人才基金资助项目(批准号: 39425013, 49801013)

收稿日期: 1997-06-12; 收到修改稿日期: 1998-04-12

表1 试验土壤的基本理化性质

Table 1 Some physico-chemical properties of the experimental soils

土壤类型	母质	质地	pH	有机质	有效锰	交换态锰	活性锰	全锰
Soil type	Mother materials	Texture	(H ₂ O)	O.M. (g/kg)	DTPA-Mn (mg/kg)	Exchangeable-Mn (mg/kg)	Active-Mn (mg/kg)	Total-Mn (mg/kg)
灰潮土	泔江冲积物	砂壤	8.1	18.9	7.7	4.7	112.2	534.7
灰棕潮土	沱江冲积物	中壤	5.8	26.4	50.9	27.0	213.3	615.2

1.2 试验方案

模拟土柱长 100cm、内径 11cm，为有机高分子聚合物组成的 UPVC 管。土柱底部套一相同材料制成的圆锥形带孔漏斗，内铺有洁净的河砂约 5cm。漏斗底部有一瓷盆，用于收集渗液。供试土壤经风干并过 5mm 筛孔后，按土壤表观容重为 1.2g/cm³ 装入管内，表层 0—20cm 为施肥和水分处理层次。试验设 4 个处理，每处理重复 3 次。具体处理为：

- (1) 淹水无肥 (CK)：不施肥料，用去离子水浇灌，维持土表 2—3cm 的水层；
- (2) 淹水化肥 (NPK)：在淹水基础上每土柱施 NPK 化肥，用量依次为尿素 0.5g，磷酸一铵 0.3g，氯化钾 0.3g；
- (3) 淹水有机无机 (NPKM)：在淹水化肥的基础上每土柱施干猪粪 10g；
- (4) 湿润有机无机 (NPKM/Wet)：在施化肥和有机肥猪粪的基础上保持土壤湿润状况，即土表无明显水层，浇灌次数同淹水处理，但灌溉量仅为前者的 1/2—1/3 (以下简称湿润)。

试验于 1995 年 6 月初开始进行，每土柱播 8 颗已催芽的水稻种子，一周后匀至 4 株。试验期间，根据先密后疏的原则定期收集土壤渗液，测定其锰浓度并计算锰的总淋失量。试验于 8 月底结束后，收割水稻地上部制成分析样，并打开土柱分 4 个层次取土样，进行土壤和植株锰含量的分析。

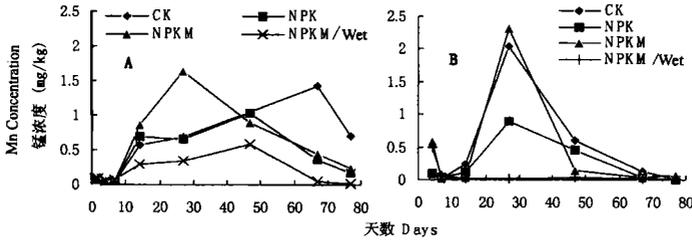
1.3 分析方法

土壤质地用吸管法，pH 用电极法，有机质用重铬酸钾稀释热法—容量法。植株全锰用高氯酸—硝酸消化，土壤全锰用硝酸—高氯酸—氢氟酸消化，DTPA 态锰用 0.005mol/L 的 DTPA 混合液 (pH7.3) 提取，交换态锰用 1mol/L 中性 NH₄OAc 提取，活性锰用 1mol/L 中性 NH₄OAc—0.2% 苯酚溶液提取，所有植株和土壤锰的测定均用原子吸收分光光度法。

2 结果与分析

2.1 不同水肥状况对土壤中锰淋溶的影响

2.1.1 锰的淋溶动态 图 1 是不同水肥状况下土壤渗液中锰的淋溶动态。从图中可知，土柱淹水的前 2 周渗液中锰的浓度很低，且处理间差异不大，但以后各淹水处理 (CK、NPK、NPKM) 渗液锰的浓度迅速增加，明显超出湿润处理 (NPKM/Wet)，锰的淋溶峰值出现在淹水后 4 周左右 (灰棕潮土尤为如此)，往后渗液中锰的浓度又呈下降的趋势，并保持到试验结束。淹水条件下，锰的淋溶峰值以 NPKM > CK > NPK，说明有机肥可加速淹水前期锰的淋溶。两种土壤比较，灰潮土渗液中锰浓度在较长时间内保持较高水平，而灰棕潮土锰的淋溶峰值虽然出现较早，但随后迅速下降至较低水平。



A 灰潮土Grey alluvial soil; B 灰棕潮土Grey-brown alluvial soil

图1 水肥状况对土壤渗漏液中锰浓度动态的影响

Fig.1 Effect of water and fertilization on dynamic of Mn concentration in leachates

2.1.2 锰的淋溶总量 表2是根据渗漏液锰的浓度和体积计算出的锰淋溶总量。从表2可知,湿润处理锰的淋溶总量显著低于淹水处理,其中灰潮土湿润条件下每土柱锰的淋溶总量为5.9mg,仅相当于相应淹水处理的16%,而灰棕潮土更少,不到相应淹水处理的5%。这实际上是湿润处理渗漏液中锰浓度较低(图1)和土壤总渗漏量远少于淹水处理二者的加和效应。淹水条件下各施肥处理比较,锰的淋溶总量均以无肥 > 有机无机 > 化肥,但彼此间差异未达到显著水平。两土壤比较,锰的淋溶总量以灰潮土显著高于灰棕潮土。

表2 不同水肥处理对土壤锰淋溶总量(mg/柱)的影响

Table 2 Effect of water and fertilization on total content of Mn (mg/column) in soil leachates

处理 Treatment	淹水无肥 CK	淹水化肥 NPK	淹水有机无机 NPKM	湿润有机无机 NPKM/Wet
	Waterlogging			
灰潮土	61.3±25.6	31.8±18.0	37.8±10.7	5.9±2.2
灰棕潮土	19.4±10.4	11.4±9.6	15.0±5.3	0.7±0.3

2.2 不同水肥状况对水稻生长及吸锰的影响

表3列出了不同水肥处理下灰潮土和灰棕潮土水稻地上部生物量及其锰吸收量的情况。从表中可看出,虽然湿润处理水稻干物重略低于相应淹水处理,各处理水稻地上部干物重之间无显著差异;但地上部锰浓度和吸锰量则均为淹水处理显著高于湿润处理(p = 0.01),其中灰潮土湿润处理水稻吸锰量仅为相应淹水处理的21%,而灰棕潮土则不到

表3 不同水肥状况对水稻地上部生物量及锰吸收量的影响

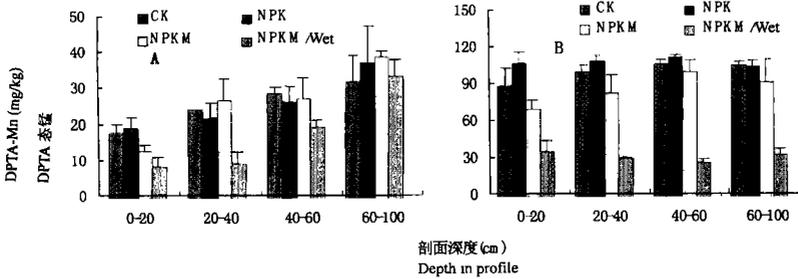
Table 3 Effect of water and fertilization on dry weight of rice shoot and uptake of Mn

土壤 Soil	项目 Item	淹水无肥 CK	淹水化肥 NPK	淹水有机无机 NPKM	湿润有机无机 NPKM/Wet
		Waterlogging			
灰潮土	生物干重(g/柱)	14.3±0.4	15.3±1.4	14.9±0.4	12.7±2.2
	锰浓度(mg/kg)	292.7±49.3	270.7±18.5	280.5±35.6	66.8±9.3
	吸锰量(mg/柱)	4.2±0.6	4.2±0.6	4.2±0.6	0.9±0.2
灰棕潮土	生物干重(g/柱)	29.3±2.4	30.6±1.5	35.7±1.8	34.4±1.4
	锰浓度(mg/kg)	768.9±71.7	790.5±250.9	680.4±167.3	110.3±16.2
	吸锰量(mg/柱)	22.4±0.4	23.9±6.4	24.5±7.0	3.8±0.5

16%；淹水条件下施用有机肥和化肥对水稻生物干重和吸锰量的影响很小。两土壤比较，灰棕潮土因水稻生物干重和地上部锰浓度较高，其水稻吸锰量高于灰潮土 3—5 倍(表 3)。

2.3 不同水肥状况对土壤剖面中锰形态分布的影响

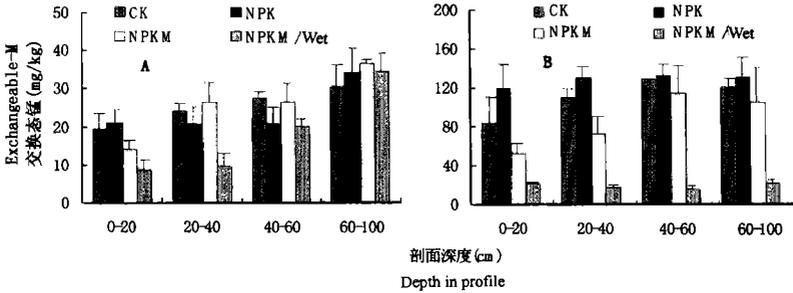
2.3.1 DTPA 态锰 图 2 是种植水稻后不同水肥处理下土壤剖面中 DTPA 态锰的空间分布情况。从图中可了解,0—20cm 土层 DTPA 态锰含量的排序是: NPKM/W < NPKM < NPK 和 CK, 且随着剖面层次的加深各处理 DTPA 态锰含量呈增加的趋势, 其中水分处理间的差异明显大于施肥处理。另外, 两土壤各处理 DTPA 态锰的含量均高于原旱地土壤, 表明种植水稻有助于加速土壤中锰向 DTPA 态锰的转化。



A. 灰潮土 Grey alluvial soil; B. 灰棕潮土 Grey-brown alluvial soil

图2 水肥状况对土壤剖面中DTPA态锰含量的影响

Fig.2 Effect of water and fertilization on contents of DTPA-Mn in soil profile



A. 灰潮土 Grey alluvial soil; B. 灰棕潮土 Grey-brown alluvial soil

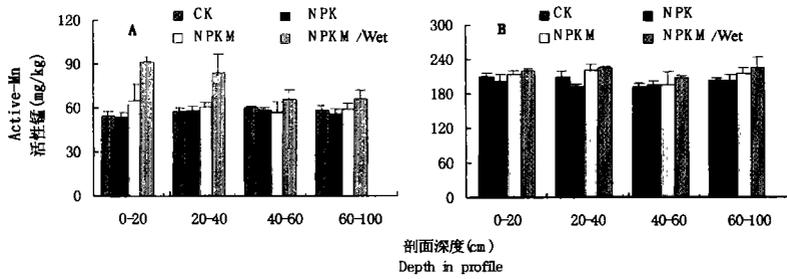
图3 水肥状况对土壤剖面中交换态锰含量的影响

Fig.3 Effect of water and fertilization on contents of exchangeable Mn in soil profile

2.3.2 交换态锰 土壤剖面中交换态锰的空间分布和处理间差异与土壤 DTPA 态锰基本一致(图 3), 即 0—20cm 土层交换态以 NPKM/W < NPKM NPK 和 CK, 并随剖面深度的增加其含量也有较大程度的提高, 但处理间差异变小。有所不同的是, 淹水种稻后土壤中交换态锰比种稻前(表 1)增加的幅度要远高于 DTPA 态锰, 这也说明交换态锰是一种更易受水肥状况影响的土壤锰素形态。

2.3.3 活性锰 土壤剖面中活性锰的含量和分布(图 4)与 DTPA 态锰和交换态锰相反, 其含量排序是: CK 和 NPK NPKM < NPKM/W, 随着剖面层次的加深其含量呈下降的趋势, 而各处理活性锰含量均低于供试土壤; 两土壤相比, 灰潮土处理间的差异远远大于灰

棕潮土。

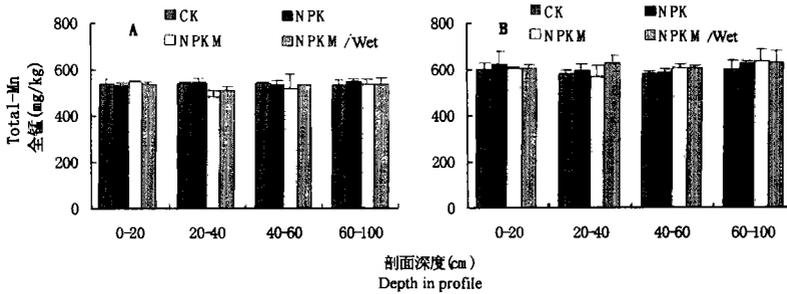


A. 灰潮土Grey alluvial soil; B. 灰棕潮土Grey-brown alluvial soil

图4 水肥状况对土壤剖面中活性锰含量的影响

Fig.4 Effect of water and fertilization on contents of active Mn in soil profile

2.3.4 全锰 全锰在土柱剖面中变化不大,不同水肥处理间也无明显的差异(图 5),这与全锰含量远远高于其它锰形态,水肥状况的影响还难以在较短的时间内(仅一季水稻)表现出来有关。



A. 灰潮土Grey alluvial soil; B. 灰棕潮土Grey-brown alluvial soil

图5 水肥状况对土壤剖面中全锰含量的影响

Fig.5 Effect of water and fertilization on contents of total Mn in soil profile

3 讨论

3.1 水肥状况与锰的活化淋溶

锰是土壤中易受氧化还原状况影响的矿质元素,土壤淹水种稻后,由于有机质的嫌气分解导致土壤氧化还原电位的下降,从而引起锰氧化物的还原和溶解并随渗漏水向下淋溶^[10,11]。本试验的结果表明(图 1、表 2),淹水条件下锰的淋溶总量(即迁移出 1 米土体中的锰)高出湿润处理数倍乃至数十倍之多,相当于造成灰潮土表层土壤锰的损失达 15—20mg/kg,灰棕潮土则为 5—12mg/kg,而湿润条件下锰的淋溶远小于此。这说明锰的活化、淋溶与淹水的程度密切相关。与之比较,施用有机肥和化肥对锰要小得多。特别值得一提的是,猪粪的施用虽然可在短期内加剧锰的还原淋失(图 1),但却没有增加整个水稻生育期内锰的淋溶。这表明淹水种稻条件下适量施用有机肥不一定加剧土壤锰的淋溶。另外,作者在同一土柱试验中测定了渗漏水中铁、铜、锌的浓度,结果发现这些元素的迁移

能力均不如锰强¹⁾,这也从一个侧面反映出锰相对易受水肥状况影响的特点。

3.2 水肥状况与水稻对锰的吸收耗竭

有人研究^[8]认为,淹水种稻期间耕层锰的还原淋失和水稻对锰的耗竭是造成旱作小麦缺锰的主要原因。但对二者所起作用的相对大小尚没有明确的认识。从本试验的结果(表3)可知,淹水条件下水稻对锰的吸收量较为可观,依次为灰潮土每土柱4.2mg,灰棕潮土每土柱在20mg以上,甚至超过锰的淋失总量。由此可见,土壤类型是决定锰淋失量和吸收耗竭量相对大小的关键,即对粗质地、高pH的灰潮土剖面中锰的淋失是引起土壤锰素损失的主要途径,而对质地较粘、pH较低的灰棕潮土剖面中锰的淋失和水稻对锰的吸收耗竭所起作用大致相当。

3.3 水肥状况与土壤中锰的转化

水稻土剖面中锰的空间变异显然是淹水后锰活化、淋溶、淀积的最终结果^[12,13]。模拟土柱试验的结果(图2—图5)则进一步量化了这种锰的空间变异,即随着淹水程度的增加土壤中活性锰含量(主要是易还原氧化锰)下降幅度加剧,而DTPA态锰和变换态锰的含量则随淹水程度的增加而提高,并在剖面中表现出明显的淀积特征。这就是说,淹水后土壤矿物态锰和易还原氧化锰向DTPA态锰、交换态锰和水溶态锰等锰形态方向的转化,并使锰在整体上向剖面中、下部移动,试验中还发现了土柱底部有深褐色的氧化锰淀积物。其结果必然是引起土壤中锰的大量淋溶和水稻对锰的奢侈吸收,造成耕层土壤有效锰库(活性锰)的不足。事实上,这也可从冲积性土壤连续水旱轮作一定年限后耕层有效锰和全锰的含量迅速下降得到进一步证实^[7]。

应该指出的是,水肥状况对土壤锰素转化的影响随土壤类型不同而有所差别。同样是冲积土,灰潮土中锰的淋溶和各种锰形态之间的变化明显大于灰棕潮土,这可能与前者质地较轻(表1),因而锰容易还原淋失有关。这也解释了为何在田间水旱轮作条件下灰潮土上小麦普遍出现严重的缺锰,而灰棕潮土目前尚无此现象的原因。但从锰的活化淋溶与空间分布的共同趋势来看,长期水旱轮作条件下也有诱发小麦缺锰的可能。

土壤中锰的转化运移是受水分、pH、Eh、有机质、氧化物状况及微生物等许多因素综合影响的结果^[3,12-14],而水肥状况无疑是可以人为调控的重要措施,并且在我国长期栽培水稻过程中积累的丰富的灌溉经验^[15]也可充分加以利用。从本土柱试验亦可看出,人们能够通过水分管理措施,如改淹水为湿润灌溉来调控土壤中锰的运移和空间分异,从而减缓表层土壤中锰的淋失及剖面中锰向下迁移的程度。

4 小结

淹水种稻条件下土壤中的锰处于由易还原的锰氧化物向活性高的DTPA态、交换态及水溶态锰转化的过程,其结果必然引起土壤中锰随渗漏水淋失至土体深层并引起水稻对锰的奢侈吸收。土壤中锰的这一行为受到土壤类型和水肥状况的影响,质地较轻、有石灰反应的灰潮土中锰在淹水种稻期间的损失比灰棕潮土更为明显,而湿润灌溉可以显著

1) 刘学军. 四川水旱轮作土壤中小麦缺锰的机理与防治对策研究. 中国农业大学博士学位论文. 1997年6月

减缓土壤中锰淋溶损失和水稻对锰的奢侈吸收,从而避免耕层土壤有效锰库绝对量的下降。

参 考 文 献

1. 丁昌璞,于天仁. 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,1958,6(1):99—107
2. Ponnampetuma F N. The chemistry of submerged soils. Adv. Agron., 1972, 24:29—96
3. 李庆远主编. 中国水稻土. 北京:科学出版社,1992. 3—18
4. 胡思农等. 温江地区小麦锰肥试验研究. 土壤,1981,3(1):100—103
5. Takkar P N, Nayyar V K. Preliminary field observation of manganese deficiency in wheat and berseem. Fert. News, 1981, 26:22—23, 33
6. Takkar P N, Nayyar V K. Micronutrient deficiencies in wheat and their control. Prog. Fmg., 1983, 19:17—19
7. 吕世华. 水旱轮作土壤锰素状况与锰肥施用. 四川农业大学学报,1992,10(1):75—79
8. 吕世华,刘学军,张福锁. 21世纪四川小麦缺锰趋势与防治对策研究. 中国科协第二届青年学术年会四川卫星会议论文集(下册). 重庆:西南交通大学出版社,1995. 568—572
9. Nayyar V K, Sadana U S, Takkar T N. Methods and rates of application of Mn and its critical levels for wheat following rice on coarse textured soils. Fert. Res., 1985, 8:173—178
10. 杨林章,徐 琪,熊 毅. 水分状况对红壤母质中物质移动及稻麦生物量的影响. 土壤学报,1987,24(2):199—209
11. 张甘霖,龚子同. 淹水条件下土壤中元素迁移的地球化学特征. 土壤学报,1993,30(4):355—364
12. Gotoh S, Patrick W H. Transformation of manganese in waterlogged soil as affected by redox potential and pH. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1972, 38:66—71
13. 徐 琪. 水稻土的研究进展. 土壤,1989,21(1):192—195
14. Marschner P et al. Effect of manganese-reducing rhizosphere bacteria on the growth of *Gaeumannomyces graminis var tritici* and on manganese uptake by wheat. Soil Fert. Soils, 1991, 12:33—38
15. 赵其国. 水稻耕制中的水土管理. 土壤学报,1991,28(3):249—259

EFFECT OF WATER AND FERTILIZATION ON MOVEMENT OF MANGANESE IN SOILS AND ON ITS UPTAKE BY RICE

Liu Xue-jun¹ Lü Shi-hua² Zhang Fu-suo³ Mao Da-ru⁴

(1,3,4 Dept. of Plant Nutrition, Chinese Agricultural University, Beijing 100094)

(2 Institute of Soil and Fertilizer, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066)

Summary

Mn deficiency of wheat is a main problem of plant nutrition in Sichuan Province, which was considered to be relation closely with paddy-upland rotation. An experiment with model soil-column was conducted to study the characteristics of Mn movement and its uptake by rice (*Oryza sativa* L.) in two alluvial soils under different water and fertilization status. It was found that soil active Mn (easily reducible Mn) decreased while DTPA-Mn and exchangeable Mn increased as soil was waterlogged, which caused the Mn leaching through 1 meter soil column and its excessive uptake by rice plant. The total storage of available Mn thus decreased. The effect of water and fertilization on Mn followed the following sequence: CK > NPK and NPKM (the above treatments were waterlogged) \gg Wetting with NPK fertilizer (NPKM/Wet). The sequence of DTPA-Mn and exchangeable Mn in soil layers (especially 0—20cm) was CK and NPK > NPKM \gg NPKM/Wet > the original upland soil, but active Mn in soil was reverse. This phenomenon was more obvious in gray alluvial soil than in gray-brown alluvial soil. It showed that Mn is an active element which is easily affected by water and fertilization status, and wetting treatment can slow down the Mn transformation in soil and decrease the uptake of Mn by rice plant greatly. Therefore, to adjust the transformation of Mn in soil and its availability to plant through the management of water status would be practicable.

Key words Water and fertilization status, Soil, Manganese, Leaching, Space variation, Rice