

石灰化水稻土的形成*

龚子同 韦启璠 龚高实

(中国科学院南京土壤研究所)

(桂林地区农牧渔业局)

摘 要

石灰化水稻土在我国约有400多万亩。 CaCO_3 含量10—20%， $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ 之比10—30不等。土壤板结，有石灰结核，有时形成石灰盘。土壤缺磷，少钾，有效态硼、锌、钼、锰也不足。是华南的一种中低产水稻土。

石灰化水稻土中的钙主要来自年复一年的施用石灰和引灌含钙高的石灰岩溶洞水；石灰积聚的条件是土壤pH高，土壤 CO_2 分压低和通透性不良；根据土壤中石灰含量和 ^{14}C 测定估算，石灰化水稻土的形成至少有360年以上的历史。

石灰化水稻土施用石灰不起中和酸性的作用。所以，必须停施石灰，增施有机肥以根本上改良这种土壤，在未改良前应对症施肥以提高产量。

石灰化水稻土是我国亚热带地区广泛分布的一种低产土壤。总面积不下400万亩。改良这种土壤对保护土壤资源增加粮食生产都有重要意义。我国土壤工作者40年代就已开始研究这种土壤^[1,11]。50年代李庆逵^[2]、60年代龚子同、石华等^[3,4]都作了进一步研究和讨论。70年代末，又重新恢复了对此种土壤的研究^[5,6,9]。1982年至1985年我们参加了广西科委下达的“石灰性水稻土的特性及改良利用”课题的研究。通过几年来的工作，我们对石灰化水稻土的物理、化学和微形态作了些研究，并进行了灌溉水的动态观测和 ^{14}C 测定土壤年龄。对石灰化水稻土的形成有进一步了解，现整理如下。

一、一种次生碳酸盐土

(一) 石灰化水稻土的出现

土壤是在不同成土作用下发生发展的。特别受到生物气候因素的制约。随着热量和降水的增加，土壤以盐渍土、碳酸盐土、硅铝土而发育为富铝土，土壤中碳酸盐也随之消失。根据已有的降水量和土壤中碳酸盐分布资料，自棕壤以南至红壤带土壤，一般很少有碳酸盐积聚或完全不含碳酸盐。但是情况也有例外。

从图1可见，以珠江三角洲为例，亚热带草甸土由于母质的影响多少含有一些碳酸盐，随着成土过程的发展，碳酸盐自剖面中淋失；然而在农业历史悠久的珠江三角洲北部，

* 微量元素数据引自欧阳洸同志资料，水化学数据系张效朴同志提供微形态，由曹升庚同志鉴定，骆国保同志协助计算，谨此志谢。

1) 王卓仁，1958；桂北石灰性水稻田土壤的性状及水稻石灰施用问题的初步探讨。中国土壤学会水稻土学术会议文集。

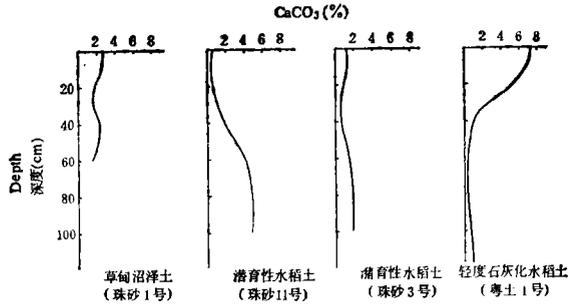


图 1 草甸沼泽土及其起源的石灰化水稻土剖面中碳酸钙的分布
 Fig. 1 Distribution of carbonate in soil profile of calcified paddy soil and its original soils

与此相反出现了石灰积聚的水稻土。

图 2 所示是另一种现象。从黑色石灰土发育到红色石灰土，碳酸盐不断淋失直至完全不含碳酸盐，然而在古老农业的岩溶地区也同样出现石灰积聚的水稻土。

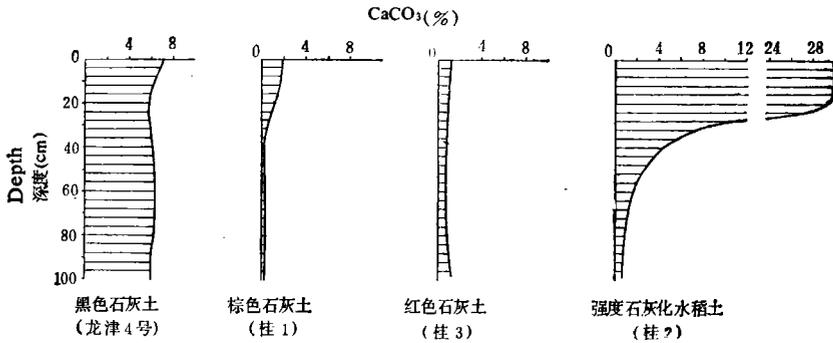


图 2 石灰土及其起源的石灰化水稻土形成过程中碳酸钙剖面变化
 Fig. 2 Distribution of carbonate in the profile of calcified paddy soil and its original soils

水稻土剖面中这种碳酸盐积聚的出现,在生产上存在的问题突出,从而引起广大土壤工作者和农业科学工作者的广泛注意。

(二) 石灰积聚的特点

石灰化水稻土中碳酸盐的积聚特点是区别于其他土壤的重要标志。从表 1 可见,此类土壤中碳酸盐含量很高,达 10% 以上,甚至超过 30%。这种土壤碳酸盐在剖面中的积聚大多是上高下低,这和干旱气候条件下形成的钙层土正好相反,后者碳酸盐在剖面中的分布上低下高,并随深度而增加。碳酸盐组成中主要是碳酸钙。不论是石灰性草甸沼泽土还是红色石灰土, CaCO₃/MgCO₃ 的比值都较小,只有 2—10; 而石灰化水稻土中除底层与起源土壤相同外,这一比例可以大到 10—30。值得注意的是在所列石灰化水稻土剖面中 CaCO₃/MgCO₃ 的比值,多以犁底层最高,说明某些剖面中碳酸钙虽然在耕层含量比较高,但按这一比例来说,犁底层才是碳酸钙的真正积聚层。

表 1 石灰化水稻土及其起源土壤的碳酸盐组成

Table 1 Composition of carbonate in the profile of calcified paddy soils and their original soils

土壤 Soil	剖面号 No.	地点 Location	深度 (cm)	0.02N HCl		
				CaCO ₃ (%)	MgCO ₃ (%)	CaCO ₃ / MgCO ₃
草甸沼泽土	珠沙 10	广东中山	0—10	2.14	0.51	4.2
			10—30	1.71	0.80	2.1
			30—40	2.09	0.61	3.4
轻度石灰化 水稻土	粤土 1	广东海南	0—14	6.65	0.38	17.4
			14—25	5.95	0.21	28.3
			25—46	1.25	0.23	5.4
			46—85	0.43	0.10	4.3
			85—100	0.87	0.36	2.4
淋溶红色石 灰土	桂 4	广西阳朔 福利	0—7	1.32	0.13	10.2
			7—20	0.89	0.10	8.9
			20—44	0.81	0.11	7.4
			44—90	0.58	0.31	1.9
			90—120	0.60	0.72	0.8
淋溶红色石 灰土	桂 3	广西桂林 雁山	0—15	0.94	0.09	10.4
			15—35	0.74	0.11	6.7
			35—73	0.65	0.07	9.3
			73—140	1.42	0.30	4.7
中度石灰化 水稻土	广桂 2	广西临桂	0—11	0.96	0.08	12.0
			11—22	8.81	0.25	35.2
			22—28	2.23	0.11	22.7
			28—45	1.49	0.11	14.4
			45—68	1.24	0.11	11.3
			68—100	0.93	0.19	4.9
中度石灰化 水稻土	桂 Ca-6	广西灌阳 文市	0—13	15.48	0.74	20.9
			13—22	18.60	0.47	39.6
			34—49	1.95	0.43	4.5
			68—78	0.67	0.26	2.6
强度石灰化 水稻土	桂 Ca-7	广西阳朔 报安	0—12	31.36	2.39	13.1
			12—19	28.80	2.19	13.2
			19—30	26.00	0.84	31.0
			30—49	5.16	0.47	11.0
			49—74	1.72	0.08	21.5
强度石灰化 水稻土	桂 2	广西阳朔 报安	0—20	29.84	0.57	52.4
			20—30	8.60	0.84	10.2
			30—55	2.10	0.14	15.0
			55—85	0.45	0.52	0.9

(三) 石灰化水稻土的类型

碳酸盐在剖面中的分布大体上可以分为三种形式(图 3): 1. 石灰表层积聚型, 如英

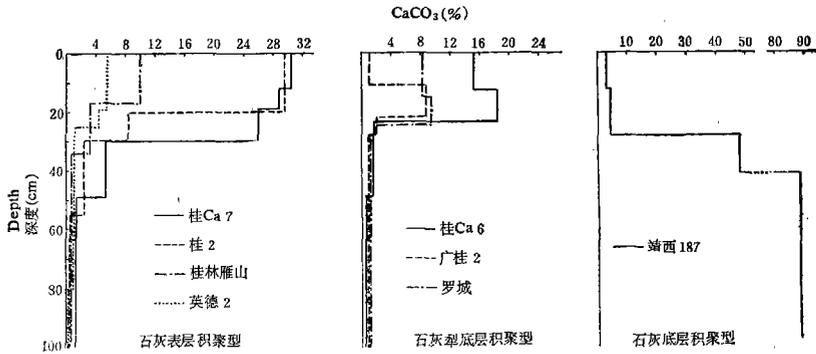


图 3 不同类型石灰化水稻土 CaCO_3 剖面分布

Fig. 3 Distribution of CaCO_3 in different types of calcified paddy soils

德 2、桂 2、桂 Ca7 和桂林等几个剖面, 表层碳酸钙含量可达 33%, 最低也在 4% 以上, 但自 35 厘米以下都急剧下降到 2% 以下, 甚至小于 1%; 2. 石灰犁底层积聚型, 这种情况大多有石灰盘的积聚, 以广桂 2 号最为明显; 3. 石灰底层积聚型, 如靖西 187 号下层碳酸钙高达 80% 以上。上述三种石灰积聚类型以第一种最多, 第二种次之、第三种罕见。我们判断石灰来源第一、二种看来自上层加入, 第三种可能来自地下水或母质的残留。按石灰表聚特点, 我们将石灰化水稻土划分为轻度、中度和强度三种。轻度石灰化水稻土耕层碳酸钙含量 $< 10\%$, 有少量石灰结核, 而无石灰盘; 中度石灰化水稻土, 碳酸钙含量 $> 10\%$, 有石灰结核, 而无石灰盘; 强度石灰化水稻土则犁底层有石灰盘。

二、石灰化水稻土的特征

(一) 一般剖面特点

石灰化水稻土剖面层次分异明显。与一般水稻土一样可以划分为耕作层 (A), 犁底层 (P), 水耕淀积层 (B)、潜育层 (G) 或母质层 (C) 等。不过耕作层和犁底层由于石灰胶结而发生了一系列新的特性。从薄片可见, 中度石灰化水稻土耕层中多碳酸盐凝团和碳酸盐晶霜(照片 1); 强度石灰化水稻土中铁质-方解石多层复合胶膜凝聚于孔隙周围(照片 2), 孔隙几乎全被方解石晶体填充(照片 4), 铁质-方解石结晶不只是胶结在孔隙壁上, 而且形成铁质石灰盘, 从照片 3 可见, 犁底层上部土体表面浓集碳酸盐, 其下为铁锰胶结层, 再下为铁和方解石的混合凝聚^[7]。所以耕作层已不再是原来的耕作层而成为石灰化耕作层 (A_{Ca}), 犁底层也已石灰化了(石灰盘)的犁底层 (P_{Ca})。

A_{Ca} 层中 > 5 毫米的团块含量很高, 相反, < 0.25 毫米的团聚体数量较少。这些大土块的容重从 1.56—1.90 不等, 多以泥核状态存在, 甚至在水稻生长期间也不易散开。

P_{Ca} 层中多石灰结核。一般结核的长径 5—10 厘米, 大者可达 20 厘米, 小者不及 1 厘

米;形状各异,表面凹凸不平,有的剖面此层碳酸钙含量很高,与铁质胶结形成硬盘层,群众称之为“钢巴层”。如广桂 2 号, P_{Ca} 层中结核占土重的 28.5%, 其中 60% 以上的结核大于 20 毫米。

石灰盘组成中,含铁 7.5—8.5%, 低于铁锰结核而高于石灰结核, 钙的含量为 14—17%, 高于铁锰结核而低于石灰结核(表 2)。因此,实际上石灰化水稻土中的石灰结核(石灰盘)确切地说是铁质石灰结盘。石灰盘层土壤容重可达 1.7 以上,通透性很差;透水性明显低于类似的非石灰性土壤^[11]。

表 2 石灰化水稻土中石灰结核与其它土壤中结核化学组成(%)

Table 2 Chemical composition of concretion in calcified paddy soil and other soils

结核种类 Concretion	土壤 Soil	样品地点 Location	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
石灰盘	石灰化水稻土	广西临桂	40.75	14.10	10.73	10.00	7.27	0.24	0.14
			47.50	14.95	7.37	17.00	10.25	0.26	0.13
			44.58	8.46	11.66	14.90	1.70	—	—
石灰结核	垆土	陕西	22.21	2.04	6.21	35.59	1.56	—	—
铁锰结核	红壤	江西进贤	24.01	51.95	11.05	—	—	—	—

这里以采自广西阳朔报安(桂 2)的强度石灰化水稻土为例,其剖面特点如下:

0—20 厘米 灰色 (2.5Y5.5/1), pH7.9, CaCO₃33%, 轻粘土,碎块状结构,干时土块巨大,淹水后不易散碎。

20—30 厘米 灰黄色 (10YR 4/3), pH8.0, CaCO₃10%, 轻粘土,石灰积聚成层,紧实,几乎不透水。

30—55 厘米 黄棕色 (7.5YR 7/7), pH8.2, CaCO₃1.8%, 中壤土,稜块状结构,有少量锈斑。

55—85 厘米 黄棕色 (7.5YR 7/7), pH8.2 CaCO₃0.2%, 重壤土,稜块状结构,锈斑较上层增多。

此剖面具有明显 A_{Ca} 和 P_{Ca} 层的典型表层积聚型; 30 厘米以下即为一般水稻土 B 层特点,呈稜块状结构, CaCO₃ 含量在 2% 以下。

表 3 石灰化水稻土的一般性质

Table 3 Some properties of calcified paddy soils

剖面号 No.	地点 Location	深度 Depth (cm)	pH	CaCO ₃ (%)	O. M. (%)	N (%)	Fe ₂ O ₃ (%)					颗粒组成(%)	
							总量 Total (1)	游离 Free (2)	活性 Active (3)	$\frac{(2)}{(1)} \times 100$	$\frac{(3)}{(1)} \times 100$	<0.001 mm	<0.01 mm
桂 2	阳朔报安	0—20	7.94	33.46	4.00	0.189	5.08	2.41	0.58	47.4	11.41	23.2	57.68
		20—30	7.96	9.96	1.15	0.072	8.14	5.83	0.91	71.6	11.17	33.06	56.96
		30—55	8.19	1.81	0.64	0.061	9.21	7.56	0.64	82.1	6.95	13.21	31.65
		55—85	8.19	0.16	0.52	0.052	10.59	8.50	0.48	80.6	4.55	15.44	42.68

表 4 石灰化水稻土成土富集系数
Table 4 Enrichment coefficient in calcified paddy soils

(一)													
剖面号 No.	深度 Depth (cm)	烧失量 Ign. loss (%)	H ₂ O (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
				(%) 占灼烧土重									
桂 2 (阳朔)	0—20	22.46	4.38	39.91	11.38	5.08	1.17	0.10	17.96	0.66	0.69	0.10	0.32
	20—30	12.24	4.60	53.56	16.63	8.14	1.64	0.44	5.21	0.84	0.90	0.05	0.25
	55—85	10.90	7.99	49.67	23.54	10.54	1.48	0.27	0.72	1.17	1.20	0.10	0.22
成土富集系数 $\frac{A_{Ca}}{BC}$				0.80	0.48	0.48	0.79	0.38	24.94	0.56	0.58	1.00	1.46
富集次序				CaO>P ₂ O ₅ >Na ₂ O>SiO ₂ >TiO ₂ >K ₂ O>MgO>Al ₂ O ₃ =Fe ₂ O ₃ >MnO									
成土富集系数 $\frac{P_{Ca}}{BC}$				1.08	0.71	0.77	1.11	1.63	7.24	0.72	0.75	0.50	1.14
富集次序				CaO>MnO>P ₂ O ₅ =TiO ₂ >SiO ₂ >Fe ₂ O ₃ >K ₂ O>Al ₂ O ₃ >MgO >Na ₂ O									
(二)													
剖面号 No.	深度 Depth (cm)	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Cu	Zn	Mn	Mo	B	
		(%)							(ppm)				
桂 Ca6 (灌阳)	0—13	10.44	2.14	0.13	0.82	1.24	7.01	1.82	0.57	580.0	1.20	30.50	
	13—24	10.68	2.21	0.14	0.90	1.23	13.20	1.67	0.46	911.2	0.80	21.50	
	68—78	0.20	2.60	0.01	1.46	1.30	10.25	0.20	0.18	1709.2	1.30	3.70	
成土富集系数 $\frac{A_{Ca}}{C}$		52.2	0.82	13.0	0.56	0.95	0.68	9.1	3.17	0.34	0.92	8.24	
富集次序		CaO>P ₂ O ₅ >Cu>B>Zn> TiO ₂ >Mo>K ₂ O>Fe ₂ O ₃ >MgO>Mn											
成土富集系数 $\frac{P_{Ca}}{C}$		53.4	0.85	14.0	0.62	0.95	1.29	8.40	2.56	0.53	0.62	5.80	
富集次序		CaO>P ₂ O ₅ >Cu>B>Zn> TiO ₂ >K ₂ O>Fe>MgO = Mo>Mn											
(三)													
剖面号 No.	深度 Depth (cm)	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Cu	Zn	Mn	Mo	B	
		(%)							(ppm)				
桂 Ca7 (阳朔)	0—12	21.64	1.86	0.41	0.96	1.36	7.45	32.6	195.4	730.8	0.56	91.4	
	12—19	19.24	1.69	0.33	0.67	1.37	7.42	36.0	221.5	1253.0	1.30	133.0	
	49—74	0.29	1.34	0.21	1.18	1.68	18.89	41.8	257.1	5755.0	2.70	70.4	
成土富集系数 $\frac{A_{Ca}}{C}$		74.62	1.39	1.95	0.81	0.81	0.39	0.78	0.76	0.13	0.21	1.30	
富集次序		CaO>P ₂ O ₅ >K ₂ O>B> MgO = TiO ₂ >Cu>Zn>Fe>Mo>Mn											
成土富集系数 $\frac{P_{Ca}}{C}$		66.35	1.26	1.57	0.57	0.82	0.39	0.86	0.86	0.22	0.48	1.89	
富集次序		CaO>B>P ₂ O ₅ >K ₂ O> Cu = Zn>TiO ₂ >MgO>Mo>Fe ₂ O ₃ >Mn											

(二) 石灰化水稻土的地球化学特性

石灰化水稻土呈微碱性反应, pH8.0 左右, 铁的活性不高(表 3)。与其他土壤相比, 石灰化水稻土形成过程中有它本身特有的元素迁移积累的特点。

1. 成土富集系数: 从表 4—6 所示的成土富集系数可见这三种石灰化水稻土有如下共同特点: (1) CaO、P₂O₅ 和 B 在成土过程中富集, 特别是 CaO 和 P₂O₅; (2) Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 和 Mo 在成土过程中减少, 特别是 Fe₂O₃ 和 MgO; (3) K₂O 在桂 2 和桂 Ca6 剖面中显淋失, 而在桂 Ca7 中显积累, TiO₂ 的积累系数均在 1 左右, 显示它的稳定性。

2. 生物富集作用: 石灰化水稻土上水稻植株的化学组成与一般水稻相似(表 5)。若与太湖地区相比, CaO 在植株中含量低, (太湖地区为 0.64%; n = 20) 而籽实中稍高(太湖地区为 0.052%; n = 20); 就 MgO 的含量言, 这里的籽实中含量比较低, 而植株中较高(太湖地区籽实为 0.202%, 植株为 0.315% n = 20); 与金华地区相比, 这里水稻植株中 CaO 稍低, 而 MgO 较高(金华地区植株中 CaO 和 MgO 分别为 0.61% 和 0.248%, n = 32)(表 5)。

表 5 石灰化水稻土上水稻的生物吸收系数(阳朔报安)

Table 5 Coefficient of biological absorption by rice plant in calcified paddy soils

水稻或土壤 Rice or soil	标本数 No. of samples	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO
		(%)					
植株	7	0.46	0.45	0.186	2.43	0.35	0.51
籽实	2	0.056	0.18	0.740	0.38	0.38	0.93
土壤 (A _{Ca})		17.96	0.66	0.321	0.69	5.08	0.103
生物吸收系数 (植株) 吸收次序	(A _{Ca})	0.026	0.68	0.58	3.52	0.069	4.95
		MnO > K ₂ O > MgO > P ₂ O ₅ > Fe ₂ O ₃ > CaO					
生物吸收系数 (籽实) 吸收次序	(A _{Ca})	0.003	0.27	2.31	0.55	0.074	9.03
		MnO > P ₂ O ₅ > K ₂ O > MgO > Fe ₂ O ₃ > CaO					

一般植物生活必须元素在土壤中含量越高, 植物吸收系数越低; 相反, 土壤中含量越低, 植物吸收系数越高。如表 5 所示, 除了一般水稻植株吸收较多的 K₂O, 而籽实吸收较多的 P₂O₅ 以外, 植株和籽实的吸收系数均以 MnO 最高, 而以 CaO 为最低。

3. 水迁移系数: 石灰化水稻土地区的元素水迁移规律有其特点。这里根据彼列尔曼的水迁移公式, 强度石灰化水稻土(桂 2)的化学全量组成全剖面加权平均值为基础, 分别对漓江水和受溶洞水影响的小溪水进行了计算(小溪与桂 2 剖面地点较近, 地质地貌和水源条件基本相同)。按波雷诺夫的水迁移公式, 其元素水迁移次序为 Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Si > Fe > Al。石灰化水稻土的水迁移规律大体上与此相符。而漓江水中 Na⁺ 的迁移居首位, 且 Ca²⁺ 的迁移系数很大; 而 SiO₂ 和 PO₄³⁻ 处于迁移的末位(表 6)。

从石灰土的成土富集系数、生物吸收系数和水迁移系数来看, 石灰化水稻土成土过程

表 6 石灰化水稻土的元素水迁移系数 (mg/l)

Table 6 Coefficient of aqueous migration in calcified paddy soils

水型 Type of water	地点 Location	pH	(NH ₄ ⁺ -N + NO ₃ ⁻ -N)	PO ₄ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	MgO ²⁺	SO ₄ ²⁺	SiO ₂	离子 总量	备注
小溪水	桂林雁山 南 10 km	7.46	0.61	0.016	0.37	0.76	58.7	3.24	8.87	4.90	77.47	三年平均
漓江水	桂林	6.51	1.37	0.042	0.78	2.00	24.1	1.57	5.00	4.50	39.36	二次平均
小溪水	迁移系数		—	0.09	0.47	9.81	16.12	4.18	—	0.13	—	
	迁移次序		Ca ²⁺ >Na ⁺ >Mg ²⁺ >K ⁺ >SiO ₂ >PO ₄ ⁻									
漓江水	迁移系数		0.45	1.96	56.45	12.97	4.32	—	0.23	—		
	迁移次序		Na ⁺ >Ca ²⁺ >Mg ²⁺ >K ⁺ >PO ₄ ⁻ >SiO ₂									

中石灰富集最多,水迁移系数中钙也居于首位,而作为水稻来讲,它有选择吸收的能力,所以对于钙的吸收系数反而较小。但不管怎样石灰化水稻土是一个富钙的环境并影响着一系列元素的迁移和富集。

(三) 某些营养元素状况

这里着重讨论石灰化水稻土钾、磷、锌、锰和硼的状况。

1. 钾素缺乏: 我们测定了前述剖面各种形态钾,其含量都较低,石灰化水稻土与红色石灰土无甚差异,剖面变化也不大。速效钾(K₂O),耕层 8.0 ± 0.2 全剖面为 7.9 ± 0.5 毫克/100 克; 缓效钾耕层 37.5 ± 3.9, 全剖面 32.3 ± 9.1 毫克/100 克。土壤供钾水平属低或中下水平。

2. 磷以磷酸钙为主: 石灰化水稻土的无机磷组成中,磷酸钙达 48%, 而铁铝的磷酸

表 7 石灰化水稻土中磷的形态 (P₂O₅, %)

Table 7 Forms of phosphate in calcified paddy soils

土壤 Soil	剖面号 No.	地点 Location	深度 Depth (cm)	全 P	有机 P	无机 P	Al-P	Fe-P	Ca-P	O-P
红色石灰土	桂 3	桂林雁山南	0—15	0.150	0.090	0.060	0.002	0.014	0.0068	0.038
			73—140	0.095	0.042	0.053	0.0004	0.007	0.0075	0.038
中度石灰化 水稻土	桂 Ca ₆	灌阳文市	0—3	0.167	0.075	0.092	0.0008	0.0014	0.0335	0.0560
			13—22	0.138	0.054	0.085	0.0004	0.0006	0.0495	0.0340
			68—78	0.085	0.027	0.058	0.0004	0.0129	0.0025	0.0420
强度石灰化 水稻土	桂 Ca ₇	阳朔报安	0—12	0.270	0.072	0.198	0.0010	0.0140	0.1330	0.0500
			12—19	0.290	0.085	0.205	0.0009	0.0009	0.1480	0.0540
			49—74	0.162	0.047	0.116	0.0018	0.0234	0.0023	0.0880
强度石灰化 水稻土	桂 2	阳朔报安	0—20	0.268	0.075	0.193	0.0010	0.0010	0.1390	0.0520
			30—50	0.143	0.018	0.125	0.0165	0.0365	0.0040	0.0680
			55—85	0.132	0.061	0.071	0.0007	0.0222	0.0020	0.0460

分析者: 范本兰。

盐都很少(表 7)。其磷酸钙盐含量也显著高于石灰土,这是由于大量石灰存在的结果,从表 10 可见,磷酸钙盐含量在剖面中变化与碳酸钙含量变化是一致的(参见表 1)。

3. 硼、钼、锌不足: 石灰化水稻土的水溶性硼, 84% 都在临界值(热水提取 0.5ppm)以下,有时甚至为痕迹量。一般认为有效态钼少于 0.2ppm 时钼肥有效,石灰化水稻土中的有效态钼只有 $n \times 10^{-2}$, 所以,施用硼、钼均属有效。据统计,用 EDTA 提取的有效态锌 25% < 0.5ppm, 38% 在 0.75—0.5 之间, 6% 在 1—0.75ppm 之间, > 1ppm 的占 31%, 其中包括一些已经施用过锌肥的石灰化水稻土。有效态锰一般为 13ppm 以下,通常认为过量施用石灰会引起缺锰。

总之,从石灰化水稻土的养份状况来看,可以说钾低,磷少,硼、钼较少而锌锰不足。

三、石灰化水稻土的形成

(一) 石灰物质的来源

石灰化水稻土中石灰的来源有这样几个方面: 1. 天然降水。据观测,桂林地区每年从降水得到钙 7 斤/亩,相当于 18 斤/亩碳酸钙; 2. 灌溉水。灌溉水的来源主要有二,一种是江河水,另一种是溶洞水; 若以年灌水量 1000 毫米/亩计,灌溉江河水可带来碳酸钙 8.0 斤左右,而灌溉溶洞水或受溶洞水影响的小溪水可带来 200 斤(表 8); 3. 施用石灰,由于施肥习惯不同,年施用量 200—300 斤/亩不等。显然施用石灰是主要的,溶洞水灌溉同样是石灰的一个重要来源。

表 8 降水和灌溉水所带来的钙*

Table 8 Amount of CaCO_3 from precipitation and irrigation water

水分类型 Type of water	Ca		CaCO_3 (斤/亩)	备 注
	mg/l	斤/亩		
雨 水	3.2	7.14	17.83	年降水量以 1700mm 计 年灌溉量以 1000mm 计
漓江水	24.1	32.13	80.23	
溪 水	58.7	78.27	195.5	
溶洞水	59.5	79.41	198.3	

* 张效扑资料; 注: 除漓江水系二次测定外,余均系三年逐月的平均值。

(二) 石灰积聚条件

石灰的大量来源只是提供了一个石灰积聚的可能性。石灰的实际积累还必须具备若干条件:

1. pH 值: 石灰化水稻土的 pH 值一般都在 7.5—8.0 之间。 CaCO_3 在碱性条件下易于沉淀,因为当地农民所施用的是生石灰,在生石灰施入田间的短时间内,灌溉水和表土 pH 值可升到 9—10,这样的 pH 值是其它中性、石灰性土壤所没有的,也是施用石灰粉所不可能发生的。

2. CO_2 分压: CO_2 的存在有利于 CaCO_3 的溶解,形成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 而淋失。据反应式 $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ 可以导出定量估算 Ca^{2+} 开始沉淀的浓度同

CO₂ 分压的关系 $[Ca^{2+}] = 8.50 \times 10^{-3} \sqrt[3]{P_{CO_2}}$ 。土壤在自然状态下,所观察到的 CO₂ 含量(体积百分数)在 0.03—15% 之间^[10],按上式计算得到相应 Ca²⁺ 沉淀的浓度从 23—184 毫克/升不等,可见不同的 CO₂ 环境下,钙发生积聚所要求的浓度可以相差很大。这同我们田间取得的资料是一致的。表 9 中石灰化水稻土的 CO₂ 含量都明显低于对照的土壤,经计算石灰化水稻土中 [Ca²⁺] 浓度平均达 63 毫克/升就开始沉淀,而对照组则需达 101 毫克/升。所以,CO₂ 分压与 CaCO₃ 的淀积或溶解直接相关;CO₂ 分压越低,越有利于水稻土中石灰的积聚。

表 9 石灰化水稻土耕层土壤中的 CO₂ 和 O₂

Table 9 Content of CO₂ and O₂ in the cultivated horizon of calcified paddy soils

土 壤 Soil	CO ₂ %	O ₂ %
分 蘖 期		
轻度石灰化水稻土	0.85	18.45
对 照	3.90	11.14
中度石灰化水稻土	0.71	11.79
对 照	1.63	13.39
收 获 期		
轻度石灰化水稻土	0.40	19.00
对 照	2.80	18.50

3. 土壤渗漏: 土壤渗漏也是影响石灰积累的条件。从所测的水稻土渗漏水与灌溉溶洞水相似, Ca²⁺ 的含量多在 54—92 毫克/升范围内,其中桂林地区为 92.0 毫克/升。所

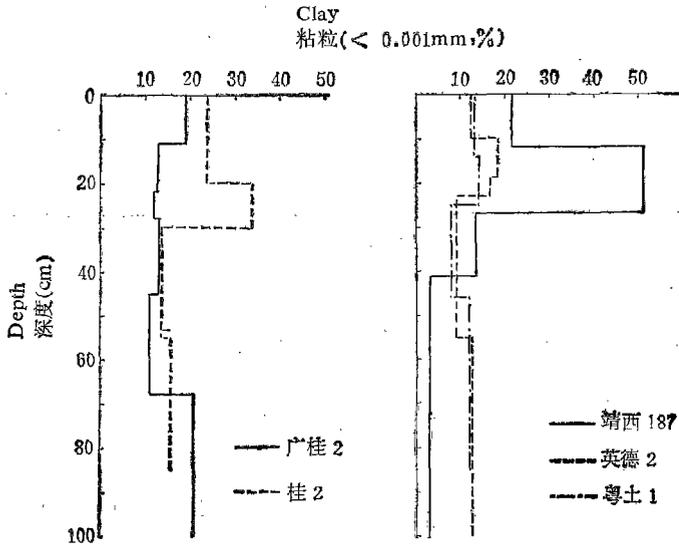


图 4 石灰化水稻土的粘粒分布图

Fig. 4 Distribution of clay fraction in the profile of calcified paddy soils

以如果渗漏良好则所有灌溉水，除蒸发、蒸腾和水稻生理需水之外，全部可以通过渗漏水流失，而不致造成 Ca^{2+} 的积聚。但是从所观测的剖面来看，剖面中 10—20 厘米上下有一层粘粒 (< 0.001 毫米) 积聚层 (图 4)，广桂 2 号之所以不明显，因为此层有大量石灰盘，而影响其质地组成。由于土壤通透性差，加速了石灰和粘粒的积聚，石灰和粘粒的积聚又进一步恶化了土壤的通透性。

因此，我们认为石灰化水稻土的石灰来源主要是人工施用的石灰，溶洞水灌溉也是一个重要原因，但只有在施用生石灰、土壤 CO_2 分压低和通透性不良的情况下，才能形成石灰化水稻土。这些因素相辅相成，形成不良的恶性循环，使土壤石灰化愈加严重。

(三) 石灰化水稻土形成时间

石灰化水稻土地区，年施石灰 (以 CaCO_3 计) 200 斤/亩是一般的。如果用溶洞水灌溉，加上大气降水，则土壤中每亩每年进入 CaCO_3 400 斤左右。如前所述，在土壤渗漏性良好的条件下，不仅灌溉水中的 Ca^{2+} 可渗漏淋失，甚至施用的石灰部分亦可溶解淋失；按前述石灰化水稻土渗漏水 Ca^{2+} 浓度为 90 毫克/升计，可溶解淋失施入石灰 (CaCO_3) 100 斤左右。(当然，水中原有一定浓度的 Ca^{2+} ，实际淋失量低于此数。)

表 10 石灰化水稻土 1 米土层中石灰含量

Table 10 Amount of CaCO_3 in the profile of calcified paddy soils within 1 meter

土 壤 Soil	剖 面 号 No.	CaCO_3 (斤/亩)
强度石灰化水稻土	桂 2	120,888
	桂 Ca7	167,949
	靖西 187	961,554
中度石灰化水稻土	桂 Ca6	69,130
	广桂 2	32,314
	英德 2	39,374
轻度石灰化水稻土	桂林	48,726
	罗城	52,614
	粤土 1	36,032

现有土壤中 CaCO_3 的含量是计算形成时间的重要依据。从表 10 可见，轻度石灰化水稻土 1 米土层中含 CaCO_3 3.6—5.2 万斤，中度的 3.2—6.9 万斤，强度的 12—96 万斤。显然靖西 187 号石灰底层积聚是地质历史条件下形成的。

假如以每年积累 100 斤计，这些石灰化水稻土的形成需要 360—960 年的历史。为了进一步了解石灰化水稻土形成的时间，我所土壤年龄实验室以 ^{14}C 对桂 2 剖面进行测定，经树轮校正，临桂报安强度石灰化水稻土的形成已有 1675 ± 115 年^[3]。相当于西晋末年。不管怎样，这也说明石灰化水稻土的形成是长期过量施用石灰的结果。

参 考 文 献

- [1] 郭魁士, 1941: 广西石灰岩区土壤的初步观测。土壤季刊, 第 1 卷 4 期, 32—47 页。
- [2] 李庆逵, 1959: 晚近我国土壤化学和农业化学的研究。土壤学报, 第 7 卷 1—2 期, 1—8 页。
- [3] 石华、侯傅庆, 1961: 广西锅巴田的形成及其改良。土壤通报, 第 5 期, 5—10 页。
- [4] 龚子同、陈志诚, 1963: 华南石灰化水稻土的特性及其形成过程。土壤学报, 第 11 卷第 1 期, 92—98 页。

- [5] 陈平、梁发英, 1978: 低产石灰性水稻土的利用改良。广西农业科学, 第 11 期。
- [6] 龚高实, 1980: 灵川石灰化水稻土的成因及其危害和改良。广西农业科学, 第 11 期, 18—27 页。
- [7] 曹升庚, 1982: 水稻土肥力特性的微形态诊断。土壤学报, 第 9 卷 4 期, 383—395 页。
- [8] 刘良梧、茅昂江, 1986: 钙质结核放射性碳断代的研究。土壤学报, 第 23 卷 2 期, 106—112 页。
- [9] 张效扑等, 1983: 土壤酸碱性与石灰施用, 《华中亚热带土壤》, 第十三章, 182—196 页, 湖南科技出版社。
- [10] O. C. Spaargaren, 1979: Weathering and soil Formation in A Limestone Area Near Pastena. Publicaties van het Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium van de Universiteit van Amsterdam.
- [11] Пюбровский, В. В. 1956: Каронамные смяжения в почвах и почвообразующих породах цемп-районо-чернозёмной обласми почвоведение 5:32 42.

ON THE FORMATION OF CALCIFIED PADDY SOIL

Gong Zitong, Wei Qifan

(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing)

Gong Goashi

(Agriculture Bureau of Guilin Prefecture, Guangxi)

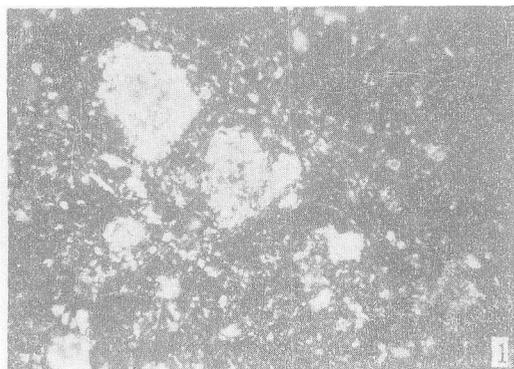
Summary

The calcified paddy soils in China cover an area of more than 270 thousand hectares. The content of CaCO_3 varies from 10—20% and the ratio of $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ from 10—30%. The soils are compact in texture with calcarous concretions and, sometimes, calcareous hardpan in profile. The soils are deficient in P, K, available B, Zn, Mo and Mn.

The calcium in the calcified paddy soils mainly results from liming and irrigating water with high Ca content from karst caves. The conditions of calcium carbonate accumulation in the soils are the high pH value, low partial pressure of CO_2 and poor water permeability of the soils.

On the basis of the content of CaCO_3 and estimation by ^{14}C dating method, the formation of calcified paddy soil has a history for at least more than three hundred years.

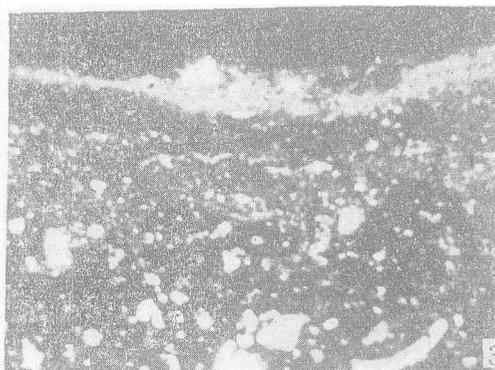
Because liming is one of the factors resulting in the deterioration of the soils, it is recommended that more organic manure should be applied rather than liming on the soils, at the same time microelement such as Zn, B, Mo, etc should also be applied.



照片 1 中度石灰化水稻土耕层 (0—10cm)
碳酸盐凝团和碳酸盐晶霜

(英德 2, 广东英德)
正交偏光 $\times 100$

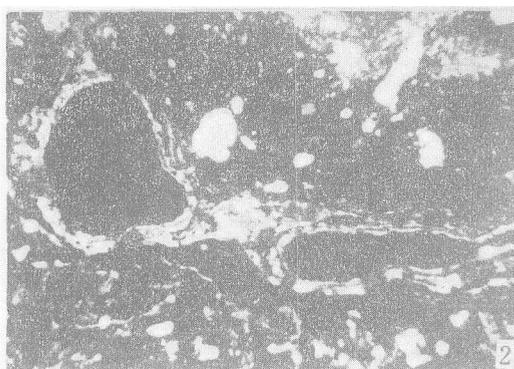
Photo 1 Thin section of
cultivated horizon



照片 3 强度石灰化水稻土犁底层(18—24cm)
上部表面浓集碳酸盐层,其下为铁锰胶结层,再
下为铁-碳酸盐复合层

(土号 33721, 广西罗城)
正交偏光 $\times 20$

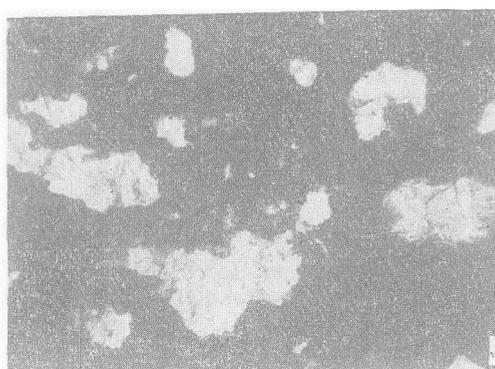
Photo 3 Thin section
of plowpan



照片 2 犁底层铁质-方解石多层复合胶膜,胶
膜内黑色部份为孔隙,胶膜周围黑色部份为锈斑

(土号 33721)
正交偏光 $\times 20$

Photo 2 Iron-calcite complex
coating in plowpan



照片 4 犁底层的孔隙全被方解石晶体填充,
黑色部份是锈斑浸染的土体

(土号 33721)
正交偏光 $\times 64$

Photo 4 Pore space filled
with calcite in plowpan