

南海诸岛土壤的地球化学特征 及其生物有效性*

龚子同 黄 标 周瑞荣

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要

南海诸岛主要由三类土壤组成, 即富磷岩性均腐土, 盐成土和新成土。这些土壤均发育于具有强石灰性的生物碎屑沉积物之上。

富磷岩性均腐土的元素含量与母质相比, P、Zn、Cu、Ba、Cd等元素含量较高, 且随成土时间的增加, 其含量有增加的趋势, 而Mg、Ca、Sr、B、V、Pb、Mo等元素含量较低, 随成土时间的增加逐渐降低。新成土和盐成土除P和Na元素含量较高外, 其余元素均接近母质。南海诸岛独特的生物气候、母质等条件是造成上述元素分布特征的主要原因。同样, 也导致了成土时间对元素分布产生明显的影响。

富磷岩性均腐土的元素有效性以富磷、Zn和Cu为特征。盐成土以富B为特征。影响土壤元素有效性的因素主要有: 土壤酸碱度、有机质含量、阳离子交换量及元素全量, 这些因素中, 元素全量对P、Zn和B等元素有效性影响最大, 使得这些元素有效性也显示出与其全量类似的分异规律。

关键词 土壤, 元素地球化学, 生物有效性, 南海诸岛

南海诸岛由东沙、西沙、中沙和南沙群岛组成, 共由260多座岛屿、沙洲、暗礁、暗沙和沙滩组成。早在20世纪40年代, 我国土壤学者曾分赴南沙群岛和西沙群岛进行了野外考察并撰文报道了其土壤的基本特征^[1, 2]。70年代, 我国土壤学者再次赴西沙群岛进行了较为详细的科学考察, 并出版了专著^[3]。本文旨在以上资料基础上, 结合近几年来中国科学院南沙群岛及其邻近海区综合科学考察的部分研究成果^[4, 5, 6], 以及近年来我们对南海诸岛的土壤学研究^[13, 14, 15, 16, 17], 对南沙群岛和西沙群岛的土壤元素地球化学特征及其生物有效性与成土作用之间的关系进行研究, 为开发和利用该地区的土壤资源和环境保护提供基础资料。

1 材料和方法

本文对南沙群岛和西沙群岛各5个土壤剖面土壤样品进行了常量元素SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃、

* 中国科学院特别支持, 国家自然科学基金重点项目—中国土壤系统分类研究一部分, 并得到中国科学院南沙综合科学考察队的帮助。

收稿日期: 1996-01-15; 收到修改稿日期: 1996-09-06

CaO、MgO、K₂O、Na₂O、P₂O₅、CaCO₃等组分的全量分析,分析方法根据中国科学院南京土壤研究所的方法进行^[10],同时,还用等离子体光谱法进行了Zn、Ba、Sr、Cd、Ni、Cu、Co、V、Mo、Pb、B等微量元素的全量和Zn、Cu、Mo、Mn、Fe、B的有效态含量的测定。土壤有效态Zn、Cu、Fe用DTPA溶液提取,有效态Mo用草酸-草酸铵溶液提取,有效态Mn为代换态,用1N醋酸-醋酸铵溶液提取,有效态B用热水溶液提取。其余理化性质,包括土壤pH、有机质、CaCO₃、阳离子交换量、速效磷和速效钾等的分析方法均根据中国科学院南京土壤研究所的方法进行^[10]。

2 结果与讨论

2.1 土壤类型及成土过程概况

南海诸岛的土壤绝大部分是在具有强烈石灰性的生物碎屑沉积物(几乎均为珊瑚、贝壳碎屑)上发育起来的。在热带生物气候条件下,经过脱盐阶段,在生物积累、淋溶、磷素富集、积盐脱盐等过程作用下,形成了各种各样的土壤,归纳起来,主要可划分出富磷岩性均腐土、新成土和盐成土三大类^[3,9]。

富磷岩性均腐土是南海诸岛最主要的土壤类型,通常由具均腐殖质特性的表层和磷积层所组成,其成土过程经历了生物积累和磷素富集过程,其典型土壤的一般化学性质见表1。根据中国土壤系统分类(修订方案),按均腐殖质特性和富磷作用的强弱,有无磷磐与潜育层的出现又可细分为:肥熟的、普通的、磐状的和潜育的等亚类。

表1 南海诸岛富磷岩性均腐土的一般化学性质

Table 1 General chemical properties of Phosphic-Lithomorphic Isohumisols in South China Sea Islands

地点 Site	深度 (cm) Depth	pH	有机质 (g/kg) O.M.	N (g/kg)	C/N	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)	CaCO ₃ (g/kg)	CEC (cmol(+), kg)
南沙群岛	0—7	8.56	25.1	1.74	8.37	30.4	0.19	873.8	7.68
的太平岛	7—20	8.50	79.6	5.01	9.22	249.9	0.24	315.7	20.52
(AG-13)	20—35	8.47	26.4	2.48	6.17	83.6	0.51	750.9	8.68
	35—80	8.86	3.5	0.28	7.25	10.2	0.22	917.5	0.87
西沙群岛	2—10	8.20	125.0	7.78	9.32	268.7	0.30	221.9	36.07
的珊瑚岛	10—26	8.60	84.1	6.38	7.65	311.6	0.34	154.1	29.24
(W8-2)	26—50	8.40	39.5	3.30	6.94	227.0	0.30	411.5	9.86
	50—70	9.40	8.9	0.55	9.39	22.1	0.20	918.8	1.73
	90—100	9.50	4.7	0.35	7.80	11.2	0.20	898.8	0.52

新成土普遍有一定磷素富集,仅出现一个亚类,即磷质热性正常新成土。

盐成土具有一盐积层,成土过程主要经历积盐过程,局部有生物积累和潜育化过程存在。按土体中潜育化过程的有无又可细分出:海积潮湿盐成土和潜育潮湿正常盐成土

表 2 南海诸岛土壤常量元素含量 (g/kg)

Table 2 Major element contents of soils in South China Sea Islands (g/kg)

地点 Site	土壤类型 Soil type	样号 Sample No.	深度 (cm) Depth	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CaCO ₃
南 沙 群 岛	磐状富磷 岩性均腐 土	AG-8	0—5	89.5	1.88	0.137	402.6	42.3	0.104	0.042	0.44	3.73	23.15	774.8
			5—10	45.3	1.10	0.102	443.6	47.4	0.021	0.023	0.43	3.74	61.45	797.4
			10—20	68.9	1.21	0.208	401.5	37.3	0.021	0.059	0.42	2.73	175.33	463.2
			20—45	127.6	0.79	0.181	394.4	15.6	0.011	0.029	0.57	2.88	229.91	371.6
			45—80	77.6	1.16	0.114	437.2	25.0	0.023	0.006	0.32	4.06	69.56	809.1
			80—100	46.4	0.29	0.086	444.5	47.8	0.123	0.013	0.59	4.63	20.70	869.6
	普通富磷 岩性均腐 土	AG-9	0—10	120.9	1.32	0.175	366.6	19.6	0.098	0.063	0.48	2.92	144.99	477.1
			10—100	85.9	1.99	0.107	436.9	24.3	0.017	0.004	0.30	4.31	8.88	817.6
			0—5	36.5	0.47	0.080	486.5	14.3	0.017	0.019	0.38	5.35	27.22	875.3
			5—20	118.7	0.46	0.152	377.4	45.7	0.029	0.008	0.38	4.90	63.98	736.6
			20—100	64.9	1.42	0.068	442.8	34.4	0.036	0.014	0.55	4.41	16.65	852.8
			0—10	82.3	1.35	0.180	430.9	23.0	0.085	0.018	0.24	3.20	3.95	781.4
磷质热性 正常新成 土	AG-12	10—35	50.7	2.90	0.139	444.3	60.1	0.087	0.014	0.16	2.46	4.23	903.5	
		35—100	31.0	2.54	0.087	457.7	54.9	0.046	0.009	0.20	3.63	4.12	900.4	
		0—7	28.8	1.06	0.155	462.2	42.6	0.036	0.015	0.19	3.34	30.43	873.8	
		7—20	125.1	0.53	0.182	347.9	17.5	0.040	0.020	0.24	2.56	249.87	315.7	
		20—35	105.9	1.66	0.106	405.4	19.9	0.019	0.007	0.51	4.31	83.62	750.9	
		35—80	29.8	0.93	0.065	496.9	23.3	0.041	0.015	0.22	3.97	10.20	917.5	

西 沙 群 岛	磐状富 磷岩性 均腐土	W2-1	0-2	0.7	0.31	0.123	150.8	46.9	-	-	1.87	7.50	41.40	-
			2-14	3.4	0.47	0.010	484.4	5.0	-	0.035	0.16	2.50	120.60	557.5
			14-24	4.0	0.60	-	475.3	5.2	-	0.037	0.16	1.80	239.10	327.8
			24-36	3.3	0.30	-	484.5	5.6	-	0.017	0.18	1.70	215.00	208.5
			36-52	1.5	0.10	-	508.5	12.4	-	0.001	0.23	2.50	24.40	882.9
			95-100	0.5	0.04	-	509.5	16.7	-	0.001	0.14	1.50	1.50	894.8
			0-2	0.1	0.09	-	105.7	11.5	-	-	8.84	15.90	68.70	-
			2-15	2.3	0.70	0.104	278.3	4.4	-	0.086	0.52	3.40	238.40	7.8
			15-25	3.3	0.52	0.168	438.4	3.8	-	0.036	0.40	2.60	279.00	374.2
			25-40	2.1	0.31	0.127	483.6	4.5	-	0.016	0.21	1.80	160.30	587.6
40-55	1.6	0.23	0.124	498.6	6.8	-	0.012	0.23	2.10	102.90	655.4			
55-76	0.5	0.06	0.066	513.5	13.0	-	-	0.35	2.50	18.00	925.5			
76-100	0.4	0.05	0.087	510.7	15.6	-	-	0.24	1.91	11.20	968.2			
西 沙 群 岛		W8-2	0-2	0.1	0.07	-	26.1	19.5	-	-	3.48	8.69	24.30	-
			2-10	3.3	0.88	0.142	430.9	8.0	-	0.089	0.30	2.80	268.70	221.9
			10-26	3.7	1.02	0.153	453.3	7.4	-	0.078	0.34	3.30	311.60	154.1
			26-50	1.9	0.22	0.084	501.6	9.7	-	0.028	0.30	3.10	227.00	411.5
			50-70	0.9	0.04	0.070	513.7	12.7	-	-	0.46	3.00	22.10	918.8
			90-100	0.4	0.03	0.041	511.5	15.0	-	-	0.24	1.90	11.20	894.8
			0-2	1.4	0.14	-	36.4	8.9	-	-	3.73	9.80	15.20	-
			2-8	2.0	0.66	0.024	439.2	8.3	-	0.122	0.44	2.70	199.90	366.9
			8-18	1.0	0.68	0.012	476.5	7.1	-	0.078	0.63	3.00	231.60	390.7
			18-32	1.5	0.64	0.006	482.4	5.2	-	0.080	0.42	2.50	228.10	414.4
32-45	0.5	0.12	-	510.3	6.7	-	0.023	0.59	3.70	227.90	445.0			
45-90	-	0.03	-	512.5	13.0	-	-	0.42	3.20	13.80	-			
西 沙 群 岛		W12-4	0-15	2.9	0.28	-	339.8	11.7	-	-	4.27	16.80	2.60	746.7
			15-30	1.2	0.08	0.040	485.4	15.4	-	-	0.72	4.50	1.60	940.3
			30-40	1.0	0.06	0.040	504.2	15.3	-	-	0.60	3.00	1.10	911.6
西 沙 群 岛	盐成土	W12-4	0-15	2.9	0.28	-	339.8	11.7	-	-	4.27	16.80	2.60	746.7
			15-30	1.2	0.08	0.040	485.4	15.4	-	-	0.72	4.50	1.60	940.3
			30-40	1.0	0.06	0.040	504.2	15.3	-	-	0.60	3.00	1.10	911.6

表3 南海诸岛土壤微量元素含量 (Sr, g/kg; 其余元素, mg/kg)
Table 3 Trace element contents of soils in South China Sea Islands (Sr, g/kg; other element, mg/kg)

地点 Site	样号 Sample No.	深度 (cm) Depth	Zn	Ba	Sr	Cd	Ni	Cu	Co	V	Cr	Mo	Pb	B
南 沙 群 岛	AG-8	0—5	77.6	13.7	8.0	0.76	5.98	12.5	8.27	40.5	17.9	2.57	87.7	32.5
		5—10	148.0	21.3	8.7	1.11	5.51	22.7	8.34	35.5	19.2	2.57	88.4	29.6
		10—20	519.0	41.6	6.9	3.86	6.30	71.0	8.24	29.2	17.9	2.57	79.3	24.6
		20—45	316.0	50.0	5.9	1.65	5.39	35.4	7.28	24.0	16.3	2.15	70.2	15.8
		45—80	82.4	19.6	9.4	0.76	5.68	17.7	18.10	17.6	14.1	2.18	50.6	29.7
		80—100	85.9	14.0	9.4	0.54	5.30	7.93	36.6	17.9	2.48	84.5	33.4	
南 沙 群 岛	AG-9	0—10	649.0	35.8	5.4	6.92	7.12	162.0	8.28	30.9	221.0	2.26	72.8	20.3
		10—100	44.3	14.0	8.5	0.43	4.92	5.7	7.69	37.8	17.7	2.40	81.9	32.2
南 沙 群 岛	AG-11	0—5	89.6	61.6	8.2	0.62	5.53	8.3	7.86	35.7	16.6	2.42	89.7	33.4
		5—20	127.0	28.4	8.4	1.07	5.33	17.5	7.93	34.4	17.1	2.46	84.5	31.6
		20—100	54.3	13.6	8.4	0.56	5.40	5.9	8.12	38.3	17.9	2.51	87.1	35.7
南 沙 群 岛	AG-12	0—10	35.0	10.9	8.2	0.42	5.39	2.8	8.01	39.3	15.9	2.18	75.3	36.4
		10—35	32.5	10.5	8.0	0.44	5.14	2.5	7.59	38.5	15.5	2.16	73.5	34.7
		35—100	41.7	13.7	8.5	0.46	6.24	17.8	7.99	38.4	14.9	2.20	76.9	35.5

AG-13	0—7	54.3	18.7	8.4	0.76	6.09	17.9	7.87	35.1	17.3	2.51	87.1	35.3
	7—20	239.0	42.9	5.7	1.77	5.42	39.9	7.26	22.8	15.3	2.20	77.4	23.6
	20—35	162.0	29.6	9.0	1.29	5.25	19.4	7.62	25.4	15.2	2.27	72.8	29.7
	35—80	37.7	13.2	9.0	0.42	5.23	5.5	7.54	29.7	14.1	2.31	85.8	31.2
W2-1	2—14	268.0	20.7	7.6	2.53	6.65	32.6	7.48	29.0	16.4	2.22	79.9	28.2
	14—24	391.0	24.4	5.7	4.27	6.00	64.9	7.23	25.3	17.3	2.09	74.1	26.2
	24—36	155.0	26.5	7.1	2.05	5.56	40.4	7.12	22.8	16.5	2.09	74.1	23.6
W7-2	2—15	172.0	58.8	5.0	1.84	4.01	56.9	4.66	17.8	7.0	1.45	40.6	8.1
	15—25	965.0	63.5	5.0	3.78	5.08	45.4	5.57	15.5	11.1	1.67	53.0	27.0
	25—40	152.0	33.4	7.7	1.60	5.62	35.5	7.49	24.2	15.9	2.16	79.3	36.1
W8-2	2—10	425.0	27.4	3.1	3.33	4.35	58.7	5.18	18.1	11.1	1.53	49.0	35.4
	10—26	559.0	35.9	3.8	4.72	5.27	81.3	6.18	19.0	14.1	1.77	58.4	44.7
	26—50	56.6	18.2	8.4	0.74	5.24	17.5	7.55	25.4	16.0	2.20	81.3	29.7
W9-5	2—8	273.0	42.4	5.6	2.74	5.25	46.3	7.21	22.2	15.7	2.10	72.8	38.7
	8—18	242.0	32.3	5.6	1.88	4.50	24.1	5.94	16.0	10.9	1.76	62.7	21.0
	18—32	345.0	37.1	6.1	2.42	5.12	31.1	6.74	17.8	13.3	1.97	67.6	20.8
W12-4	0—15	202.0	67.1	7.1	1.26	5.81	19.4	7.22	26.1	15.3	2.14	83.9	35.5
	15—30	22.9	12.1	10.4	0.34	8.17	5.0	7.92	28.1	17.3	2.38	91.0	56.2
	30—40	17.1	10.9	9.2	0.37	6.11	3.8	8.01	30.2	17.3	2.40	89.7	51.4

西

沙

群

島

表 4 南海诸岛土壤部分元素有效态含量 (mg/kg) 及某些化学性质

Table 4 Elemental availability and some physico-chemical properties of main soils in South China Sea Islands.

地点 Site	样号 Sample No.	深度 (cm) Depth	pH	有机质 (g/kg) O.M.	CEC (cmol(+) /kg)	速效 K	速效 P	有效 Mn	有效 Zn	有效 Cu	有效 Mo	有效 B	有效 Fe
						Available K	Available P	Available Mn	Available Zn	Available Cu	Available Mo	Available B	Available Fe
南 沙 群 岛	AG-8	0—5	8.36	1.24	6.24	24.1	185.3	0.89	4.38	0.61	0.020	0.38	2.22
		5—10	8.56	2.00	3.03	49.5	453.5	0.93	5.57	0.85	痕	0.42	2.44
		10—20	8.46	1.29	20.63	59.1	632.0	5.74	12.45	3.10	0.030	0.71	16.51
		20—45	8.47	1.10	13.15	44.4	1036.2	2.08	14.34	1.99	痕	0.17	2.74
		45—80	8.57	1.71	5.83	27.9	576.9	0.31	3.90	1.33	0.050	0.20	1.16
		80—100	8.80	0.52	1.54	17.6	303.5	0.21	4.23	0.49	0.010	0.18	0.61
	AG-9	0—10	8.40	9.58	25.94	75.6	297.5	3.49	68.00	6.54	0.210	0.86	23.20
		10—100	8.66	0.34	0.21	8.6	156.6	0.12	4.85	0.28	痕	0.16	0.48
	AG-11	0—5	8.45	1.31	3.80	20.7	302.5	0.50	10.10	0.46	0.006	0.33	1.12
		5—20	8.47	2.29	7.49	14.2	477.2	1.25	7.72	0.73	0.070	0.48	2.46
		20—100	8.53	0.57	1.43	7.9	205.0	0.16	6.17	0.40	痕	0.21	0.28
	AG-12	0—10	8.53	0.85	1.82	15.4	43.4	0.24	4.40	0.13	痕	0.45	0.59
		10—35	8.53	0.25	0.46	2.6	36.6	0.11	2.75	0.12	痕	0.32	0.50
		35—100	8.56	0.42	0.67	1.9	46.4	0.23	2.57	0.17	0.270	0.33	0.83

两个亚类。

西沙和南沙群岛的各个岛屿发育于大小不等的礁盘上,一般为沙堤所环抱,故在礁盘上为不同厚度的沙堤。沙堤外缘为受海水浸渍的海积潮湿盐成土,内侧为磷质热性正常新成土。越过沙堤,地形相对低平,一般为厚度不等的富磷岩性均腐土。

2.2 土壤元素地球化学及生物有效性的特征

在了解了土壤的基本特征后,作者选取了几类典型的土壤样品,用上述方法进行了常量和微量元素全量的测定,其结果见表 2、3。

从表 2、3 中可看出,土壤中常量元素主要以 Ca、Mg、P 等为主,三者含量之和可达 70% 以上,且 Ca、Mg 大部分以碳酸盐的形式存在, CaCO_3 含量从 15—95% 不等。微量元素中 Sr、B、Zn、Cu、Ba、Cd 等元素含量较高。

与母质中各类生物沉积物的元素含量相比^[4],各种富磷岩性均腐土除 Mg、B、Na 等元素外,其余元素一般均大于沉积物元素含量。磷质热性正常新成土仅磷元素稍高于沉积物,海积潮湿盐成土中仅 Na 元素较富集,其余元素一般都接近沉积物含量。

各土类之间元素含量的差异主要表现在,富磷岩性均腐土中 Mg、Ca、B、Na、 CaCO_3 等均小于海积潮湿盐成土和磷质热性正常新成土,其余元素则一般前者均大于后者。海积潮湿盐成土与磷质热性正常新成土相比,前者磷元素低于后者,而 Na 元素前者高于后者,其余元素均较接近。

元素在土壤剖面中的分布也存在一定规律性,但各土类和地区间有差异。从表 2、3 中可清楚地看到,元素在剖面中分异,以磐状富磷岩性均腐土发育较好,磷质热性正常新成土发育较差;一般来说,西沙群岛的土壤剖面中,元素分异的规律性更明显些,而南沙群岛土壤分异较差。元素在发育较好的剖面中,Mg、Sr、B 等元素及 CaCO_3 随深度的增加,其含量逐渐增加;P 元素一般在表层含量较低,而在一定深度内富集,Zn、Ba、Cu、Fe 等元素与磷元素的分异一致。

表 4 列出了南海诸岛各类土壤有效态 Zn、Cu、Fe、Mn、Mo、B 和速效 P、K 的含量。在这些元素的有效态含量中,较为突出的是,富磷岩性均腐土的有效性 Zn 和速效 P 较高,其含量绝大部分明显高于我国其它类型的土壤^[11、12]。磷质热性正常新成土和海积潮湿盐成土这些元素的有效性稍低,但也接近华南的各种酸性土壤。相反,有效态 Mo 含量较低,大部分低于各类红壤的平均含量,对作物生长而言,土壤的有效态 Mo 含量属低或很低的范围。

南沙群岛土壤的速效 K 含量较低,其含量大部分低于 100 mg/kg,接近华南红壤的平均含量,为缺 K 土壤,从西沙群岛土壤的磷磐层速效 K 含量看,K 的有效性较高,属富 K 土壤。有效 B 含量除海积潮湿盐成土外,一般高于我国华南红壤的有效态 B 含量,但低于我国西部的干旱土壤和盐成土,对作物生长而言,属中等水平。与其它盐成土一样,南海诸岛的海积潮湿盐成土有效 B 也较高。土壤有效 Cu 含量基本接近红壤平均含量,各类富磷岩性均腐土、磷质热性正常新成土有效性 Cu 含量高于海积潮湿盐成土。有效性 Mn、Fe 含量较低,接近我国碱性土壤的平均含量。

元素有效态含量在剖面上的分布,除 Mo 元素外,西沙群岛土壤的其余元素有效性几乎无例外地表现为自表层向下逐渐降低。南沙群岛土壤由于表层有后期生物碎屑堆

积，表层土壤有效性较差，但表层复砂之下，有效性的分布具有与西沙群岛类似的规律。

2.3 元素及有效性之间的相关性

元素间的相关性，能反映出成土过程中，元素的活动情况，为此，我们进行了元素间相关性的研究。从元素相关系数矩阵中（表 5）可看出几个明显的规律：

常量元素中，MgO 和 CaCO₃间达到极显著的正相关，而它们与 P₂O₅间达到极显著的负相关（表 5）。

微量元素中，Zn、Cu、Ba、Cd 等元素间均达显著或极显著正相关；Sr、V、Mo、Pb、B 等元素间的相关性也达到显著或极显著正相关；而这两组元素之间的相关性绝大部分为负相关，且都达到显著或极显著负相关（表 5）。其余微量元素间很少达显著相关，故在表 5 中未列出。

常量和微量元素间关系，也有着明显的规律性，即 Mg、CaCO₃ 与上述第一组元素间均达显著或极显著负相关，与第二组元素为显著或极显著正相关。

从以上讨论并结合聚类分析（图 1），可将上述元素和组分分为两组，即 MgO、CaCO₃、CaO、Sr、V、Mo、Pb、B 等元素为一组，P₂O₅、Zn、Cu、Ba、Cd 等元素为一组。

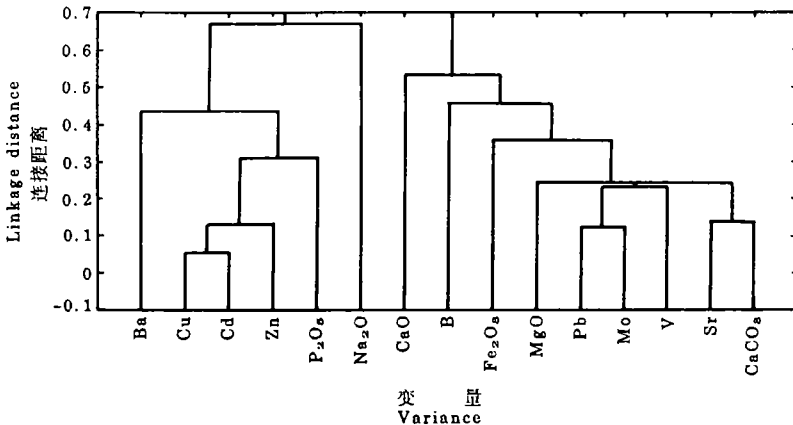


图 1 南海诸岛土壤元素聚类分析枝状图

Fig.1 Tree diagram showing cluster analysis of elements in soils of South China Sea Islands.

土壤元素的有效性与土壤的化学性质及其全量关系较为密切，因此，我们统计了土壤元素有效态含量与土壤基本化学性质及元素全量之间的相关系数（表 6）。结果显示，不同元素与土壤化学性质及全量之间表现不同的相关关系。有效 Zn、Cu、Mn 和 Fe 均与土壤 CaCO₃、pH 呈现出显著或极显著的负相关关系，而均与土壤 CEC 和有机质呈显著或极显著正相关关系。速效磷和速效钾等也有类似的关系（速效 P-CaCO₃， $r = -0.61^{**}$ ， $n = 27$ ；速效 P-有机质， $r = 0.87^{**}$ ， $n = 27$ ；速效 K-CaCO₃， $r = -0.82^{**}$ ， $n = 22$ ；速效 K-有机质， $r = 0.98^{**}$ ， $n = 22$ ）。有效性 Mo 与 CaCO₃ 和有机质未显相关关系。

表 5 南海诸岛土壤元素间的相关矩阵
Table 5 Correlation matrix among elements in soils of South China Sea Islands

	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CaCO ₃	Zn	Ba	Sr	Cd	Cu	V	Mo	Pb	B
Fe ₂ O ₃	1.00														
CaO	0.14	1.00													
MgO	0.63**	-0.09	1.00												
Na ₂ O	-0.10	-0.22	0.09	1.00											
P ₂ O ₅	-0.34	-0.12	-0.64**	-0.43*	1.00										
CaCO ₃	0.31	0.29	0.64**	0.38*	-0.95**	1.00									
Zn	-0.14	-0.20	-0.40*	-0.15	0.69**	-0.61**	1.00								
Ba	-0.36*	-0.49**	-0.48**	0.26	0.50**	-0.52**	0.57**	1.00							
Sr	0.10	0.33	0.51**	0.22	-0.84**	0.86**	-0.74**	-0.57**	1.00						
Cd	-0.11	-0.20	-0.41*	-0.23	0.68**	-0.67**	0.87**	0.41*	-0.75**	1.00					
Cu	-0.06	-0.34	-0.32	-0.24	0.60**	-0.63**	0.74**	0.38*	-0.68**	0.95**	1.00				
V	0.48**	0.07	0.76**	0.16	-0.80**	0.74**	-0.54**	-0.53**	0.62**	-0.46**	-0.38*	1.00			
Mo	0.15	0.19	0.62**	0.22	-0.70**	0.74**	-0.48**	-0.44*	0.76**	-0.41*	-0.34	0.77**	1.00		
Pb	-0.05	0.33	0.41*	0.32	-0.66**	0.68**	-0.51**	-0.38*	0.68**	-0.44*	-0.42*	0.73**	0.88**	1.00	
B	-0.04	0.47**	0.16	0.26	-0.48**	0.54**	-0.32	-0.44**	0.42*	-0.32	-0.38*	0.32	0.32	0.46**	1.00

表 6 南海诸岛土壤某些元素有效态含量与土壤基本化学性质之间的相关矩阵

Table 6 Correlation matrix between available element contents and some physico-chemical properties of soils in South China Sea Islands

变量 Variance	pH	有机质 O.M.	CaCO ₃	CEC	有效 Zn Available Zn	Zn	有效 Cu Available Cu	Cu	有效 Mo Available Mo	Mo	有效 B Available B	B	有效 Mn Available Mn	有效 Fe Available Fe	Fe ₂ O ₃
pH	1.00														
有机质	-0.78**	1.00													
CaCO ₃	0.56**	-0.62**	1.00												
CEC	-0.54**	0.81**	-0.83**	1.00											
有效 Zn	-0.56**	0.55**	-0.41*	0.47**	1.00										
Zn	-0.24	0.28	-0.61**	0.64**	0.38*	1.00									
有效 Cu	-0.38*	0.41*	-0.55**	0.57**	0.89**	0.63**	1.00								
Cu	-0.28	0.40*	-0.63**	0.67**	0.76**	0.74**	0.93**	1.00							
有效 Mo	0.00	0.07	-0.02	0.07	0.13	-0.03	0.14	0.18	1.00						
Mo	0.61**	-0.67**	0.74**	-0.72**	-0.29	-0.48**	-0.28	-0.34	0.02	1.00					
有效 B	0.05	0.37*	0.03	0.34	0.05	0.01	0.04	0.09	0.09	-0.10	1.00				
B	0.55**	-0.36*	0.54**	-0.35*	-0.05**	-0.31	-0.50**	-0.38*	-0.06	0.32	0.50**	1.00			
有效 Mn	-0.21	0.61**	-0.38*	0.71**	0.17	0.32	0.23	0.32	-0.08	-0.31	0.42*	-0.07	1.00		
有效 Fe	-0.35*	0.43*	-0.45*	0.58**	0.83**	0.59**	0.93**	0.88**	0.12	-0.17	0.17	0.38*	0.38*	1.00	
Fe ₂ O ₃	0.21	-0.40*	0.36*	-0.40*	-0.06	-0.14	0.05	-0.08	0.08	0.21	-0.36*	0.03	-0.24	-0.05	1.00

有效性 B 与有机质呈显著正相关关系, 与 CaCO_3 未显相关关系。除元素 K、Mo、Fe 等元素外, 其余元素 Zn、Cu、Mn、B、P 等元素有效态与全量间均达到显著或极显著正相关。

2.4 影响土壤中元素分异的因素

2.4.1 母质对元素分布的影响 母质是土壤形成的物质基础, 西沙和南沙群岛的土壤绝大部分是在生物沉积物母质上发育起来的, 而这些生物骨骼的主要矿物成分为方解石和文石, 其化学成分为 CaCO_3 、 MgCO_3 、 SrCO_3 , 这就决定了土壤中元素的含量以 Ca、Mg、Sr 等元素为主。

2.4.2 淋溶作用对元素分异的影响 西沙和南沙群岛位于热带地区, 为海洋性气候。雨量丰富, 热量充足, 尽管其上土壤形成年代较短, 但淋溶作用对土壤元素的分异仍有着明显的影响。 CaCO_3 、Mg、Sr 在富磷岩性均腐土剖面中, 表现出自上而下含量逐渐增加的趋势, 如西沙群岛的 W2-1、W7-2、W8-2 等剖面 (表 2、3), 表明这些组分在成土过程中, 逐渐向下淋溶。有意思的是, 在微量元素中, V、Mo、Pb、B 等元素也表现出了与上述元素相类似的变化规律 (表 3), 表明这些组分在成土过程中, 也产生了淋溶。

2.4.3 磷素富集和淋溶对元素分布的影响 频繁的鸟类活动, 使地表有大量的鸟粪堆积。在高温多雨的情况下, 鸟粪迅速分解, 释放出大量的磷酸盐, 随着枯枝落叶腐解过程中产生的腐殖酸一起向土壤下层淋溶, 并与土壤中的钙结合, 形成了“鸟粪磷矿”^[3]。这是南海诸岛土壤的一个重要特色, 由于上述作用, 使得土壤磷素在剖面中大量积聚, 虽然, 磷的移动性很小, 但鸟粪磷矿的溶解度要大于磷灰石, 因此, 在长期的成土过程中, 也会产生淋溶, 在剖面的一定深度内积聚, 引起剖面分异。这从表 2 各富磷岩

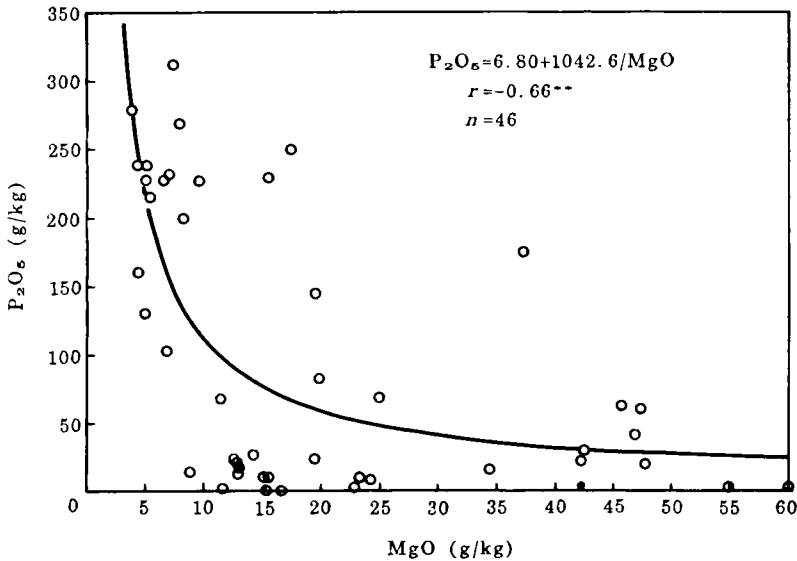


图 2 南海诸岛土壤中 P_2O_5 与 MgO 间的相关性

Fig. 2 Correlation between P_2O_5 and MgO in soils of South China Sea Islands.

性均腐土剖面中 P_2O_5 含量的变化可很清楚地反映出来。由于磷的富集作用,使得 P 与一些活动性较强的元素间(如 $CaCO_3$ 、Mg、Sr)的相关性均达极显著的负相关(表 4, 图 2)。

值得注意的是,从表 4 中 P 与各微量元素间相关系数可看出, P 与 Zn、Ba、Cd、Cu 等元素间均达极显著正相关(表 5)。对于这一关系,我们认为并非偶然,因磷酸盐胶体在土壤中带负电,而 Zn、Ba、Cd、Cu 等元素在土壤溶液中一般呈带正电的离子状态,前者对后者有较强的吸附性能,此外,上述微量元素磷酸盐的溶解度均较小,使它们易与磷一起富集。

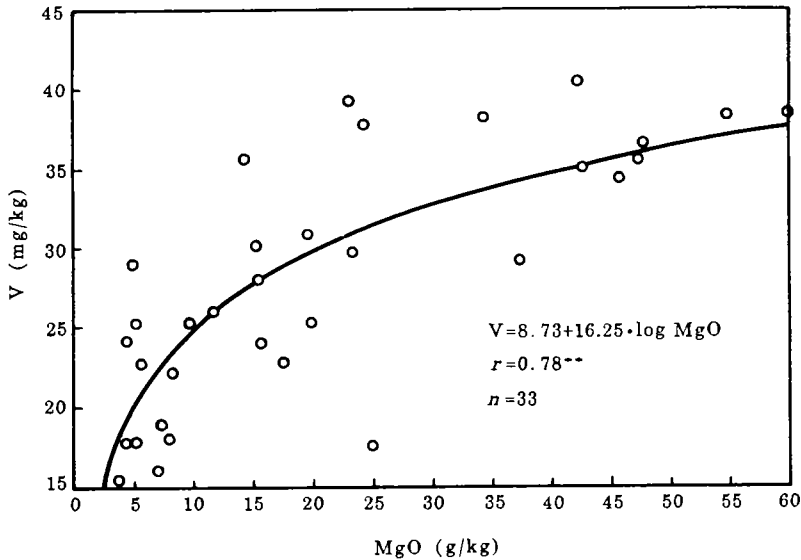


图 3 南海诸岛土壤中 MgO 与 V 元素间的相关性

Fig.3 Correlation between MgO and V in soils of South China Sea Islands.

相反, P 与 V、Mo、Pb、B 等元素间呈现极显著负相关关系,而与 MgO 间达极显著正相关(表 5, 图 3),仔细观察不难发现,这些元素均为变价元素,在热带土壤强氧化条件下,它们均以高价的负离子状态出现,磷酸盐胶体不易吸附,因而与易溶元素 Mg 等随水分淋失。

2.4.4 成土时间对元素分布的影响 成土时间是成土过程中的一个重要因素,尤其对发育于热带条件下的南海诸岛的土壤更是如此,因为,充足的热量和水分,使得成土过程异常活跃。已有资料表明,西沙群岛岛屿的形成时间为晚更新世晚期和全新世中期两个时期^[7,8],而南沙群岛则是在全新世海平面上升后堆积而成的^[9],成土年龄比西沙群岛要小。因为这一因素的影响,使得两地区土壤元素分布存在一定差异,如同是富磷岩性均腐土,土壤中的较易溶组分如 Mg、Sr、 $CaCO_3$ 、B 等,西沙群岛土壤一般要低于南沙群岛,而一些不太活泼的元素如 P、Zn、Ba、Cu 等前者往往要比后者富集(表 2、3),其次,元素在剖面中的分异,西沙群岛土壤要比南沙群岛明显,同是磐状富磷岩性

均腐土, Mg、Sr 元素在剖面中的分异前者比后者要明显得多(如表 2, 3 中 AG-8 与 W2-1, W7-2 相比)。

同时, 不同类型土壤间的成土年龄也存在差异, 一般来说, 随着成土年龄的增加, 土壤呈现磷质热性正常新成土、海积潮湿正常盐成土→普通富磷岩性均腐土→磐状富磷岩性均腐土的演化规律。因此, 不同土类间元素差异也很明显, 磷质热性正常新成土和海积潮湿正常盐成土中易溶组分的淋溶普遍要比富磷岩性均腐土弱, 不活泼组分则高于富磷岩性均腐土。同样, 元素在剖面中分布的规律性富磷岩性均腐土一般要比磷质热性正常新成土和海积潮湿正常盐成土明显, 前者易溶组分呈现上低下高, 不活泼组分呈现上高下低的元素分异规律。

2.5 影响土壤中元素有效性的因素

2.5.1 土壤酸碱度和碳酸钙含量

南海诸岛土壤独特的母质类型, 导致土壤 pH 值和 CaCO_3 含量较高, 土壤呈碱性。业已证明, 由于土壤溶液中 CO_3^{2-} 易与 Zn、Cu、Fe、Mn 等元素结合形成难溶的碳酸盐, 土壤溶液中的活性钙易与磷酸根结合形成难溶的磷酸盐, 因此, 土壤中这些元素的有效性与土壤中 CaCO_3 呈互相制约的关系, 即土壤中的 CaCO_3 含量越高, 这些元素的有效性越低^[11, 12], 南海诸岛的土壤正是反映了这一规律, 如前所述, 该地区土壤的 CaCO_3 含量与这些元素有效态含量间均达到极显著的负相关(表 6, 图 4)。由于南海诸岛土壤的酸碱度基本由土壤中 CaCO_3 所决定, 事实上, 本地区土壤中 CaCO_3 含量与 pH 值之间达到极显著正相关可说明这一点, 所以, 本地区土壤的酸碱度与有效性 Zn、Cu、Fe、Mn、P 等也具有上述类似的关系。

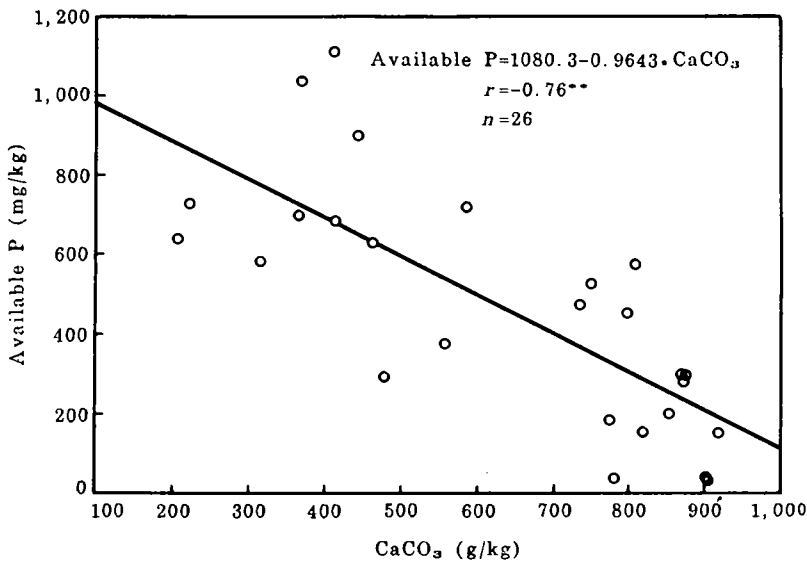


图 4 南海诸岛土壤中有效 P 与 CaCO_3 间的相关性

Fig.4 Correlation between available P and CaCO_3 in soils of South China Sea Islands.

2.5.2 土壤有机质和阳离子交换量

众所周知, 土壤阳离子交换量与元素有效性之

间有着密切的关系。从前述元素和土壤化学性质相关性的讨论可看出，南海诸岛土壤的有机质和阳离子交换量间达到极显著正相关。这主要是因为该地区各类土壤中粘土矿物含量甚微，土壤的阳离子代换量在很大程度上取决于其有机质含量^[3]。因此，在此将这两者一并加以讨论，研究它们与元素有效性的关系。

从上述土壤有机质与各种元素有效性间的相关关系可看出，有机质与 Zn、Cu、Mn、Fe、B、P 和 K 等元素有效态间均达到显著或极显著的正相关关系（表 6），仅与 Mo 等元素有效态间未达到显著相关。可见土壤有机质含量高低与元素有效性关系较密切，含量越高，越有利于元素有效性的发挥，从表 4 也可看出，大部分元素有效态的含量分布基本与有机质含量的分布一致。

2.5.3 元素全量 元素全量是其有效态的主要来源，在很大程度上决定元素有效态的大小。南海诸岛土壤中除元素 K、Mo 和 Fe 外，大部分元素的全量与有效态含量间达到显著或极显著的正相关，（表 6、图 5）可见，该地区土壤元素全量对有效态的贡献是不容忽视的。

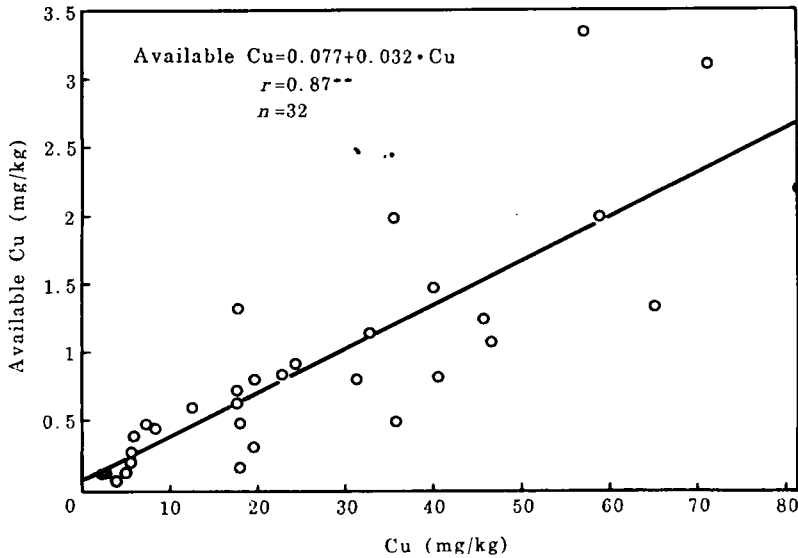


图 5 南海诸岛土壤全 Cu 与有效 Cu 的相关性

Fig.5 Correlation between total Cu and available Cu in soils of South China Sea Islands.

由于南海诸岛土壤 CaCO_3 含量较高，呈碱性，这将影响土壤中有效性 Zn、Cu 和速效磷的含量，但该地区土壤中这些元素有效性含量却较高，明显高于我国的碱性土壤及酸性土壤，很显然主要是这些元素的全量较高导致它们的有效态含量增加，可以说，该地区元素全量是决定大部分元素有效性的的重要因素。由于这一因素的影响，使得南海诸岛土壤的生物有效性也继承了全量的分布特征，呈现出与全量类似的地区和土壤类型间的分异规律。形成了该地区具有独特生物有效性即富磷、富锌和富铜的土壤类型。

参 考 文 献

1. 席连之, 1947: 南沙群岛土壤纪要。土壤季刊, 第 6 卷, 第 3 期, 77—80。
2. 陆发熹, 1947: 广东西沙群岛之土壤及鸟粪磷矿。土壤季刊, 第 6 卷, 第 3 期, 67—76。
3. 中国科学院南京土壤研究所西沙群岛考察组(龚子同、吴志东执笔), 1977: 我国西沙群岛的土壤和鸟粪磷矿。北京, 科学出版社。
4. 中国科学院南沙科学考察队, 1989: 南沙群岛及其邻近海区综合调查研究报告(一)(上、下卷)。北京, 科学出版社。
5. 中国科学院南沙科学考察队, 1992: 南沙群岛永暑礁第四纪珊瑚礁地质。北京, 海洋出版社。
6. 中国科学院南沙科学考察队, 1993: 南沙群岛及其邻近海区第四纪沉积地质学。长沙, 湖北科学技术出版社。
7. 卢演传、杨学昌、贾蓉芳, 1979: 我国西沙群岛第四纪生物沉积物及成岛时期的探讨。地球化学, 第 2 期, 93—102。
8. 业治铮、何起祥、张明书等, 1985: 西沙群岛岛屿类型划分及其特征和发育规律的研究。海洋地质与第四纪地质, 第 5 卷, 第 1 期, 1—14。
9. 中国科学院南京土壤研究所, 1995: 中国土壤系统分类(修订方案)。北京, 科学出版社。
10. 中国科学院南京土壤研究所著, 1978: 土壤理化分析。上海, 上海科学技术出版社。
11. 熊毅、李庆逵主编, 1990: 中国土壤。科学出版社。
12. 李庆逵主编, 1985: 中国红壤。科学出版社。
13. 龚子同, 刘良梧, 周瑞荣, 1996: 南海诸岛土壤的形成和年龄。第四纪研究, 第一期, 88—95。
14. 龚子同, 周瑞荣, 1996: 土壤和土壤地理, 见赵焕庭主编: 南沙群岛自然地理, 第十章, 232—257。
15. 龚子同, 周瑞荣, 1995: 南沙群岛的富磷岩性均腐土。土壤学报, 第 32 卷, 增刊(1), 69—80。
16. Gong Zitong and Huang Biao, 1995: Geochemistry of Soil Formation in South China Sea Islands, *Pedosphere* 5(4): 333—342.
17. Gong Zitong, Liu Liangwu, Zhou Ruirong, 1995: Soil in Islands of the South China Sea and their Ages. *Scientia Geologia*, Supplementary Issue (1). Beijing: Science Press, 247—250.

PEDOGEOCHEMISTRY AND BIOAVAILABILITY OF SOILS IN SOUTH CHINA SEA ISLANDS

Gong Zitong Huang Biao and Zhou Ruirong

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Summary

There are three soil types in South China Sea Islands, namely, Phosphic Lithomorphic Isohumisols, Holisols and Entisols, which are derived from bio-clastic and strongly calcareous sediments.

In comparison with their parent materials, the Phosphic Lithomorphic Isohumisols have higher contents of P, Zn, Cu, Ba, and Cd, which tend to increase gradually with time, and lower contents of Mg, Ca, Sr, B, V, Pb, and Mo, which tend to decrease gradually with time. The above-mentioned constituents in Entisols and Holisols are similar to those in their parent materials except for P and Na, whose contents are higher than those in parent materials. The factors affecting element distribution are mainly special bioclimate and parent materials, which also result in the remarkable influence of soil-forming time on element distribution.

Element availabilities of Phosphic Lithomorphic Isohumisols are characterized by enrichment in P, Zn, and Cu, and those of Holisols by enrichment in B. The factors affecting element bioavailabilities in soils are soil acidity, soil organic matter, cation exchange capacity and total element content, among which total element content has the strongest effect on P, Zn, and B availabilities, resulting that distribution of their element availabilities are similar to that of their total element contents.

Key words Soils, element geochemistry, bioavailability, South China Sea Islands