



CHASHU ZHONG DE KUANGZHI YUANSU
ZHONGGUO CHAYUAN TURANG HE

中国

茶园土壤和茶树中的 矿质元素

郑达贤 沙济琴 著



中国环境科学出版社

中国茶园土壤和茶树中的 矿质元素

郑达贤 沙济琴 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

中国茶园土壤和茶树中的矿质元素/郑达贤, 沙济琴著. —
北京: 中国环境科学出版社, 2012.4

ISBN 978-7-5111-0810-4

I. ①中… II. ①郑…②沙… III. ①茶园—土壤—矿质
元素—研究—中国②茶树—植物矿质元素—研究—中国
IV. ①S571.105②Q949.758.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 251430 号

责任编辑 张维平
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 4 月第 1 版
印 次 2012 年 4 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 24.25
字 数 550 千字
定 价 85.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

矿质元素在茶树和茶叶的干物质中虽然只占百分之几的比重，但却是茶树生长、茶叶产量、质量、相关保健功效和卫生安全有关问题的重要物质组分，因而备受人们的关注。其研究范围不断扩大，研究方法和手段不断更新，研究内容不断深入，已成为茶树和茶叶研究领域的一个重要方向。作者在 1990 年代偶然涉足这一领域，主要是从生物地球化学角度进行一些粗浅的探讨。由于对这一问题的兴趣和关注，积蓄了一些相关资料，对有关问题形成了一些不成熟的认识，但因其他工作的关系，未能继续进行更深入的实验研究。直至现在年已古稀，才得以从其他工作中解脱出来。回头翻阅堆在柜中的资料，似乎还有一些有用的东西。朋友建议把它整理出来，自己也想借以促使脑神经继续运动，以免停滞而痴呆，同时也给自己涉足这一段路做一个记录，给关心支持这一工作的前辈、单位、领导和朋友们一个交代。这样，就产生了这一本有关茶叶的不成熟作品。

书中除了作者自己研究工作获得的资料数据外，广泛引用了 30 多年来国内相关研究公开发表的数百篇论文的数据和资料，包括结论一致的、不一致的和相反的信息，目的在于希望使书中所提出的和所引述的观点有可信与否的判断依据和寻根溯源的方便，因为所引用的某些资料和数据也许有可能因为原始实验设计或测试技术的缘故而失真，而作者只能把少数在逻辑上自相矛盾和在学科确信的正确范围以内不可能存在的数据予以舍弃，希望依靠大数法则能在一定程度上消除某些数据失真而得出的错误结论，但这并不是万能的；植物和土壤中许多矿质元素含量的统计分布一般不遵循正态分布，而且一般是正偏的，因而关于矿质元素的统计一般也不宜采用算术平均和居于正态分布的参数统计检验方法。但在已发表的论文中，大部分只计算其算术平均值和标准差，在利用这些数据时无法把它们转化为几何均值并按几何均值进行统计，只能继续沿用算术均值统计，因而许多元素的统计结果可能略有偏大，但在许多场合下作为相对大小的比较，似乎也不会得出错误的结论，这也是必须说明的。本书的书名冠以《中国茶园土壤和茶树中的矿质元素》，本应包括元

素在土壤中和从土壤到茶树直至成品茶叶及冲泡饮用有关的生理生化机制及药理学毒理学问题，也应包括元素之间的协同和拮抗作用的分析，虽然在这些方面也有一些成功的研究，但已在作者的知识 and 再学习的精力之外，故作者在书中不敢涉及，以免班门弄斧，但这也使本书实不符“名”。本应换一个书名，但考虑再三，也拿不出其他更合适的书名，只好姑且用之，但愿不至贻笑大方。另外，由于精力有限，本书也未能更广泛参阅国外有关研究成果，未能广泛征求专家意见，这可能使一些观点成为井蛙之见，或陈词滥调，或偏颇错误，殷切希望行家不吝指正。

在作者的研究中，在本书的写作和出版中，得到庄晚芳先生、张天福先生、庄任先生、林心炯先生的关心和支持，得到福建省科学技术厅、福建省教育厅，福建师范大学地理研究所和地理科学学院的支持和资助，得到中国科学院地理研究所化学地理研究室和李日邦研究员、王五一研究员、王丽珍高工和陆毅伦高工在研究和分析测试上的大力支持，得到福建省农科院茶叶研究所郭吉喜先生、安溪县茶科所叶锦凤先生和武夷山市茶场彭连娣女士的协助，在统计、绘图和文字编辑方面得到陈加兵博士和陈美凤硕士的大力帮助，在此一并表示衷心的感谢。

作者

2011年5月于福州

目 录

1	茶园土壤中的矿质元素.....	1
1.1	与矿质元素相关的茶园环境特征.....	1
1.2	茶园土壤矿质元素概况.....	4
1.3	福建茶园土壤矿质元素系统研究.....	29
	参考文献.....	63
2	茶树和茶叶中的矿质元素.....	66
2.1	茶叶中的矿质元素概况.....	66
2.2	茶树各器官中矿质元素分布.....	70
2.3	茶树鲜叶 21 种矿质元素含量的系统比较.....	83
	参考文献.....	132
3	茶园土壤和茶树中的铝.....	135
3.1	茶区土壤中的铝.....	135
3.2	茶树中的铝.....	147
3.3	茶园生态系统铝的生物地球化学循环.....	164
	参考文献.....	172
4	茶园土壤和茶树中的氟.....	175
4.1	茶园土壤中的氟.....	175
4.2	茶树中的氟.....	191
4.3	茶园生态系统氟的生物地球化学循环.....	213
	参考文献.....	220
5	茶园土壤和茶树中的锰.....	224
5.1	茶园土壤中的锰.....	224
5.2	茶树和茶叶中的锰.....	233
	参考文献.....	250
6	茶园土壤和茶树中的硒.....	253
6.1	中国茶区在硒的景观地球化学分布空间中的位置.....	253

6.2	茶园土壤中的硒.....	257
6.3	茶树中的硒.....	271
6.4	提高茶叶硒含量的可能途径.....	291
	参考文献.....	297
7	茶叶中矿质元素的营养保健和卫生安全问题.....	302
7.1	加工对茶叶矿质元素含量的影响.....	302
7.2	茶叶冲泡中矿质元素的浸出特征.....	305
7.3	中国居民饮茶中矿质元素摄取量估算.....	333
7.4	茶叶矿质元素的营养保健效用和卫生安全风险评价.....	355
	参考文献.....	375

1 茶园土壤中的矿质元素

茶园土壤矿质元素含量及其形态是茶树矿质元素摄取的基础，而茶园土壤的性质则对其矿质元素含量及其形态起主导影响作用。关于茶园矿质元素的研究，不同时期有其不同的关注重点。1990 年代之前多集中于矿质养分对茶树生长的影响上，特别是对茶叶产量的影响；1990 年代除了继续关注土壤矿质元素与茶叶产量的关系外，重点逐步转移到土壤矿质元素与茶叶品质的关系上，并开始关注在茶叶中具有特殊含量水平或具重要意义的元素，如 F、Se、Al、Ca、S、Mo、Mn、稀土元素等，同时开始从整体上关注某些矿质元素的生物地球地球循环问题；21 世纪以来，茶园土壤矿质元素的研究逐步转向茶园土壤重金属污染和茶叶的卫生安全保障问题，因而土壤中的 Pb、As、Cd、Hg 等重金属的研究受到较大的关注，各个领域的研究论文均大量地发表。这一过程包括研究涉及元素范围的扩大、研究手段的现代化与多样化和研究内容的扩大与深入。但不论从茶树营养角度（如 N、P、K、Mg）、从茶叶保健价值角度（如 Se）、从饮茶卫生安全角度（如 F、Al），还是从重金属污染传递链与控制角度（如 Pb、As、Cd、Hg）进行研究，均涉及茶园土壤的环境背景、矿质元素总量、其形态特征及其与茶树、特别是茶叶中矿质元素的关系问题。

1.1 与矿质元素相关的茶园环境特征

1.1.1 强度风化淋溶、以铁铝富集为特征的母质

中国茶区土壤主要是亚热带和热带的铁铝土和富铁土，以及常湿淋溶土和湿润淋溶土的一部分，部分茶园建设在酸性紫色正常新成土、湿润正常新成土和湿润冲积新成土上（按原土壤分类系统主要是赤红壤、红壤、黄壤和黄棕壤，其次为砖红壤、酸性紫色土和黄褐土，少量茶园建立在潮土和棕壤上^{[1]309-320}）。陆景冈认为，我国茶树基本都种植在古红土上，特别是北方（山东、河南）和西藏高原东南边缘的一些特殊茶区，除了其基本气候条件达到茶树生长的基本要求外，土壤也都是在古红土上发育的，即其母质已经历了长期的淋溶，具有茶树生长需要的富铝化的土壤基础；并认为北方棕壤、黄棕壤之所以可以种茶，只是其中富铝化的部分；一些石灰岩区之所以可以种茶，那也是石灰岩上覆盖的、经长期风化淋溶、钙多已流失，已经是酸性的红壤化的土壤^[2]。的确，中国茶园土壤绝大部分是在红色风化壳或红色风化物的再堆积物上发育而成的。红色风化壳是岩石风化历史最长、风化发育最彻底的残留物及其再堆积物，是早更新世以来几百万年连续或间断的岩石风化淋溶的结果。因此，发育在红色风化壳及其堆积物上的土壤主要是富铝化、富铁化的土壤，是土壤进行系列中经历时间最长的土壤^{[3]278-280}。根据黄镇国等整理的我国南方 12 省（区）85 个典型红色风化壳剖面的母岩和风化壳化学成分数据及其风化程度计算成果^{[4]40-51}，计

算了我国南方各种岩石上发育的风化壳各主要矿质元素的平均丰度比和岩石风化程度(表 1-1-1)。从表 1-1-1 可以看出,中国南方红色风化壳经历了强度风化,母岩的 Ca、Na 极强度淋失。即使是在石灰岩上的风化壳,Ca 的淋失量也在 90%以上,残留的 Ca 含量仅 2%左右,仅略高于其他岩石上风化壳的 Ca 含量;Mg、K 强度淋失;Si 略有淋失;而 Al、Fe 高度富集。在这种风化壳上形成的土壤,其 Al、Fe 的含量水平必然高于世界土壤的平均水平,而 K、Na、Mg 的含量水平要低于世界土壤的平均水平。正是由于这些大量元素的含量态势,决定了土壤中其他矿质元素的含量及其可给态的状况。K、Na、Ca、Mg 的强度淋溶实际上表明土壤中碱金属、碱土金属及与其性质相近的元素的贫化,而 Fe、Al 的高度富集则表明土壤中与 Fe、Al 性质相近的元素,特别是过渡族重金属元素的相对富集,同时也使一些在酸性氧化环境中与 Fe、Al 等形成难溶化合物的阴离子相应地淀积下来。

表 1-1-1 中国南方红色风化壳及其母岩矿质元素氧化物含量及其丰度比(K)和风化强度(%)

岩石	n	分项	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	风化强度
花岗岩	33	A*	57.16±11.30	23.28±6.29	5.18±3.31	0.31±0.47	0.58±0.49	2.25±1.56	0.51±0.76	40.48±7.59
		B*	72.92±2.41	14.33±1.38	2.05±1.14	1.36±0.67	0.75±0.47	3.94±1.00	1.96±0.96	
		K*	0.79±0.16	1.62±0.44	2.81±1.66	0.32±0.38	0.85±0.65	0.62±0.56	0.19±0.27	
玄武岩	22	A	33.16±7.43	27.01±6.92	22.44±4.02	0.54±0.90	0.92±1.52	0.43±0.25	0.36±0.28	46.63±9.76
		B	50.86±2.23	14.72±0.83	9.10±3.90	8.40±0.77	7.12±1.27	1.05±0.38	3.11±0.36	
		K	0.65±0.15	1.83±0.47	3.21±1.98	0.06±0.10	0.12±0.17	0.29±0.22	0.15±0.20	
流纹岩 粗面岩	2	A	60.06±4.67	20.78±2.00	5.37±2.24	0.28±0.27	0.21±0.04	3.45±0.20	1.03±1.19	31.40±2.53
		B	69.97±0.98	14.42±0.16	3.94±0.10	0.91±0.84	0.53±0.41	5.30±0.95	2.62±1.58	
		K	0.86±0.08	1.44±0.13	1.36±0.53	0.79±1.03	0.52±0.33	0.67±0.16	0.32±0.26	
石灰岩	7	A	40.15±8.81	25.61±6.96	14.45±5.10	2.01±2.89	1.78±1.88	1.31±1.80	9.28±0.30	36.64±5.18
		B	2.28±1.57	0.86±0.51	0.28±0.20	41.92±5.13	7.82±6.01	0.28±0.18	0.22±0.20	
		K	23.71±13.41	42.92±33.51	50.35±18.24	0.09±0.12	0.22±0.17	6.49±9.78	4.37±7.08	
砂页岩	6	A	61.98±9.16	21.22±8.40	7.08±2.02	0.31±0.23	0.58±0.53	1.34±0.76	0.35±0.27	33.18±5.88
		B	67.80±9.16	15.28±1.70	5.76±1.09	0.37±0.27	0.86±0.50	2.08±0.77	0.21±0.10	
		K	0.92±0.16	1.39±0.59	1.28±0.48	1.08±1.03	0.81±0.72	0.64±0.58	1.76±1.22	
紫色 砂页岩	5	A	64.47±14.86	16.86±6.92	7.08±4.05	0.39±0.24	1.42±0.83	1.90±1.03	0.30±0.28	29.56±2.84
		B	63.07±13.34	13.42±5.09	4.14±3.70	5.25±3.24	1.53±0.73	2.40±0.59	1.81±1.79	
		K	1.01±0.13	1.26±0.26	1.66±0.58	0.11±0.11	0.95±0.41	0.86±0.55	0.22±0.22	
第四纪 红黏土	10	A	52.79±12.66	23.12±6.51	10.32±4.92	0.64±0.95	1.01±0.24	2.00±1.22	0.53±0.80	39.0±7.69
		B	62.22±6.09	18.35±3.56	7.24±1.24	1.05±0.13	4.12±2.00	2.04±0.75	0.84±0.34	
		K	0.84±0.14	1.24±0.17	1.37±0.52	0.59±0.85	0.41±0.39	0.88±0.54	0.49±0.67	
第四纪 沉积	7	A	52.94±20.08	24.37±13.80	8.53±10.28	0.16±0.14	0.64±0.30	0.95±1.14	0.35±0.73	39.74±6.10
		B	48.42±20.86	31.98±14.18	8.01±3.75	0.85±0.55	1.24±0.45	2.47±0.97	1.31±1.04	
		K	1.11±0.24	0.94±0.58	1.16±0.99	0.23±0.21	0.54±0.29	0.33±0.42	0.35±0.43	

根据文献(4)表 4.1 整理。

* $K=A/B$, A 为风化壳, B 为母岩;

风化强度 $W(\%) = [1 - 1/2 (E' \times \bar{T} + E)] \times 100\%$

E' 为 3 种风化率 (SiO_2/Al_2O_3 , Al_2O_3/Fe_2O_3 , R_2O_3/SiO_2) 的均衡程度;

$\bar{T}$ 为 5 种氧化物 (SiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O) 的淋溶系数均值;

E 为 7 种氧化物 (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O) 变异系数的均衡度。

1.1.2 季节变化明显的湿润和潮湿亚热带气候为主的水热环境

中国茶园绝大部分位于湿润和潮湿亚热带区域。这一区域年均气温大部分在 16°C 以上, 其中华南在 20°C 以上。只有局部地区(如山东)为 $14\sim 16^{\circ}\text{C}$ 。1 月均温大部分区域在 0°C 以上, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温大多在 $4\,500^{\circ}\text{C}$ 以上, 华南则在 $6\,500^{\circ}\text{C}$ 以上, 绝大部分茶区年降水量在 $1\,000\text{mm}$ 以上, 大部分在 $1\,400\text{mm}$ 以上, 有的地区高达 $2\,000\text{mm}$ 左右, 仅少数地区在 $1\,000\text{mm}$ 左右; 大部分茶区干燥度为 $0.5\sim 1.0$, 属湿润区域, 有相当区域在 0.5 以下, 属潮湿区。暖热多雨的湿润和潮湿气候利于茶园生物量的提高和枯落物的分解, 加速矿质元素的生物小循环, 也产生大量的径流(地表和地下径流)利于土壤矿质元素的淋溶。另一方面, 由于强的季风环流使降水量季节变化十分明显, 每年周期性的干湿交替使茶园土壤总体上的氧化环境中可能在雨季连续的短时间局域渍水阶段出现氧化还原电位的短时间的局部下降, 使土壤中某些对氧化还原电位敏感的元素(如 Fe 、 Mn)的活动性发生变化, 从而影响这些元素和受这些元素束缚的其他元素的生物地球化学行为及其对茶树的有效性。

1.1.3 盐基高度不饱和的酸性土壤

茶园土壤均为酸性、微酸性, 适应茶叶这种喜酸植物的需求。据吴洵等对浙、赣、桂、粤、黔、皖等省区茶园土壤 pH 调查, 茶园土壤 pH 为 $3.9\sim 6.8$, 其中在 5.0 以下的占 70% 左右^[5]。与土壤酸性相应的是土壤代换性盐基量低, 盐基饱和度很低(表 1-1-2)^{[1]318-320}。由于土壤的富铝化作用, 因而在土壤的酸度中, 代换性 Al 占有优势地位。据吴洵对 51 份土壤测定结果, 土壤交换性 Al 与交换性 H 的比值为 $97:3$, 交换性 Al 的饱和度 $22.2\%\sim 54.1\%$, 占有相当高的比例^[5]。

表 1-1-2 茶园土壤的 pH、代换性盐基总量和盐基饱和度

土壤	黄棕壤	黄壤	红壤	赤红壤	砖红壤	酸性紫色土
pH	4.5~6.5	4.5~6.0	4.0~6.0	4.0~5.5	4.0~5.0	5.5~6.5
代换性盐基/ ($\text{mmol} \cdot 100\text{g}^{-1}$) (+)		5~15		1~2		
盐基饱和度/%	20~80	15~50	30~50	10~30	<20	

根据文献[1] 318-320 页资料整理。

盐基高度不饱和的酸性土壤和土壤中主导矿质元素的特征和行为是互为因果的, 但作为一个在土壤长期发育中形成的特征, 又是一个对矿质元素在土壤中的行为及植物对土壤矿质元素的摄取起独立作用的重要因素, 其作用主要表现在控制土壤矿质元素的形态, 溶解度及其在土壤中的积聚和淋溶, 影响矿质元素对茶树的有效性及其在茶园中的生物地球化学循环。

以上特征(富铁、富铝的风化壳及其再堆积物为主的土壤, 暖热的季节性周期变化的潮湿和湿润水热环境、盐基不饱和的酸性土壤条件)使 Fe 、 Al 、 Mn 、 H 成为控制茶园矿质元素生物地球化学行为的最主要的标型元素, R_2O_3 和高岭土为主的黏土矿物成为茶园矿质元素库所依存的主要基质。

1.1.4 以耐铝富铝、聚锰聚氟为特征的多年生茶树灌丛人工群落

多年生的茶树是茶园的优势种群,在许多茶园几乎是唯一的植物种群。而茶树在其发生地环境影响和千万年漫长的遗传演化过程中,形成了耐 Al 富 Al、聚 Mn 聚 F 的营养生理特征。茶树的 Al、Mn、F 的含量可达 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 数量级,分别为地球陆地植物这些元素一般含量的 4~5 倍、40 倍和 10^3 倍。而且这些元素又都高度聚集于茶树的老叶中,因而具有很高的生物循环速率。显然,茶树中这些元素的吸收和代谢状况对其他元素的吸收和代谢具有相当的影响。

1.1.5 以周期性嫩叶采摘、修剪和特定的耕作方式为特点的生产和管理活动

茶园是为采摘茶叶产品而经营的人工生态系统,在其生产和管理中人为的干预对矿质元素的收支、形态及循环有重大影响,也区别于其他的人工生态系统。首先,土壤的耕作,茶园建设时和茶树种植时的深翻使土体的搅动比一般农田大得多,大多茶园 50cm 深度以内的土层都已失去了原自然土壤的层次格局,加上深施肥料,使矿质元素在土层中的分异也有很大的变动;在茶树种植之后,行间的松土和施肥也使矿质元素在园区范围内的空间格局有很大的变异;其次,茶树对矿质元素吸收利用上的多元性、喜铵性、低氯性、嫌铝性、阶段性和季节性^{[1]326-328},决定了茶园管理上必要的对应措施,这些措施显然对茶园生态系统矿质元素的赋存形态和循环特征产生重大影响,形成了特定元素的附加输入源并导致与其相应的矿质元素行为的变化;再次,一年中茶树嫩叶的多次采摘使富集于嫩叶中的元素不断输出茶园生态系统之外,改变了生物小循环方向。此外,每年休眠期的集中修剪也使茶园通过枯枝落叶的矿质元素由茶树向土壤回归从全年分散回归过程变为一次性集中回归,同时也由于修剪比自然枯落有更高的枝条比例而增加了在枝条中含量较高的矿质元素回归的比例。

1.2 茶园土壤矿质元素概况

1.2.1 矿质元素总量

多年来,许多研究人员从茶树营养角度、从茶叶中有关健康的特殊元素角度、从茶园土壤元素地球化学背景含量角度和环境污染控制的元素角度对中国茶园土壤矿质元素进行了多方面的研究,涉及的元素 40 多种。近年发表的文献中进行元素总量测定的有 Al、As、B、Ba、Ca、Cd、Cl、Co、Cr、Cu、F、Fe、Ga、Hg、K、Mg、Mn、Mo、Na、Ni、P、Pb、S、Sb、Sc、Se、Si、Sn、Sr、Ti、V、Zn 及镧系元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Dy。此外,还有炼铀厂附近茶园土壤中的 U、Ra、Th 等^[46]。其中测定最多的元素是 P 和 K。不同研究方向关注的元素重点不同,但也有些元素是多方向研究共同关注的。根据文献中涉及元素的组合情况,将有关茶园矿质元素元素总量的测定结果汇集于表 1-2-1~表 1-2-5。

表 1-2-2 中国茶园土壤 B、Ca 等 10 种元素含量

单位: $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

地区	土层/cm	样品数	B	Ca	Co	Fe	Mg	Mo	Ni	S	Si	Zn	文献
四川	0~35	422	60.6±20.6	2 434±1146	14.0±8.4	11 920±5 400	7 649±3 493	0.83±0.83	20.1±9.8	25.9±24.5		50.4±28.4	[18]
福建	0~20	8						2.6±2.7				153.0±39.9	[25]
福建安溪	0~40	24				36 408±9 305		1.83±1.07				102±24	[7]
广西	0~20	6		426±333			902±45					50.8±29.0	[26]
浙江安吉		11	54.2±16.4	4 602±3 791		31 022±6 900	9 500±8 123	1.22±0.31	24.9±12.2	277±67	330 683±23 489		[27]
江苏仪征	0~100	8			14.4±3.5							84.5±18.7	[28]
湖北 三峡区	0~20	6		1 633±995		38 367±12 381	8 250±3 849				317 333±14 539	102.2±28.0	[29]
河南信阳	0~20	72	15.6±3.0	8 097±4 349	14.2±6.0	41 150±15 360		1.21±0.8			292 505±21 189	79.6±15.5	[20]
福建 三峡区	0~60	23		415±350	11.8±5.8	40 200±12 512	1 447±728		20.3±9.7			125.8±22.6	本研究
福建 闽南	0~25	150				31 910±15 800			19.06± 12.56				[30, 31]
浙、苏、皖	耕层	13							35.80± 12.01				[32]
浙、皖、粤、赣、 桂、湘、黔、滇	0~45	130								225±56 (24~835)			[33]
苏、浙	0~20	15								204±122 (41~403)			[34]
湖南	0~20 20~40	55 55								250±21 266±28			[35]

表 1-2-3 中国茶园土壤中 Cr、Cu、Cd、Pb、Hg、As 含量

单位: $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

地区	剖面/cm	样品数	Cr	Cu	Pb	Hg	Cd	As	文献
福建福安	0~40	151	32.5±15.3 (0.36~79.9)	24.9±10.5 (2.6~52.0)	55.3±75.1 (8.4~680.0)	0.12±0.04 (0.01~0.28)	0.15±0.04 (0.04~0.26)	7.5±5.7 (0.8~20.5)	[36]
广西桂林、来宾	0~20	6	116.2±65.1 (69.8~164.0)	21.3±3.9 (17.3~27.1)	23.3±7.4 (16.1~32.5)		1.96±0.64 (1.10~2.64)		[26]
江苏仪征	0~100	8	81.4±23.4	23.7±4.8	42.9±3.8	0.09±0.01	0.52±0.02		[28]
浙江安吉		11	64.0±26.7	27.4±15.7	32.0±4.4	0.11±0.01	0.41±0.27		[27]
贵州开阳	0~20	127	58.8 (20.1~190.5)	28.8 (6.6~90.0)	68.4 (13.4~405.4)	0.33±0.21 (0.01~3.52)	0.14 (0.01~1.48)	16.4 (2.0~39.1)	[37]
湖北	0~30	61	50.6±24.6 (6.6~151.0)	24.9±11.9 (7.5~58.0)	23.1±9.8 (5.2~53.8)	0.04±0.05 (0.00~0.26)	0.11±0.13 (0.03~0.97)	8.89±7.16 (0.00~34.90)	[38]
重庆	0~40	3	13.2±6.1	17.5±5.6	33.5±3.5	0.12±0.01	0.36±0.18	10.07±1.14	[39]
河南信阳	0~20	72	58.7±29.9	30.5±12.0	27.8±7.9	0.023±0.005	0.12±0.01	3.97±0.98	[20]
山东崂山	0~20	72	47.6±18.4 (18.8~124.4)	18.8±10.4 (9.19~71.3)	34.1±10.2 (16.9~61.3)	0.044±0.037 (0.014~0.218)	0.16±0.12 (0.047~0.788)	5.79±1.33 (2.39~9.08)	[40]
浙江丽水		9		12.31±4.81	46.1±16.3		0.93±0.54		[41]
云南	0~20	45		39.9 (29.3~48.6)	18.0 (7.7~36.8)		0.10 (0.01~0.19)		[42]
琼、粤、闽、浙、赣		38						18.72 (2.29~91.67)	[43]
福建	0~20	8		13.5±6.5 (7.1~52.2)					[25]
浙江 9 县市 (100m 以内公路边)	0~20	23			33.70 (6.87~63.34)		1.24 (0.074~3.28)		[44]
福建 三茶区	0~60	23	39.16±12.95 (15.88~61.57)	27.1±15.7 (7.5~58.1)					本研究

表 1-2-4 中国茶园土壤 Ba、Ga 等元素含量

单位: $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

地区	剖面/ cm	样品数	Ba	Ga	La	Na	Sn	Sr	Sc	Ti	V	Sb	Cl	文献
福建三茶区	0~60	23	145.6±112.9	16.9±6.9	40.2±19.2	1 195±1 692	3.77±1.06	25.8±13.5	13.8±4.0	4 400±1 040	78.9±35.9			文献
其他地区	见脚注				30-35 ^a	4 367±4 557 ^b				1 315±1 338 ^c	98.5±82.9 ^c	23.0±17.4 ^c	4.97±1.74 ^d	见脚注
地区	剖面/ cm	样品数	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Dy	Y					文献
安徽青山茶场	0~15	1	60~70	8~10	30~35	5~8	5~8	5~7	25~30					45

a 文献[45], 样品数 1, 剖面 0~15cm, 数值根据文中图 1a 的范围估计; b 文献[29], 样品数 6, 剖面 0~20cm; c 文献[18], 样品数 422, 剖面 0~35cm; d 文献[46], 样品数 9, 剖面 0~45cm。

表 1-2-5 中国茶园土壤中 Al、Mn、F、Se 含量

元素	Al/ 10^{-3}		F/ 10^{-6}		Mn/ 10^{-6}		Se/ 10^{-6}	
项目	全剖面	表层	全剖面	表层	全剖面	表层	全剖面	表层
剖面数	47	64	35 [50]*	93 [110]	23	484 (317)***	61	244 [304]
0~20cm	84.4±33.0	82.3±34.2	280.8±98.3 [984.1±1 279.2]		401±228	412±288 (541±234)**	0.432±0.175	0.347±0.162 [0.558±1.940]
20~40cm	92.0±36.1		274±105.7 [647.8±678.0]		402±298		0.437±0.175	
40~60cm	93.3±33.0		285.2±106.4 [491.8±409.7]		583±103		0.383±0.162	
0~60cm				324.6±108.7 [564.5±755.6]		(415.0±274.1)***		

根据第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章的相关数据整理, 其中*, [] 包括高地质背景区和非高地质背景区的剖面数和含量数据平均; **, () 按各省茶园面积比例加权平均; ***, (<) 有 0~40cm 土层数据的剖面数和平均值; 其余数据均为非特殊高地质背景区剖面的测定数据。

从表 1-2-1~表 1-2-5 可以看出:

(1) 中国茶园土壤 39 种矿质元素的含量水平大致按以下数量级分布:

$n \times 10^{-1}$ Si

$n \times 10^{-2}$ Al*, Fe、K**

$n \times 10^{-3}$ Ca**, Mg、Na、Ti

$n \times 10^{-4}$ Ba、S**, Mn、P、F

$n \times 10^{-5}$ B、Co、Cr、Cu、La、Ni、Pb、Sb、V、Zn*、Ga、Sc、Sr、(Ce)***、Nd、Y

$n \times 10^{-6}$ Mo、As*、Sn、(Pr)、(Sm)、(Gd)、(Dy)、(Cl)

$n \times 10^{-7} \sim n \times 10^{-8}$ Se、Hg**, Cd

*, 有些区域含量比该范围高出一个数量级; **, 有些区域含量比该范围低一个数量级; *** () 括号内元素的含量范围由局域或个别样品测定结果确定, 仅具参考价值。

(2) 中国茶园土壤含量较高的主导矿质元素含量态势与中国土壤矿质元素含量背景值^[47]比较表明, 茶园土壤中的 Al、Fe 等元素含量高于中国土壤这些元素含量的平均水平, 碱金属、碱土金属及 S 等元素含量低于中国土壤的平均水平, Ti、Mn、P、Zn 等元素的含量有低有高。这些元素和土壤有机质状态一起实际上从整体上控制着茶园土壤的地球化学环境, 因而也制约着土壤中其他微量和超微量元素的行为。

(3) 中国茶园土壤中 39 个矿质元素含量中大部含量的变异系数都不太大, 多在 1~2 个数量级范围内, 表明在茶树分布的亚热带、热带区域范围内, 大多数矿质元素含量是相对较为稳定的。

(4) 茶园土壤中一些元素的含量水平具有显著规律性的地域差异, 如 Al 含量有从南方向北方下降的趋势, 而 Ca、Mg 含量则自南向北增高。

(5) 在靠近污染区域的茶园表层土壤中一些矿质元素含量可能在一定程度上受污染的影响。如靠近公路的茶园土壤中 Pb、Cu、Mn、Zn 等元素含量与距公路的距离成反比(表 1-2-6)^[48]。

表 1-2-6 南京 312 国道旁茶园土壤重金属含量

单位: $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

与公路距离/m	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Zn
5	50.7	0.25	68.4	38.1	748	33.1	103.0
10	40.4	0.23	65.9	33.1	746	33.2	82.5
20	40.1	0.19	65.8	33.6	698	30.6	87.5
40	39.3	0.25	70.3	35.2	712	37.3	86.4
60	38.5	0.26	73.3	34.8	731	37.2	80.1
80	38.6	0.19	72.1	29.9	649	34.9	79.1
100	39.1	0.21	62.6	25.8	408	28.3	69.5

根据文献^[48]表 1 整理。

1.2.2 茶园土壤矿质元素的形态

矿质元素以多种形态存在于土壤中。同种元素的不同形态在不同区域、不同类型的土壤中比例不同。矿质元素的不同形态对植物的可给性不同, 且同种元素的同种形态在不同的环境条件下对植物的可给性也不尽相同。这就造成了不仅土壤中矿质元素总量与其被植

物吸收量的关系十分复杂,而且也难以找到土壤矿质元素的某种形态或某些形态与其被植物吸收的量之间,或与其在植物的含量之间在不同区域、不同条件下的普适性的通用关系。尽管如此,长期以来人们仍然孜孜不倦地寻求土壤中矿质元素形态的分离和测定方法,研究矿质元素的各种形态与植物摄取的关系。在中国茶园土壤矿质元素的形态及其与茶树的摄取、生长关系的研究中,P、K两种元素研究较多,其他植物生长必需的营养元素及Al、Se、F等元素也有一定的研究,而其他非必需元素及有害的重金属元素研究较少。从总体上看,土壤矿质元素与茶树的关系大致可分4种情况:一是茶树生长必需的构成植物基础物质的大量矿质元素,包括P、S、K、(Ca)、Mg。这些元素作为植物器官、组织、细胞的组成成分在植物体内的含量相对稳定,变异幅度较小。这些元素在植物中含量的差异主要决定于不同植物种类和品种在器官、组织及细胞组成与比例上的差异,其次才是环境的影响。土壤中这些元素的供给能力首先是通过影响植物细胞、组织和器官的形成与生长而体现在植物干物质产量及各器官、组织干物质质量及有机组成比例上,只有在较小的幅度上才体现这些元素在植物干物质中的含量差异上。所以长期以来,茶园土壤中这些元素与茶树关系研究的重点多集中于茶叶产量和质量的关系上,只有少量关注这些元素在茶叶中的含量。其中对P、K在土壤中的形态及其地域分布特征,P、K为植物吸收的机理及其在植物代谢中的作用有较多的研究。但由于P、K作为施肥的主要成分,因而在土壤中的含量难以进行地域比较。二是茶树生长必需的与植物代谢有关的微量元素,包括Cu、Zn、Fe、Mn、Mo、(B、Cl)等,这些元素在植物体内含量的变异性较大量元素大,其含量的影响因素除品种的遗传性差异外,受土壤环境的影响较大,包括土壤中这些元素的含量及控制这些元素可给态的土壤物理、化学、微生物特征,特别是标型元素、标型化合物的状态。茶园土壤这些元素的研究也多集中在其有效态含量的不足对茶叶的产量和质量的影响及施肥对产量的影响和品质的影响上,少量涉及其在茶树中的代谢及在茶树器官中的分布。由于锰是茶树聚积的元素,因而近年来Mn在茶园土壤中的含量,活性态及其与茶树的关系有较多的研究。一些虽非茶树必需元素,但对茶叶产量或质量可能有影响的稀土元素在土壤中的情况,也有少量研究,但其在土壤中的形态未见报道。三是为茶叶所富集,且与茶叶食品安全有关的F、Al二元素和在特定环境中可被茶叶较大量吸收而可能使茶叶具有一定特殊保健效用的Se。人们关注的重点主要是这些元素在茶叶中含量的高低。这些元素在茶叶中的含量有较大的变异,且与土壤环境关系较大,因而这些元素在土壤中的形态和行为及其与茶叶中含量的关系在20多年来有较多的研究。Al在茶园土壤中是标型元素,因而Al的状态往往还涉及其他元素的吸收和代谢问题,土壤中Al、F、Mn、Se四元素的形态集中在第3章~第6章中详述,本章暂不分析。四是与茶叶食品安全有关的土壤环境质量控制元素,包括Pb、As、Hg、Cd、Cr等。此外Cu、Ni在一些情况下也作为环境控制元素研究。人们对这些元素关注的主要是其对茶叶中相应元素含量的影响,通常以未受污染的土壤中这些元素的本底含量为正常标准来评价土壤中这些元素含量对茶叶相应元素安全问题的可能威胁。不管哪一类元素,人们一般通过其在土壤中的所谓“有效态”的研究来探讨其与茶树的关系。为此,首先把近20年来人们关于茶园土壤各矿质元素的“有效态”的测定结果进行整理,其中P、K的有效态已列于表1-2-1,其余元素的有效态含量列于表1-2-7~表1-2-10。