

土壤水分状况对物质移动及作物生长的影响*

张喜群 徐琪 熊毅

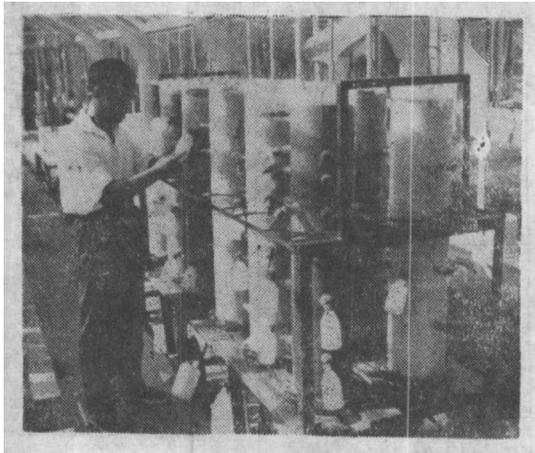
(中国科学院南京土壤研究所)

水分状况不仅影响水稻土的发生性质^[9,10,26],也影响水稻土生态系统的生产力。当稻田灌水量满足蒸发、蒸腾和渗漏需要时,水稻可获高产;如水分过多,反不利于水稻生长。太湖与华南等大面积种植双季稻地区,多因地势低平,土质粘重,土壤排水不良,引起了次生潜育作用,出现青泥层^[2,5,6],致使三麦常受渍害,水稻迟发。从而削弱了水稻土生态系统功能的发挥。

为了进一步探讨水分状况对土壤的影响,本文采用模拟土柱试验,研究不同水分状况下,土壤中物质淋淀、剖面分化、形成以及对生物产量的影响。

一、试验设计和土样性质

(一) 试验设计 过去研究土壤水分状况^[1,2,3,4],多从土壤剖面的性态来判断。本文采用生态样块的研究方法^[4,22,23],模拟试验是在温室内进行的。照片1中的前排五个土柱系由太湖地区采集的五种原状土剖面,自左向右分别为漏水、囊水、爽水、滞水和侧渗型水稻土。后排为不同水分类型的模拟土柱。模拟土置入长100厘米,直径20厘米的有机玻璃筒中,模拟田间不同水分类型,模拟土的基本情况见表1。为了测定溶解氧、Eh与收集渗液,在筒壁上开有测定孔和收集装置。筒内分别种植水稻与小



照片1 模拟土柱试验的装置

Photo. 1 The modeling soil columns

* 本文系张喜群硕士论文的一部分,刘多森同志对本文的数学处理给予很多帮助,南京土壤研究所生态组及新技术室亦协助本项工作,在此一并致谢。

表 1 模拟土柱的基本情况
Table 1 The experiment condition of modeling soil column.

模拟土柱号 Model column No.	水分类型 Water regime type	每筒装填土重 (斤) Soil weight (jin/per column)	稻季日渗漏 (mm/day) Percolation of water in rice growing season	麦季控制水位 (cm) Ground water level in wheat growing season	加入耕层有机质量 (g) O. sub. applied in plowed layer		加入耕层化肥量 (g) Fertilizer applied in plowed layer	
					稻草	紫云英	(NH ₄) ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄
模 Model 1	漏水 Percolating	75	28.6	无水位 No ground water	75.0	37.5	5.0	1.0
模 Model 2	积水 Waterlogging	75	1.0	距土表 20—30	75.0	37.5	5.0	1.0
模 Model 3	爽水 Permeable	75	14.3	距土表 70—80	75.0	37.5	5.0	1.0
模 Model 4	滞水 Stagnating	75	4.8	距土表 40—50	75.0	37.5	5.0	1.0
模 Model 5	侧渗水 Side bleaching	75	35.0 (其中侧渗 6.4)	无水位	75.0	37.5	5.0	1.0

注: 1. 稻季日渗漏没有考虑蒸发蒸腾量,以日加水量代表日渗漏量。2. 有机质、化肥是加入 20 厘米表土中。

表 2 供试下蜀黄土的基本性质 (土号生研 006, 采自溧阳县竹簪农场)
Table 2 The physical-chemical properties of Xiaoshu loess (sample No. 006 Liyang county)

采样深度 (cm)	pH (H ₂ O)	有机质 O. M. (%)	全氮 Total N (%)	C/N	代换量 (meq/100g soil)	各级颗粒(毫米)含量(%) Texture (mm)		主要化学组成(占烘干土%) Chemical composition (dry soil%)*						
						<0.001	<0.01	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	MnO
30—50	6.1	1.06	0.071	8.31	11.49	22.8	48.4	72.4	13.3	5.07	1.50	0.366	0.731	0.065

* 除注明为烘干外,其余均为风干土,下同。

麦, 分期分层测定溶解氧、Eh 值以及渗滤液组成等。为了避免作物生长带来的影响, 室内另设两个模拟筒作对照, 其一不加有机物, 其二加入高于上述五个筒一倍的有机物, 水分状况同模拟 3, 也作了相同的测定与分析。分析方法主要参考文献[1], 从略。

(二) 下蜀黄土的基本性质 鉴于太湖地区有相当面积的水稻土发育在下蜀黄土母质上, 因此, 采用下蜀黄土做为模拟试验材料, 其基本性质如表 2。

二、结果与讨论

(一) 模拟土柱溶解氧的动态变化

土壤淹水后, 氧向土体内的扩散明显受阻, 氧在水中的扩散系数仅为在空气中的万分之一^[10], 据研究^[21] 水稻土淹水层溶解氧的含量随昼夜、pH 值、日照强度以及作物种类的不同而变化。通过模拟土柱分层溶解氧的动态测定的平均值(图 1)证明, 在淹水期间, 各模拟土柱与大气相接的表层, 始终有一红棕色的氧化层, 淹水层中, 由于藻类的光合作用, 溶解氧的含量常常高于该温度下溶解氧的饱和值(图 1)。溶解氧的含量在耕层内有明显的减少, 耕层以下随土层深度也有逐渐减少的趋势。从各模拟土柱的比较可看出溶解氧的含量受水分类型的制约, 即日渗漏量愈大, 溶解氧的含量愈高; 反之则低。

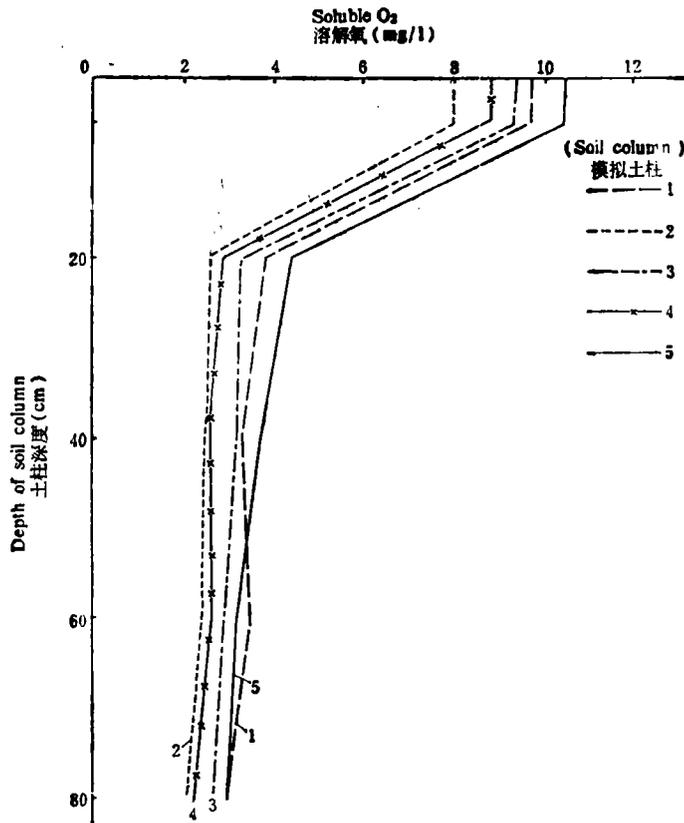


图 1 模拟土柱中溶解氧的平均值

(注: 图 1—5 中的曲线编号分别同于表中模 1—5。)

Fig. 1 Average of soluble O₂ in soil column

(二) 模拟土柱 Eh 值的动态变化

季节性淹水所引起的氧化还原过程是水稻土形成的重要特点。土壤中易分解的有机质含量和氧化剂含量的相互关系是制约土壤还原强度的最基本因素^[3,12,20]。模拟土柱淹水后,曾分层动态测定各层土柱的 Eh 值,并将土柱中 8 厘米深处在淹水后不同时期的 Eh 值绘制曲线(图 2),说明水稻土中 Eh 的变化规律。淹水初期,五种模拟土柱的 Eh 值均迅

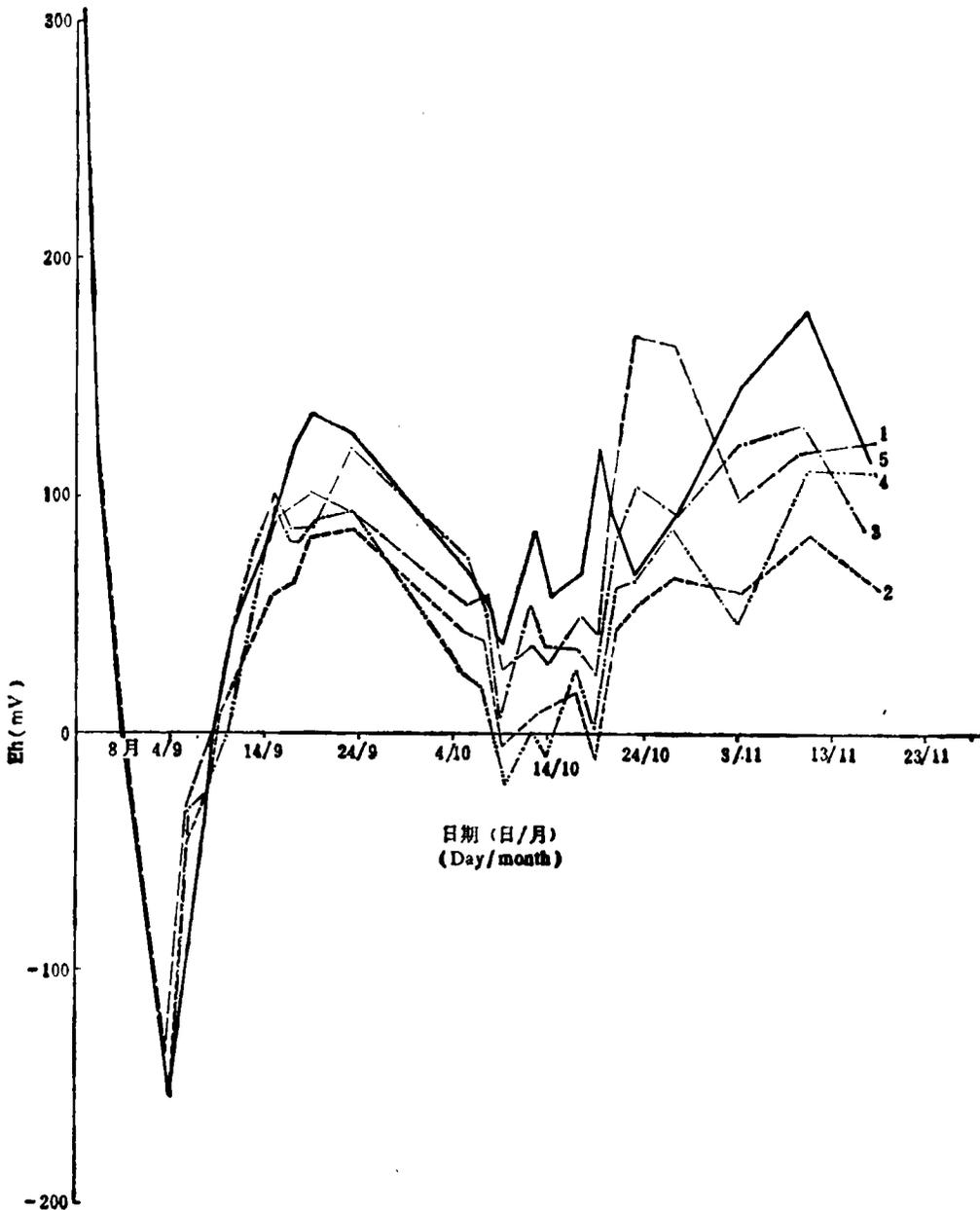


图 2 模拟土柱中 8 厘米深的 Eh 值动态变化

Fig. 2 Variation of Eh value in surface layer of soil column in the depth of 8cm

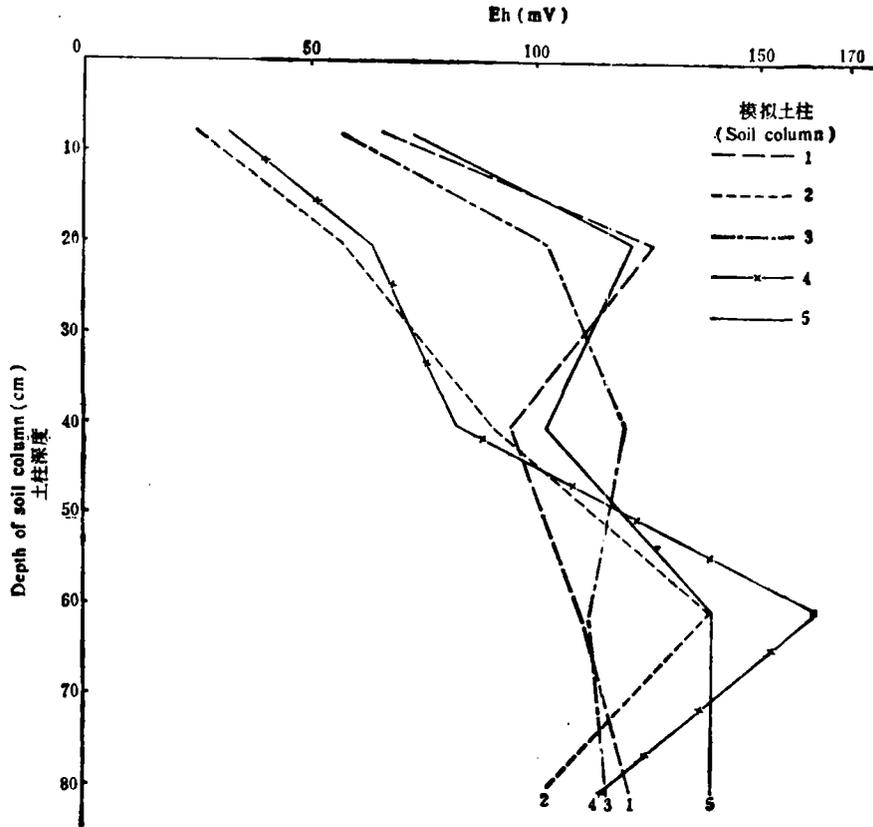


图3 模拟土柱中 Eh 的分层平均值

Fig. 3 The Eh value distribution in soil column

速降至-150 毫伏左右,可能是受高温下微生物嫌气分解的影响,随后各土柱的 Eh 值回升,虽仍有升降变化,但一直维持在 0—180 毫伏左右。Eh 值的动态测定说明:尽管 Eh 值的测定简单易行,但要得到一个重现值是相当困难的^[4]。此处 Eh 值只是说明土壤氧化还原总的状态与水分状况是影响 Eh 值变化的因素之一。由各土柱的平均 Eh 值(图 3)可以看出,Eh 随土柱日渗漏量的减少而降低,在 20 厘米土层中,表现得尤为明显。渗漏量少的囊水和滞水土柱(模 2、4)的平均 Eh 值都低于渗漏量多的漏水和侧渗土柱(模 1、5),充分说明各模拟土柱之间氧化还原状况的差异,这必然会影响到铁锰还原及其它矿质元素的活化与淋溶。

(三) 模拟土柱中矿质元素的活化与淋失

在氧化还原过程交替影响下,水稻土中的某些矿质元素产生还原淋洗与氧化淀积现象,既影响土壤剖面的分化,又影响土壤养分的活化与淋失以及作物生长。

1. 渗液液矿质元素组成的动态测定 通过各层渗液的五次动态分析(稻季三次,麦季两次)可以看出,淹水初期,由于 Eh 值的急剧下降,各土柱均处于较强的还原状态(-150 毫伏左右),致使高价铁锰还原成低价铁锰,各土柱渗液中均有较高浓度的

Fe^{++} 和 Mn^{++} 。日渗漏量少的囊水、滞水土柱(模 2、4)其 Eh 更低, Fe^{++} , Mn^{++} 的含量相对较高, 表层可达 40—50ppm, 随淹水时间加长, Eh 值回升, 各土柱处于中等还原状态 (Eh 约 0—180 毫伏), 土壤溶液中 Fe^{++} 和 Mn^{++} 的含量下降, 在小麦栽培期间, 不受人为水位控制的漏水和侧渗土柱(模 1, 5)含 Fe^{++} 和 Mn^{++} 甚微, 而受人为水位控制的囊水和滞水土柱(模 2, 4), 在 60 厘米土层以下, Mn^{++} 的相对浓度则较高。

模拟土柱中铁锰的还原, 还可以引起钙、镁、磷、钾等元素的活化, 这些元素在土柱内的迁移受水分类型的制约。淹水初期, 日渗漏量较大的漏水、爽水和侧渗土柱(模 1, 3, 5), 土壤溶液中 Ca, Mg 的浓度以土柱底层最高, 而日渗漏量少的囊水、滞水土柱(模 2, 4), Ca, Mg 的最高浓度出现在第 2 层, 随淹水时间加长, 囊水、滞水土柱(模 2, 4)中 Ca, Mg 的最高浓度向第 3、4 层以至最底层迁移, 由此可见, 土壤淹水还原后, 矿质元素的活化与迁移密切受水分类型的制约, 因此各模拟土柱中矿质元素的动态变化是不同的。

2. 矿质元素的淋失方程 根据各模拟土柱渗液中矿质元素的动态测定, 按下式计算矿质元素的淋失强度。

$$Y = (M_1 - M_2)X$$

式中 Y 为某种矿质元素的淋失强度(毫克/日), M_1 为模拟土柱 100 厘米深处某种矿质元素的浓度(毫克/升), M_2 为灌溉水中某种矿质元素的浓度(毫克/升), X 为模拟土柱的日渗漏水量(升/日)。

在土柱淹水后的不同时期, 根据上述公式计算出不同土柱五种矿质元素的淋失强度。由表 3 可以看出, 模拟土柱中矿质元素的淋失强度与淹水日期和日渗漏水量密切相关。据此, 建立矿质元素淋失的曲线方程, 以表达不同水分条件下, 模拟土柱中矿质元素的淋失状况。

模拟土柱淹水初期(9 月 23 日)矿质元素的淋失强度, 以 $Y = aX^b$ 表示, Y 为淋失强度(毫克/日), X 为日渗漏水量(升/日)。

$$Y_{Ca} = 72.5X^{0.753} \quad (1)$$

$$Y_{Mg} = 44.1X^{0.815} \quad (2)$$

$$Y_{Fe} = 5.46X^{1.72} \quad (3)$$

$$Y_{Mn} = 13.34X^{1.07} \quad (4)$$

$$Y_K = 5.19X^{0.809} \quad (5)$$

模拟土柱淹水中期(10 月 25 日)矿质元素的淋失强度以 $Y = aX^b e^{-cx^2}$ 表示。

$$Y_{Ca} = 80.1X^{0.826} e^{-1.49x^2} \quad (6)$$

$$Y_{Mg} = 39.9X^{0.830} e^{-1.10x^2} \quad (7)$$

$$Y_{Fe} = 4.67X^{1.68} e^{-0.535x^2} \quad (8)$$

$$Y_{Mn} = 18.4X^{1.09} e^{-1.81x^2} \quad (9)$$

$$Y_K = 3.86X^{0.304} e^{-3.02x^2} \quad (10)$$

模拟土柱淹水后期(11 月 27 日)矿质元素的淋失强度以 $Y = aX^b e^{-cx^2}$ 表示。

$$Y_{Ca} = 62.1X^{0.656} e^{-1.73x^2} \quad (11)$$

$$Y_{Mg} = 33.0X^{0.659} e^{-1.13x^2} \quad (12)$$

$$Y_{Fe} = 29.6X^{1.96} e^{-3.89x^2} \quad (13)$$

表 3 矿质元素的淋失强度(毫克/日)

Table 3 Eluviation intensity of elements in soil (mg/day)

模拟土柱号 Module No.	1981年9月23日(初期)					1981年10月23日(中期)					1981年11月27日(后期)				
	Ca	Mg	Fe	Mn	K	Ca	Mg	Fe	Mn	K	Ca	Mg	Fe	Mn	K
模 1	63.3	37.3	3.50	9.99	5.85	22.4	15.3	1.16	3.76	0.306	14.9	12.5	1.07	3.87	0.459
模 2	4.83	2.40	0.019	0.318	0.333	4.23	2.07	0.020	0.402	0.172	5.68	2.94	0.030	0.180	0.195
模 3	39.2	24.3	3.34	7.92	2.22	28.0	14.9	2.61	5.45	1.02	21.2	11.9	2.53	4.84	0.922
模 4	20.1	10.2	0.100	1.48	1.02	18.2	9.14	0.055	2.18	0.687	22.1	12.7	0.786	3.03	0.924

$$Y_{Mn} = 12.5X^{0.771}e^{-1.36x^2} \quad (14)$$

$$Y_K = 3.70X^{0.816}e^{-2.52x^2} \quad (15)$$

中外土壤学者,多从物质循环角度研究矿质元素的得失。Frissel^[29]等报道了土壤库中氮、磷、钾元素的平衡问题。Patrick^[11,13]等指出淹水条件可以提高某些养分的有效性。但也易造成氮、磷、钾的损失。有人^[29]研究了土壤表层碳素与氮素含量同气候因素的相关性。但这种研究是有条件的。模拟土柱矿质元素淋失方程能较好地反映淹水不同日期,矿质元素淋失强度与水分类型(日渗漏水量)的关系,可进一步说明水稻土剖面分化和矿质营养元素的淋失状况。这对水稻土生态系统中物质循环的研究是有一定意义的。

3. 矿质元素的活化与指标相关阵的建立 土壤中矿质元素的组成及其转化是十分复杂的,渍水土壤中某些矿质元素的有效性提高,而有的则反而下降。当土壤淹水及 Eh 值降低时,变化明显的是 Fe⁺⁺⁺ 还原成 Fe⁺⁺, Mn⁺⁺⁺ 还原成 Mn⁺⁺^[10,18,19],故一般都承认铁锰是土壤无机氧化还原体系中最重要体系。不少土壤学家^[3,13,15,18,24]均研究过渍水土壤与冲积土中铁锰体系的变化。但 Fe⁺⁺、Mn⁺⁺ 对某些矿质元素的活化影响,以及各矿质元素之间活化时的相互关系,目前系统的研究材料尚不多。

为了探讨淹水条件下,矿质元素总的淋溶特点及其相互关系,将7个模拟土柱的五次测定值予以平均,共35个平均值。通过计算分析得到矿质元素的相关阵,表4表明,土壤溶液中 Ca⁺⁺、Mg⁺⁺ 的浓度与水溶性 Fe⁺⁺ 的浓度呈正相关,钙镁并不直接受 Eh 值的影响,而是受其间接影响。Yamane^[14]断言土壤淹水还原后,由于 Fe⁺⁺ 取代土壤胶体吸附的 Ca⁺⁺,而使土壤溶液中 Ca⁺⁺ 的浓度提高,从而加强土壤的淋溶作用。另外,相关阵表明,土壤溶液中 Ca⁺⁺、Mg⁺⁺ 的浓度与水溶性 Mn⁺⁺ 的含量呈正相关,并且相关性十分显著($r > 0.928$)。Ca⁺⁺、Mg⁺⁺ 浓度同 Mn⁺⁺ 的相关系数高于同 Fe⁺⁺ 的相关系数,可能是土柱中还原强度较弱(0—180毫伏),锰的溶解度高于铁的溶解度。土壤溶液中 K⁺ 的浓度与水溶性 Fe⁺⁺、Mn⁺⁺ 的含量呈正相关,并且相关性十分显著。Goswami^[31]认为,土壤淹水后,由于 Fe⁺⁺、Mn⁺⁺ 的增加而发生离子交换作用,使溶液中 K⁺ 的浓度提高。

磷在淹水土壤中的变化也是很多土壤学者关心的问题。Ponnamperuma^[18]和 Goswami^[31]从六个不同方面说明了对磷的活性提高的原因。尽管两人的观点并不十分一致,但都承认磷酸铁的还原是磷有效性提高的主因。矿质元素相关阵也说明磷与水溶性 Fe⁺⁺、Mn⁺⁺ 的含量呈正相关。Patrick^[13]认为土壤淹水后水稻土中可溶性硅一般趋向增加,可能是吸附态硅和闭蓄态硅从铁、铝氧化物中释放出来或淹水后由 pH 增高引起的。Ponnamperuma^[18]也认为是解吸作用的结果。从相关阵分析看, Si 与水溶性 Fe⁺⁺、Mn⁺⁺ 的含量

表 4 模拟土柱中矿质元素的相关阵(自由度=33)

Table 4 Correlation matrix of elements in soil column (d. f = 33)

相关系数 r		元素 Elements							
		1	2	3	4	5	6	7	8
元素 Elements		Ca	Mg	Fe	Mn	K	P	Al	SiO ₂
1	Ca	1.00							
2	Mg	0.996	1.00						
3	Fe	0.558	0.516	1.00					
4	Mn	0.944	0.928	0.752	1.00				
5	K	0.850	0.819	0.826	0.918	1.00			
6	P	0.674	0.661	0.571	0.738	0.786	1.00		
7	Al	0.146	0.104	0.233	0.187	0.317	0.462	1.00	
8	SiO ₂	0.047	0.017	0.263	0.060	0.380	0.217	0.302	1.00

的相关性并不显著,铁与硅的相关系数为 0.263,锰与硅的相关系数仅为 0.060。硅可溶性的提高,是否与 pH 升高有关,有待验证。淹水土壤中铝的活化研究较少,一般认为铝在淹水后变化不明显,而 Brinkman^[27] 认为淹水后,铝也有所迁移,但铝的活化机理是一个未解决的问题。相关阵说明铝与水溶性 Fe⁺⁺、Mn⁺⁺ 含量的相关性很不显著。有人认为是^[3]铝的活化与 pH 值有关。此外,相关阵也清楚地表明了 Ca、Mg、K、P 元素之间的相关性,说明 Ca 同 Mg、K、P, Mg 同 K、P 以及 K、P 之间均呈正相关,且相关性显著。而 Si、Al 同 Ca、Mg、K、P 相关性均不显著。矿质元素相关阵的建立较好地阐明了矿质元素活化与铁、锰还原的相关性。

4. 主组元的土壤发生学意义 矿质元素相关阵的建立阐述了八种矿质元素之间的相互关系。为了说明模拟土柱淹水后,八种矿质元素的活化富集与淋失过程,采用了主组元分析^[8]。

不同的主组元代表了模拟试验中同时存在的而又各不相同的土壤发生学过程。各个主组元的贡献率,反映了相应的土壤发生学过程在模拟试验中的重要性的相对大小,从表 5 列出的前三个主组元的贡献率看出,这三个主组元代表的土壤发生学过程,是模拟试验中的三个主要过程。其中尤以第 1 主组元代表的过程更为重要。

八种矿质元素对第 1 主组元均有正向负荷,说明淹水后,各矿质元素活性均有提高,但以 K、Mn、Ca、Mg、P、Fe 的负荷较大,说明土壤淹水还原后,上述六种元素的活化度较高。随模拟土柱淹水时间延长,矿质元素的淋溶作用增强,土壤溶液中矿质元素浓度降低,反映为第 1 主组元的减少。

第 2 主组元的土壤发生学意义,是在土壤溶液矿质元素活化富集程度大体相同条件下, Mg、Ca、Mn 淋失作用的量度。Mg、Ca、Mn 对第 2 主组元有较强的逆向负荷,而其它五种元素均是正向的,并且 SiO₂ 和 Al 的正向负荷较大,这似乎说明在 Mg、Ca、Mn 淋失的同时,伴随着 SiO₂ 和 Al 的富集作用。

第 3 主组元的土壤发生学意义,是在土壤溶液矿质元素活化富集程度及 Mg、Ca、Mn 淋失程度大体相同的条件下、SiO₂、Fe、K 的淋失作用和 Al、P 富集作用的量度。SiO₂、Fe、

表 5 前三个主组元的贡献率和正规化特征向量

Table 5 Variances and eigenvectors of the 1st, 2nd and 3rd principal components

主 组 元	1	2	3	
特征值 (λ_i) Eigenvalues	5.01	1.38	0.773	
贡献率 (%) Percentage of variance	62.6	17.3	9.67	
累积贡献率 (%) Acumulated variances	62.6	79.9	89.6	
特征向量 Eigenvectors	元 素 Elements			
	Ca	0.411	-0.252	0.034
	Mg	0.401	-0.289	0.038
	Fe	0.348	0.119	-0.288
	Mn	0.432	-0.183	-0.009
	K	0.435	0.092	-0.169
	P	0.373	0.153	0.289
	Al	0.151	0.589	0.683
	SiO ₂	0.109	0.654	-0.579

K 对第 3 主组元有较强的逆向负荷, 而 Al、P 则有较强的正向负荷。但第 3 主组元的贡献率小(表 5), 在整个模拟试验过程中所反映的 SiO₂、Fe、K 淋失作用和 Al、P 相对富集作用是微弱的。

(四) 模拟土柱的剖面分化

模拟土柱中矿质元素的活化、淋失与水分类型有密切关系, 从而影响了铁、锰在剖面中的淋溶淀积, Kanno 等人^[28,30]认为, 土壤淹水后产生了一系列物理化学性质的变化, 因而也导致了水稻土剖面层次的变化, 并且强调指出水分条件不同, 水稻土形成的层次和顺序也是不同的, Mitsuchi^[26]研究了水稻土剖面随水分条件改善的变化规律, 并定名为爽水序列。中、日土壤学者^[3,30]均注意研究铁、锰在水稻土剖面中淋溶淀积的特点。陈家坊¹⁾认为土壤中氧化铁的形态和各种性质, 显然是成土过程和成土环境的反映, 并把土壤中铁、锰化合物的转化归结为老化过程和活化过程。何群^[32]等报道, 土壤加入有机质淹水还原后, 活性与游离铁的活化度提高。由于铁、锰的淋溶淀积受水分类型的影响, 不同水分类型条件下, 有可能形成不同的水稻土土体构型, 所以也同时研究了铁、锰在模拟土柱中的分化。经过稻、麦栽培后(约一年时间)分层采取土样, 进行游离铁, 锰和活性锰的测定^[3]。结果表明(表 6), 淹水后, 模拟土柱的游离铁含量与下蜀黄土相比较, 各土柱各层均处于累积态。其原因可能有二, 一是土壤淹水后有利于铁的活化, 二是模拟试验处于较弱

1) 陈家坊 1982, “氧化物”(未刊稿)。

表 6 游离铁、锰与活性锰在土柱中的分布 (占烘干土)

Table 6 The distribution of iron and manganese in soil column (dry soil %)

土号及模拟土柱号 Model soil column No.	采样深度 (cm) Sampling depth	游离铁 (%) Free Fe (Fe ₂ O ₃)	累积度 (%) Accumulation rate	游离锰 (MnO mg/100g soil) Free Mn	累积度 (%) Accumulation rate	活性锰 (MnO mg/100g soil) Active Mn	累积度 (%) Accumulation rate
生研 006	30—50	3.42	0	55.4	0	36.4	0
模 1 (漏水) Model 1 (percolating)	10	3.96	15.8	36.9	-33.4	21.9	-39.8
	20	3.92	14.7	47.3	-14.6	32.6	-10.4
	40	3.81	11.4	52.7	-4.87	37.5	3.02
	60	3.95	15.5	52.7	-4.87	33.8	-7.14
	80	3.43	0.292	55.5	0.181	44.1	21.2
模 2 (囊水) Model 2 (Waterlogging)	10	3.96	15.8	38.9	-29.8	23.5	-35.4
	20	3.96	15.8	60.4	9.03	34.3	-5.77
	40	3.87	13.2	79.7	43.9	54.1	48.6
	60	4.07	19.0	75.3	35.9	44.2	21.4
	80	4.01	17.3	67.4	21.7	54.4	49.5
模 3 (爽水) Model 3 (Permeable)	10	3.82	11.7	37.7	-31.9	28.9	-20.6
	20	3.57	16.1	64.4	16.2	41.0	12.6
	40	4.04	18.1	58.9	6.32	34.2	-6.04
	60	3.69	7.89	62.9	13.5	35.9	-1.37
	80	3.72	8.77	54.1	-2.35	33.6	-7.69
模 4 (滞水) Model 4 (Stagnating)	10	3.94	15.2	39.8	-28.2	24.2	-33.5
	20	4.04	18.1	77.4	39.7	61.2	68.1
	40	3.90	14.0	64.4	16.2	39.9	9.62
	60	3.99	16.7	59.3	7.04	38.6	6.04
	80	4.09	19.6	65.3	17.9	44.6	22.5
模 5 (侧渗) Model 5 (Side bleaching)	10	4.14	21.1	47.1	-15.0	32.1	-11.8
	20	4.00	17.0	49.8	-10.1	30.2	-17.0
	40	3.93	14.9	56.3	1.62	28.1	-22.8
	60	3.83	12.0	54.7	-1.26	31.5	-13.5
	80	4.13	20.8	73.9	33.4	46.1	26.6

注: 累积度 = $\frac{\text{试验前土样} - \text{试验后土样}}{\text{试验前土样}} \times 100$ 。

的还原状态,高价铁向低价铁转化的数量少,土壤渗漏液中铁量少,以原位的淋溶淀积为主,因而在淹水期间铁的淋溶不多。故模拟土柱之间游离铁在剖面中的分异不十分明显(表 6),当然,模拟时间过短也可能是分化不明显的重要因素。

锰在模拟土柱中的分化不同于铁,同下蜀黄土相比,游离锰,活性锰既有淋溶又有淀积,在同样还原条件下,不仅可使锰活化,而且有相当数量的高价锰向低价锰转化,土壤溶液中锰的含量较高,致使活性锰,游离锰在剖面中分化明显,锰不仅表现淋溶与淀积,而且还反映出水分状况对其淋溶淀积的影响,从游离锰和活性锰在模拟土柱剖面中的分布来看,与下蜀黄土相比,可分出三种不同形式,第一,日渗漏量大的、旱季不受控制水位影响的漏水和侧渗土柱(模 1, 5),以淋溶为主;第二,日渗漏量中等的,旱季控制水位 80 厘米

左右的爽水土柱(模 3),是淋溶与淀积大体相当;第三种是日渗漏量少的,旱季控制高水位的囊水和滞水土柱(模 2,4),以淀积为主(表 6)。

造成这种剖面分异的原因可能是:(1)漏水和侧渗土柱(模 1,5),日渗漏量大,锰的淋溶作用强。旱季无地下水位影响,可溶性锰不会随毛管水上升,所以土柱上部不会出现氧化淀积层。而游离和活性锰可从还原作用强的表层向底层迁移,并出现上部淋失,下部累积的现象。侧渗土柱中游离锰在 60 厘米处突然减少,活性锰在 40 厘米处减少,这可能与土柱 60 厘米处开侧渗口有关(日侧渗 200—400 毫升);(2)爽水土柱(模 3)日渗漏量中等,土柱上下层的 Eh 值相差不大,锰在剖面中的分化也不如其它土柱明显,但在 20 厘米和 60 厘米处出现锰的淀积,前者可能是淹水下移的深度,后者可能是控制水位毛管水上升的高度;(3)囊水和滞水土柱(模 2,4),日渗漏量少,表层还原强度高,锰由表层向下淋溶的作用比较强烈,但总的淋溶量是相当少的(表 3)。因此,土柱下部淀积的锰较多,游离锰和活性锰在囊水土柱和滞水土柱中都出现明显的淀积部位,这可能同控制水位有关,因为囊水土柱的控制水位距土表仅 20 厘米,土柱几乎被水饱和,锰由上层淋溶而淀积于 40 厘米左右。滞水土柱的控制水位距土表 50 厘米,土柱上部未被水分饱和,可产生强烈的毛管水上升作用,而将下部水溶性锰带到上层,并淀积于 20 厘米左右。

模拟试验虽短,但从上述可以看出,游离铁、锰,活性锰在土柱剖面中的分异是比较明显的,特别是锰的分异,充分证实水分状况是决定水稻土中物质淋溶淀积的最活跃的因子之一,并将对土壤剖面的分化有深刻的影响。但是,应当强调指出,水稻土剖面的形成往往需要几十年,甚至上百年的时间,本试验只能初步说明水分状况对土壤剖面分化的影响。

(五) 水分状况对作物生长的影响

不同水稻土肥力与作物生长的关系是密切的^[7]。上述可见,不同水分状况对模拟土柱产生的影响,势必也影响土壤对作物的供肥能力与作物生长状况,为此,进行了稻麦栽培试验,并进行了生物量和植株营养物质组成的测定。

表 7 的结果表明,水稻的生物产量与日渗漏量之间有一定的关系,漏水、特别侧渗土柱上的水稻长势比其它三个土柱都差。其它三个土柱的生物产量相似。小麦的生物产量与水分类型的关系更为密切,囊水土柱和滞水土柱上小麦生物产量明显低于其它三个土柱,而爽水土柱的小麦生物产量最高,说明适宜的日渗漏量对水稻和小麦的生长均有利。Chang^[6]曾测定植株营养物质组成以说明土壤对作物的供肥能力,并指出分蘖期稻叶含氮量的临界水平为 2.5%,含钾量的适宜范围为 1.2—2.4%,植株的含磷量受外界的影响较多,模拟试验的测定结果(表 8)略高于上述数值。

表 8 表明,漏水和侧渗土柱水稻茎叶的营养元素组成一般均低于其它三个土柱,特别是 N、P、K 和 SiO₂ 的含量更为明显。说明日渗量大的模拟土柱,其矿质元素和氮的淋失强烈,土壤的供肥能力较低。水稻茎叶矿质元素的组成与淋失状况是一致的。值得注意的是爽水土柱中 N、P 的含量最高,适宜的日渗漏量可能有利于 N、P 的吸收。小麦茎叶的营养元素含量也与控制水位的高低有关。囊水和滞水土柱上生长的小麦因受渍害的影响,小麦根系不易吸收 N、P、K,特别是 K。所以,囊水和滞水土柱小麦茎叶的 N、P、K 含量明

表 7 模拟土柱上的稻麦生物产量*

Table 7 Yield of rice-wheat's grain and straw on soil column

模拟土柱号 Soil column No.	水稻地上部分生物产量 (g) Straw weight		小麦地上部分生物产量 (g) Yield of grain and straw			水稻小麦 合计干重 (g) Dry weight of wheat and rice	生物量(干) 顺序 Sequence No.
	鲜 重 Wet W.	干 重 Dry W.	鲜 重 Wet W.	干 重 Dry W.	其中籽实干重 Grain W.		
模 1	90.5	16.0	80.0	36.8	12.7	52.8	2
模 2	96.5	17.5	38.5	26.1	5.6	43.6	5
模 3	100.0	17.6	103.7	51.5	16.5	69.1	1
模 4	100.3	17.8	40.0	27.3	2.1	45.1	4
模 5	82.7	15.1	75.3	36.7	12.5	51.8	3

* 1981年9月25日水稻插秧。11月26日收获。1981年12月15日播种小麦,1982年4月27日收获。因条件限制,水稻分蘖期进行了收获,原状土同。

表 8 植株茎叶营养元素组成(占烘干物质%)

Table 8 Composition of mineral elements (Dry weight %)

模拟土柱号 Soil column No.	N	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃
水稻 Rice									
模 1	2.53	0.268	0.181	0.117	0.030	0.477	2.04	6.47	0.160
模 2	2.69	0.376	0.278	0.263	0.057	0.570	3.11	7.05	0.341
模 3	2.86	0.393	0.270	0.275	0.043	0.638	2.94	7.22	0.432
模 4	2.84	0.384	0.288	0.281	0.058	0.511	2.73	7.65	0.434
模 5	2.42	0.392	0.230	0.206	0.032	0.493	2.34	6.56	0.298
小麦 Wheat									
模 1	0.821	0.382	0.190	0.046	0.012	0.147	3.05	2.44	0.030
模 2	0.753	0.373	0.145	0.079	0.021	0.112	2.38	2.42	0.097
模 3	0.872	0.372	0.171	0.016	0.010	0.171	2.82	2.32	0.031
模 4	0.722	0.371	0.135	0.078	0.021	0.126	1.51	2.78	0.102
模 5	0.807	0.394	0.180	0.020	0.008	0.168	3.23	2.83	0.045

显低于其它三个土柱(表8),反之,囊水和滞水土柱的小麦茎叶中,Fe、Mn和Al的含量都较高,这也可以说明受控制水位影响的模拟土柱(模2,4),其溶液中铁、锰和铝量都较高的原因。而爽水土柱中小麦茎叶具有较高的N、P、K含量,特别是含N量,与小麦的干物质质量呈正相关。

总之,水分状况不仅是影响水稻土淋溶、淀积的重要因素,而且也是影响土壤养分供应与作物生长的重要条件之一。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所,1978:土壤理化分析。上海科学技术出版社。
- [2] 徐琪等,1980:中国太湖地区水稻土。上海科学技术出版社。
- [3] 于天仁等,1976:土壤的电化学性质及其研究法。科学出版社,399—433页。
- [4] 黄瑞采,1979:从物质实体和“生态系统”来研究土壤。土壤学进展,3期,1—19页。
- [5] 熊毅等,1980:耕作制度对土壤肥力的影响。土壤学报,17卷2期,101—119页。
- [6] 龚子同等,1981:关于水稻土的次生潜育化问题。土壤学报,18卷2期,122—134页。

- [7] 袁从禧等, 1980: 苏南五种水稻土的肥力与作物的相互关系。土壤学报, 17 卷 4 期, 328—334 页。
- [8] 刘多森, 1979: 主组元分析在分辨土壤类型及风化—成土过程上的应用。土壤学报, 16 卷 2 期, 172—182 页。
- [9] 朱莲青, 1938: 生成水稻土的环境和他的变动。地质评论, 4 卷 1 期, 59—76 页。
- [10] 彭拉姆帕鲁马, F. N. 著 (刘志光等译, 1959) 1955: 渍水土壤的化学与水稻生长的关系。科学出版社。
- [11] Patrick, W. H. 等, 1976: 淹水土壤中植物养分的变化。土壤农化, 1 期, 9—27 页。
- [12] Moormarn, F. R. etc., 1978: Rice Soil, Water and Land. pp. 51—102, IRRI.
- [13] Patyick, W. H. etc., 1978: Chemical Change in Soils. Soils & Rice, 361—376, IRRI.
- [14] Yamane, L., 1978: Electrochemical changes in rice soils. Soils & Rice, 392—395, IRRI.
- [15] Tadano, T. etc., 1978: Chemical changes in Submerged Soils and their effect on rice growth. Soils & Rice, 399—416, IRRI.
- [16] Chang, S. C., 1978: Evaluation of the fertility of rice soils. Soils & Rice. 521—538, IRRI.
- [17] Wickham, T. H. etc., 1978: Water Management for Lowland rice: Water requirements and Yield response. Soils & Rice. 623—649, IRRI.
- [18] Ponnampereuma, F. N., 1978: Electrochemical changes in submerged soils and the growth of rice. Soils & Rice, 421—436, IRRI.
- [19] Ponnampereuma, F. N., 1980: Some aspects of the physical chemistry of paddy soils. Proceedings Symposium on paddy soil. 59—90. Science press Beijing.
- [20] Brinkman, R., 1978: Chemical and mineralogical aspects and some practical implications. Soils & Rice. 295—302, IRRI.
- [21] Heckman, C. W., 1979: Rice Field Ecology in Northeastern Thailand. 170—175, The Hague-Hoston, London.
- [22] Jenny, H., 1958: Role of the plant factor in the pedogenic function. Ecology, 39: 5—16.
- [23] Jenny, H., 1980: The Soil Resource. 1—17, 201—206. Springer-Verlag New York.
- [24] Czarowska, K., 1978: Dynamics of soluble forms of manganese and copper in alluvial soils with NPK fertilization. Polish Ecological Studies. Vol. 4, No. 1, 27—36.
- [25] Frissel, M. J., 1978: Cycling of Mineral Nutrients in Agricultural Ecosystem, 280—290. Amsterdam—Oxford—New York.
- [26] Mitsuchi, M., 1975: Permeability Series of Lowland Paddy Soils in Japan. TARQ. Vol. 9. No. 1.
- [27] Brinkman, R., 1979: Ferrollysis: A soil-forming process in hydromorphic conditions, 73—84. Wageningen.
- [28] Otowa, M., 1967: Thermomelature of soil horizon in paddy soils. (English Summary), Bull. Nat. Inst Agr. Sci. B, 18: 1—48.
- [29] Kowal, J. M., 1978: Agricultural Ecology of Savanna 132—168. Oxford Clarendon press.
- [30] Kanno, I., 1978: Genesis of rice soils with special reference to profile development. Soils & Rice 237—250, IRRI.
- [31] Goswami, N. N. etc., 1978: Phosphorus, Potassium and other macroelements. Soils & Rice. 561—576. IRRI.
- [32] He Qun, Xu Zuyi, 1981: Influence of Transpormation of iron oxides on soil structure. Proceedings of Symposium on paddy soil, 699—703.

INFLUENCE OF SOIL WATER REGIME ON THE MIGRATION OF MINERAL ELEMENTS IN SOIL AND THE CROP GROWTH

Zhang Xiqun, Xu Qi and Hseung Yi

(*Institute of Soil Sciences, Academia Sinica, Nanjing*)

Summary

Water regime in paddy soil is one of the main factors which dominate the eluviation and illuviation of mineral elements and affect the yield of rice and wheat. A preliminary study was made by modelling soil column experiment for the influence of soil water regime on the eluviation and illuviation of mineral elements in soil and their differentiation in soil profile, as well as its relation to the growth of rice and wheat.

Experiment showed that the content of dissolved oxygen in soil column was restricted by the soil water condition; the more the amount of percolating water, the more the dissolved oxygen in soil; and the average value of Eh in soil was lowered with the decrease of water percolation.

Based on the data of periodical determination of the chemical composition for the percolating water from soil column, a linear equation for the leaching intensity of mineral elements was established to indicate the leaching characteristics of the five elements (Ca, Mg, Fe, Mn and K) in different period of submergence. Based on the results of correlation matrix analysis, the correlation between the activation and migration of eight mineral elements (Ca, Mg, Fe, Mn, K, P, Al and Si) was elaborated; and by principle composition analysis, the characteristics of eluviation and accumulation of the elements mentioned above were indicated.

Data of the analysis of free Fe and Mn in soil columns reveals that although the soil was submerged only one year, the differentiation of the elements in profile already appeared. The free Fe, Mn in soil increased as compared with those in parent materials, especially the initial eluviation and illuviation horizons of Mn could already be formed. The differentiation characteristics of Mn in profile is significantly correlated with the water patterns of the soil, which indicates water regime is the main factor affecting the eluviation and illuviation of Fe and Mn in soil.

Experiment of rice and wheat planting proved that the permeable soil column (water percolation in the soil during the submergic season being about 15 mm per day, and groundwater table being controlled at 70—80 cm) was favorable for the growth of rice and wheat, which implies the water regime is one of the important factors affecting the high yield of rice and wheat.