生 态 学 报 2010,30(5):1247—1257
Acta Ecologica Sinica

中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征

秦 海[1],李俊祥[1,2,3,*],高三平[1],李 铖[1],李 蓉[1],沈兴华[1]
(1. 华东师范大学环境科学系,上海 200062; 2. 华东师范大学天童森林生态系统国家野外站,上海 200062;
3. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室,上海 200062)

摘要:对全国范围内 120 个样点 660 种陆生植物共 1781 个植物样本的叶片 S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2、Al、Mn 含量特征进行了研究。各元素的平均含量大小顺序为 K > Ca > SiO_2 > Na > S > Al > Fe > Mn,总体上属于 K > Ca 型。与世界陆生植物平均元素含量相比较,我国植物叶片 Na 的含量偏高。除 Ca 在草本植物中的含量低于木本植物外,为满足快速生长的需要,S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2的含量草本植物 > 木本植物、落叶植物 > 常绿植物、阔叶植物 > 针叶植物,而 Mn 的含量在这些功能组却刚好相反,Al 的含量变化不大。S、K、SiO_2在针叶林中的含量最低,S、Na、Fe 在荒漠植物中的含量最高。Ca 与 SiO_2、Al,以及 Mn 与除 Al 之外的其他 6 种元素之间均呈极显著负相关($P<0.01$),除此之外,植物元素含量间的相关关系都为极显著正相关($P<0.01$)。植物叶片元素含量与植物所处的地理位置的相关分析表明,S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2含量随纬度的增加而增加,Al、Mn 随纬度的增加而减少;S、K、Na、Fe、SiO_2、Al 随经度的增加而减少,Mn 随经度的增加而增加,而 Ca 与经度间相关性不显著。

关键词:中国;陆生植物;叶片元素含量;空间分布格局

Characteristics of leaf element contents for eight nutrients across 660 terrestrial plant species in China

QIN Hai[1], LI Junxiang[1,2,3,*], GAO Sanping[1], LI Cheng[1], LI Rong[1], SHEN Xinghua[1]
1 *Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai* 200062, *China*
2 *Tiantong National Station of Forest Ecosystem, East China Normal University, Shanghai* 200062, *China*
3 *Shanghai Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, Shanghai* 200062, *China*

Abstract: We studied the contents of S, K, Na, Fe, Ca, SiO_2, Al and Mn in 1781 leaf samples of 660 terrestrial plant species obtained from 120 sampling sites distributed across the country. The rank of the average amount for these elements is K > Ca > SiO_2 > Na > S > Al > Fe > M, overall belonging to K > Ca type. Compared to the average amount of elements for the terrestrial plants in the world, Na in the plant leaves in China is higher. Except the fact that Ca in herbaceous plants is lower than woody plants, due to the need for fast growth the amount of S, K, Na, Fe, Ca, SiO_2 in herbaceous plants > woody plants, deciduous plants > evergreen plants, broadleaf plants > needle leaf plants. However, the amount of Mn is opposite to the sequence, while Al does not change much. S, K, and SiO_2 are lowest in needle leaf forest; S, Na and Fe are highest in desert plants. There are significant negative correlations ($P<0.01$) for Ca with SiO_2 and Al, and for Mn with all other elements except Al. Except these negative correlations, the amount of elements in the plants are significantly ($P<0.01$) positively correlated. Correlation analyses for the amount of elements in the leaves and their geographic locations show that the amount of S, K, Na, Fe, Ca, SiO_2 in the leaves increase as the latitude increases, while Al and Mn decrease with latitude; S, K, Na, Fe, SiO_2, Al decrease as the longitude increases, while Mn increases with longitude. Ca is not significantly correlated with the longitude.

Key Words: China; terrestrial plants; leaf element contents; spatial distribution pattern

---

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30400050);华东师范大学"211"生态学重点学科资助项目;上海市生态学重点学科资助项目
收稿日期:2009-01-17; **修订日期**:2009-04-29
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jxli@ des. ecnu. edu. cn

植物生长发育的必需元素有 19 种,其中包括 10 种大量元素 C、H、O、N、S、P、K、Ca、Mg、Si,9 种微量元素 Fe、B、Cu、Zn、Mn、C1、Mo、Na、Ni,它们中绝大多数主要从土壤中吸收,这些元素在植物体的组成、代谢及生长发育等方面起着重要作用[1]。高度特化的机制使植物能够吸收、转运、储存这些必需元素,同时也包括一些非必需元素。叶片是植物个体的营养器官,对于叶片营养元素含量方面的各种研究已从小尺度的物种水平越来越多地向群落、生态系统乃至全球水平拓展[2-13]。

我国植物物种总数超过全球的 10%,同时拥有从热带雨林到高山冻原丰富的植被类型[13],国内在叶片营养元素含量方面的研究,大多都是在区域尺度上针对各种不同植被类型进行的[14-26]。大尺度上多是针对 C、N、P 的化学计量学,如 Han 等对中国 753 个物种的 N、P、N:P 的空间格局的分析,He 等[27-28]对中国草原的化学计量学特征的讨论,任书杰等[29]对中国东部南北样带的植物叶片 N、P 化学计量学的研究。除此以外,在大尺度上对 C、N、P 之外的其它元素的研究鲜有报道。

如今,在全球范围的地球系统变化情况下,如何很好地理解多种尺度上植物与营养元素之间的关系,是植物生态学家和植物生理学家面临的挑战[30]。关于植物与养分之间的关系,多关注 N、P 这两大生长限制性元素[31-33]。近年来在大尺度乃至全球尺度上研究 C、N、P 的分布格局及其机制,有助于人们理解植物-养分之间的相互关系[7, 9, 33],尤其是从化学计量学的角度开展的定量化研究[34-36]。在 C、N、P 之外的其他营养元素在大尺度上是否具有类似的格局? 本文根据现有文献资料,对全国范围植物叶片 S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2、Al、Mn 含量的特征进行以下几方面的研究:(1)各元素在不同功能组之间的差异;(2)各元素在不同植被类型之间的差异;(3)各元素的水平地带性分布规律。旨在探索元素在不同功能组之间产生差异的机理以及元素水平地带性分布的影响因素,以期为大尺度的生物地球化学循环、景观化学和生态化学计量学研究提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究资料

本研究数据建立在公开发表的文献资料搜集整理的基础上。数据主要来自侯学煜,补充数据来自黄建辉和陈灵芝、莫大伦和吴建学、贺金生等、陈佐忠等、陈佐忠和黄德华[15, 37-41]。每一样点随机选取植物样本,于 7—9 月份生长季采集成熟的功能叶,烘干后测其干重中各元素的含量[15, 37-41]。本文将单位统一为 $mg \cdot g^{-1}$,且样本只选择自然植物不包括农作物及人工栽培的植物。获得的数据包括 1781 个样本,它们来自 120 个样点(图 1),其中包含 114 个科,660 个物种。本文统计的植物叶片 8 种元素:S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2、Al、Mn 的含量,统计分析时元素分别按照功能组(按生活型分为:乔木/灌木/草本植物、落叶植物/常绿植物、针叶植物/阔叶植物;按系统发育分为:种子植物/蕨类植物、裸子植物/被子植物、单子叶植物/双子叶植物;按光合途径分为:C_3草本植物/C_4草本植物)和植被类型(针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草甸、荒漠)划分,统计数据还包括样本的地理信息(经度、纬度)、气候数据(年均温度、年降雨量),以及土壤信息(土壤 pH 值)。

1.2 数据分析

各种元素的频度分布均呈现明显的偏态分布(表 1),故本文均采用几何平均值对样本总体大小进行表示。在不同植被类型之间进行元素含量差异性检验时,首先计算各样点每一植被类型中所有样本的几何平均值,然后转换成自然对数形式,再进行单因素方差分析;除此之外在进行其它分析时,则先计算每一样点同一物种的几何平均值,然后作自然对数转换,最后进行单因素方差分析及相关分析。所有数据统计分析均使用 SPSS 统计软件(SPSS 11.5 for Windows, Chicago, USA)。

2 结果与分析

2.1 植物元素含量的总体特征

植物叶片 S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2、Al、Mn 含量的几何平均值大小依次为 K > Ca > SiO_2 > Na > S > Al > Fe > Mn,可见就全国范围而言属于 K > Ca 型,而从算术平均值来看 SiO_2 > Ca > K > Na > S > Al > Mn > Fe,说明少数地区属于 Ca > K 型。与世界陆生植物平均元素含量相比较[42],我国植物叶片 Na 的含量偏高,Na 属于微量

元素,平均含量却高于大量元素 S,这是因为我国有大面积的盐碱和干旱地区,这些地区土壤 Na 含量高,而且生长在这些地区的植物有较强的选择吸收 Na 的能力[37]。S、Al 的算术平均值虽然偏高,但几何平均值在正常范围内,说明少数植物 S、Al 含量很高。S 含量很高的植物集中于内蒙古阿拉善、新疆托克逊和莎车等干旱地区,一方面是因为这些地区土壤 S 含量高;另一方面是生长在这里的植物多为聚 S 植物,如琵琶柴、珍珠猪毛菜、碱蓬等。Al 含量很高的植物分布于亚热带红壤和黄壤上的草甸和灌丛,这些地区土壤酸度强,Al 的可溶程度高,很容易被植物吸收,而且分布在这些地区的红毛杜鹃、铺地蜈蚣、里白等物种有很强的聚 Al 作用[37]。其它元素的含量则都在正常范围内。变异系数是 Na > Al > Fe > S > Mn > SiO_2 > Ca > K,从最大值与最小值之比来看,Na、Al、Mn、Fe 分别为 16608、11840、2360、2173 倍,表现为 Na > Al > Mn > Fe。可见这四种微量元素的变异程度很大,主要因为不同物种对这些元素的选择吸收能力有很大差异,有的物种富集这些元素,而有的物种排斥这些元素,所以含量极低(最小值分别为樟叶荚蒾 Al 含量 0.002 mg·g^{-1}、樟叶荚蒾 Mn 含量 0.002mg·g^{-1}、马蔺 Fe 含量 0.004 mg·g^{-1}、芒草 Na 含量 0.01 mg·g^{-1})[37]。K 的最大值与最小值之比以及 K 的变异系数都是各元素中最小的,显示 K 含量的相对稳定性(表 1)。

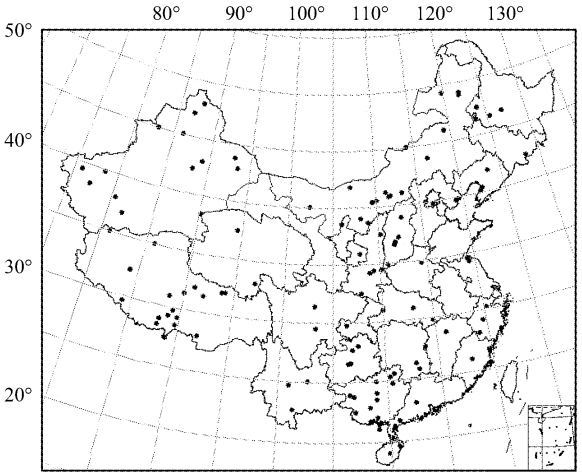

图 1　中国 660 种植物的样点分布

Fig. 1　Sampling sites of 660 plant species in China

表 1　中国 660 种植物的元素含量/(mg·g^{-1},占干重)的变异量

Table 1　Variation of leaf element contents /(mg·g^{-1}, in dry matter) in 660 plant species in China

元素 Element	样本数 Number	最大值 Max.	最小值 Min.	最大值/最小值 Max./Min.	中值 Median	算数 Arithmetic			几何 Geometric		度 Skewness	峰度 Kurtosis	陆生植物含量[42] The contents of terrestrial plants
						平均值 mean	标准偏差 S. D.	变异系数 C. V.	平均值 mean	标准偏差 S. D.			
S	916	35.62	0.17	210	1.2	3.1	4.96	1.6	1.51	2.96	3.38	13.28	0.6—2
K	1037	121.4	0.63	193	12.57	15.09	10.67	0.71	12.07	1.95	2.36	12.09	1—68
Na	942	166.1	0.01	16610	1.22	10.95	25.64	2.34	2.06	5.33	3.43	12.29	0.002—1.5
Fe	877	8.69	0.004	2173	0.21	0.38	0.62	1.66	0.22	2.65	6.43	59.13	0.002—0.7
Ca	1027	120.9	0.23	526	10.93	15.38	14.24	0.93	9.8	2.8	2	6.2	0.4—50
SiO_2	641	182.9	0.4	457	8.5	16.34	20.78	1.27	8	3.43	2.72	10.7	0.2—62
Al	847	23.68	0.002	11840	0.47	1.1	2.19	1.99	0.48	3.32	4.98	32.55	0.0001—0.53
Mn	464	4.72	0.002	2360	0.18	0.43	0.63	1.45	0.2	3.72	2.82	10.42	0.0003—1

2.2　植物元素含量在不同功能组之间的比较

叶片 S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2、Mn 的含量在不同功能组之间的变化较大,S 从针叶植物、裸子植物的 0.67 mg·g^{-1}、0.68 mg·g^{-1}到 C_3草本植物的 2.21 mg·g^{-1},K 从针叶植物、裸子植物的 6.30 mg·g^{-1}、6.33 mg·g^{-1}到 C_3草本植物的 18.30 mg·g^{-1},Na 从蕨类植物的 0.64 mg·g^{-1}到 C_3草本植物的 3.57 mg·g^{-1},Fe 从针叶植物、裸子植物、乔木、常绿植物的 0.15 mg·g^{-1}到 C_4草本植物的 0.29 mg·g^{-1},Ca 从蕨类植物的 2.13 mg·g^{-1}到落叶植物的 17.47 mg·g^{-1},SiO_2从针叶植物、裸子植物的 2.86 mg·g^{-1}到单子叶植物的 25.92 mg·g^{-1},Mn 从 C_4草本植物的 0.07 mg·g^{-1}到乔木的 0.45 mg·g^{-1}。S、K、Na、Fe 都是针叶植物与裸子植物含量低,草本植物含量高,而对于 Mn 则相反(表 2)。

表 2　植物元素含量在不同功能组之间的比较

Table 2　The comparison of leaf element contents between different plant functional groups

功能组 Functional group	S/(mg·g^{-1})		K/(mg·g^{-1})		Na/(mg·g^{-1})		Fe/(mg·g^{-1})		Ca/(mg·g^{-1})		SiO_2/(mg·g^{-1})		Al/(mg·g^{-1})		Mn/(mg·g^{-1})	
	n	几何平均值 (S. D.)	*n*	几何平均值 (S. D.)	*n*	几何平均值 (S. D.)	*n*	几何平均值 (S. D.)	*n*	几何平均值 (S. D.)	*n*	几何平均值 (S. D.)	*n*	几何平均值 (S. D.)	*n*	几何平均值 (S. D.)
草本植物 Herb	360	2.10(3.03)a	397	17.87(1.68)a	366	3.41(5.84)a	353	0.28(2.58)a	387	9.40(2.46)a	195	16.52(2.59)a	325	0.42(2.72)a	128	0.08(2.54)a
灌木 Shrub	269	1.77(3.15)a	291	10.71(1.96)b	276	2.68(5.99)a	253	0.21(2.60)b	292	14.38(2.27)b	193	4.51(2.94)b	253	0.45(3.26)a	142	0.20(3.90)b
乔木 Tree	204	0.83(2.22)b	256	7.56(1.71)c	211	0.98(2.46)b	191	0.15(2.38)c	256	11.16(2.49)c	185	5.13(3.22)b	181	0.37(2.89)a	134	0.45(3.10)c
显著性检验 Significance		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P=0.18$		$P<0.001$
落叶植物 Deciduous plant	241	1.76(3.38)	253	11.51(1.98)	247	2.68(5.96)	219	0.21(2.74)	254	17.47(2.13)	176	7.25(2.78)	224	0.37(2.79)	108	0.22(4.29)
常绿植物 Evergreen plant	219	0.90(2.21)	275	7.31(1.68)	227	1.10(3.10)	208	0.15(2.29)	275	9.54(2.43)	191	3.33(2.92)	202	0.47(3.53)	159	0.36(3.35)
显著性检验 Significance		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.05$		$P<0.01$
阔叶植物 Broadleaf	417	1.38(3.01)	484	9.46(1.91)	429	1.93(4.93)	396	0.18(2.54)	485	13.40(2.39)	330	5.15(3.10)	383	0.42(3.25)	239	0.28(3.91)
针叶植物 Conifer	50	0.67(1.87)	56	6.30(1.47)	52	0.76(2.37)	41	0.15(2.61)	56	8.23(2.24)	44	2.86(2.35)	48	0.40(2.12)	33	0.36(2.67)
显著性检验 Significance		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P=0.25$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P=0.76$		$P=0.36$
蕨类植物 Fern	77	0.95(1.62)	86	11.85(1.79)	84	0.64(2.87)	75	0.19(2.82)	85	2.13(3.21)	62	18.01(2.97)	82	1.68(4.34)	58	0.26(2.34)
种子植物 Seed plant	837	1.56(3.05)	949	12.10(1.97)	856	2.30(5.37)	800	0.22(2.61)	940	11.23(2.46)	578	7.31(3.37)	763	0.42(2.96)	405	0.19(3.91)
显著性检验 Significance		$P<0.001$		$P=0.79$		$P<0.001$		$P=0.20$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P=0.08$
被子植物 Angiosperm	786	1.66(3.06)	892	12.61(1.96)	803	2.48(5.45)	758	0.22(2.60)	883	11.44(2.46)	533	7.91(3.34)	714	0.42(3.02)	372	0.18(3.98)
裸子植物 Gymnosperm	51	0.68(1.89)	57	6.33(1.46)	53	0.75(2.35)	42	0.15(2.58)	57	8.42(2.27)	45	2.86(2.33)	49	0.40(2.10)	33	0.36(2.67)
显著性检验 Significance		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.05$		$P<0.05$		$P<0.001$		$P=0.74$		$P<0.01$
单子叶植物 Monocotyledon	148	1.27(2.32)	172	15.01(1.65)	152	1.59(4.25)	144	0.24(2.79)	168	5.65(2.16)	97	25.92(2.41)	120	0.31(2.82)	32	0.09(2.80)
双子叶植物 Dicotyledon	689	1.65(3.19)	777	11.53(2.02)	704	2.50(5.57)	656	0.21(2.57)	772	13.04(2.35)	481	5.66(3.03)	643	0.44(2.96)	373	0.20(3.93)
显著性检验 Significance		$P<0.01$		$P<0.001$		$P<0.01$		$P=0.12$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$		$P<0.001$
C3 草本植物 C3 herb	306	2.21(3.07)	336	18.30(1.67)	312	3.57(5.45)	300	0.27(2.47)	326	9.71(2.44)	162	15.88(2.61)	277	0.42(2.64)	111	0.08(2.64)
C4 草本植物 C4 herb	53	1.58(2.64)	58	16.39(1.69)	53	2.81(7.59)	51	0.29(3.07)	58	8.07(2.52)	33	21.18(2.19)	46	0.36(3.22)	14	0.07(1.84)
显著性检验 Significance		$P<0.05$		$P=1.33$		$P=0.35$		$P=0.58$		$P=0.15$		$P=0.11$		$P=0.33$		$P=0.72$

在乔木、灌木、草本植物的多重比较中,同一列数值后的不同小写字母代表两者在 0.05 水平上的显著差异; *n* 为样本数

在落叶植物与常绿植物的比较中,所有元素都表现出显著的差异(表 2);乔木与草本植物以及裸子植物与被子植物之间,除 Al 元素外,其它元素的含量都存在显著差异;而在单子叶植物与双子叶植物的比较中,除 Mn 元素外,其它元素的含量都有显著不同;但在 C_3、C_4 草本植物的比较中,除 S 外,其他元素 K、Na、Fe、Ca、SiO_2、Al、Mn 在不同光合途径的草本植物中含量变化不大(表 2)。

除 C_3、C_4 草本植物外,在其它功能组间两两差异性比较中,Ca 的含量在所有功能组中都显著不同;S、Na 的含量只在草本植物和灌木的比较中差异不显著,K 的含量只在蕨类植物和种子植物的比较中差异不显著($P>0.05$);而 Al 的含量在 7 组比较中差异不显著($P>0.05$),除蕨类植物为 1.68 $mg\cdot g^{-1}$ 外,Al 的含量变化仅从单子叶植物的 0.31 $mg\cdot g^{-1}$ 到常绿植物的 0.47 $mg\cdot g^{-1}$,显示出 Al 含量在不同功能组之间的相对稳定性(表 2)。

2.3　植物元素含量在不同植被类型间的比较

在针叶林、阔叶林和灌丛这 3 种植被类型中,S、K、Ca、SiO_2 的含量针叶林 < 阔叶林、灌丛($P<0.05$),Na、Fe、Al 的含量在这 3 种植被类型中的差异不显著($P>0.05$);K、Fe、SiO_2 在草原、草甸和荒漠中的含量比前 3 种植被类型高,而 Mn 则相反;S、Na、Al 草甸和荒漠中的含量比前 4 种植被类型高;S、K、SiO_2 在针叶林中的含量最低,S、Na、Fe 在荒漠中的含量最高,尤其是 Na 比前几种植被类型高出 7—26 倍。总体而言,针叶林属于 K≥Ca 型,阔叶林、灌丛属于 K < Ca 型,草原、草甸、荒漠是 K > Ca 型(表 3)。

表 3　植物叶片元素含量在不同植被类型之间的比较

Table 3　The comparison of leaf element contents between different vegetation types

元素 Element	针叶林 Coniferous forest		阔叶林 Broadleaved forest		灌丛 Shrubland		草原 Grassland		草甸 Meadow		荒漠 Desert	
	n	几何平均值(S.D.)	*n*	几何平均值(S.D.)	*n*	几何平均值(S.D.)	*n*	几何平均值(S.D.)	*n*	几何平均值(S.D.)	*n*	几何平均值(S.D.)
S/($mg\cdot g^{-1}$)	35	0.73(1.82)a	57	1.02(2.23)b	63	1.02(2.07)b	26	1.23(2.22)b	74	1.89(2.67)c	21	4.85(2.37)d
K/($mg\cdot g^{-1}$)	37	6.56(1.47)a	67	8.95(1.62)b	64	8.38(1.67)b	20	15.73(1.35)cd	76	14.10(1.69)c	21	18.02(1.49)d
Na/($mg\cdot g^{-1}$)	36	0.75(2.38)a	58	1.05(2.45)a	65	1.10(2.24)a	19	1.25(3.23)a	75	2.66(5.67)b	21	20.60(5.28)c
Fe/($mg\cdot g^{-1}$)	28	0.15(2.66)a	60	0.16(2.52)a	58	0.14(2.23)a	26	0.26(1.78)b	70	0.22(2.30)b	21	0.42(2.45)c
Ca/($mg\cdot g^{-1}$)	37	6.44(2.26)acd	67	12.48(2.22)b	65	12.73(2.15)b	19	7.85(2.45)c	76	4.92(2.81)d	21	16.32(1.62)e
SiO_2/($mg\cdot g^{-1}$)	32	2.69(2.35)a	51	7.08(2.32)b	48	4.11(2.50)c	18	25.20(1.75)d	60	18.34(2.56)de	21	12.47(2.17)e
Al/($mg\cdot g^{-1}$)	34	0.44(2.10)a	54	0.41(2.19)a	64	0.40(2.56)a	25	0.31(2.31)a	74	0.84(3.22)b	20	0.76(1.85)b
Mn/($mg\cdot g^{-1}$)	26	0.31(2.54)ab	41	0.45(2.70)a	54	0.21(3.32)bd	5	0.03(4.44)ce	55	0.15(2.56)d	9	0.05(2.52)e

元素含量在不同植被类型的多重比较中,同一行数值后的不同小写字母代表两者在 0.05 水平上的显著差异

2.4　植物元素含量之间的相关分析

植物元素含量之间相关分析结果表明,除 Ca 与 Fe,Al 与 K,Al 与 Mn 之间相关性不显著外($P>0.05$),植物元素含量两两之间存在极显著相关性(表 4),其中负相关较少,Ca 与 SiO_2、Al,以及 Mn 与 Al 之外的各种元素之间呈极显著负相关($P<0.01$),其他均为极显著正相关,尤其是 S、K、Na、Fe 之间的相关系数大都在 0.3 以上($P<0.001$)(表 4)。

表 4　植物叶片元素之间的相关分析

Table 4　The correlation between leaf element contents of plants

	S	K	Na	Fe	Ca	SiO_2	Al
K	0.420***						
Na	0.682***	0.340***					
Fe	0.379***	0.226***	0.365***				
Ca	0.160***	0.099**	0.115***	-0.022			
SiO_2	0.176***	0.308***	0.107**	0.304***	-0.140***		
Al	0.242***	0.022	0.129***	0.365***	-0.379***	0.138***	
Mn	-0.445***	-0.383***	-0.437***	-0.356***	-0.125**	-0.165**	0.06

*** $P<0.001$; ** $P<0.01$; * $P<0.05$

2.5 植物元素含量与经度、纬度之间的关系

本文分析经度与各元素含量的关系时,由于北方地区经度梯度上土壤及降水特征变化明显,故只选取北纬30°以北以及青藏高原的植物样本[13]。各元素与纬度和经度之间的相关关系如表5所示,S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2含量与纬度呈显著正相关,Al、Mn与纬度呈极显著负相关;S、K、Na、Fe、SiO_2、Al与经度呈极显著负相关,Mn与经度呈显著正相关,而Ca与经度之间相关性不显著。

表5 植物叶片元素含量与纬度和经度之间的关系

Table 5 Relationships between leaf element contents of plants and latitude, longitude

	S	K	Na	Fe	Ca	SiO_2	Al	Mn
纬度 Latitude	0.26***	0.44***	0.26***	0.07*	0.22***	0.30***	-0.20***	-0.44***
经度 Longitude	-0.35***	-0.14***	-0.24***	-0.15***	-0.03	-0.14**	-0.28***	0.15*

*** $P<0.001$; ** $P<0.01$; * $P<0.05$

3 讨论

3.1 植物元素含量在不同功能组间的差异分析

S、K、Na、Fe、Ca、SiO_2、Mn在调节渗透压,促进酶活性、蛋白质合成,及提高光合能力和植物抗性等方面有重要作用[1, 43-45]。木本植物、常绿植物和针叶植物的叶寿命分别长于草本植物、落叶植物及阔叶植物,所以前者需要积累更多的木质素等物质以构建保卫结构,因而C含量高,而后者叶寿命短,需要快速生长,并提高光合效率[4, 6, 46-48],而且大多数常绿植物和针叶植物所生长的土壤中这些元素的有效含量较低[49],因此S、Fe、K、Na、Ca、SiO_2在后者中的含量也就高于前者[7, 50],只有Ca在草本植物中的含量低于木本植物。而Mn在这些功能组中的含量却相反,一方面是因为Mn与Fe、Ca、SiO_2之间相互拮抗[14, 51-53];另一方面是常绿植物和针叶植物所生长的土壤往往pH相对较低,所以Mn的有效含量高[54]。Al是本文所研究唯一的植物非必需元素,它在不同功能组以及植被类型之间变化不大,可以认为Al是含量相对比较稳定的元素。Takahashi和Miyake认为Ca和SiO_2在一些植物中是相互拮抗的[55-57],他们将硅钙摩尔比大于1的植物定义为喜硅植物。本文计算了不同功能组的Si:Ca,发现草本植物、蕨类植物及单子叶植物的Si:Ca分别为1.30、4.95和3.06,显著高于灌木和乔木(0.19和0.28)、种子植物(0.40)、双子叶植物(0.28)($P<0.001$),可见草本植物、蕨类植物及单子叶植物多为喜硅植物,同时它们的Ca含量也就相对较低。进一步分析得知,Si:Ca与纬度呈极显著正相关($r=0.179$, $n=628$, $P<0.001$),而Si和Ca也都与纬度呈极显著正相关(分别是$r=0.300$, $n=641$, $P<0.001$和$r=0.219$, $n=1027$, $P<0.001$),表明随着纬度的增加植物对Si的吸收大于对Ca的吸收。S、Fe、K、Na在被子植物中的含量高于裸子植物,这可能与系统进化有关,也可能是因为本文所选取的裸子植物样本中绝大多数是针叶物种。在单双子叶植物的比较中,S、Na、Al、Mn在双子叶植物中的含量高于单子叶植物,而K却相反,这可能也与系统进化关系密切。

3.2 植物元素之间的相互关系

植物体内的正常代谢要求各元素按一定的比例关系吸收利用,并在体内保持相对平衡。而元素的供应过量或不足以及气候的差异则会改变这种平衡[58],例如内蒙古阿拉善、长江三峡、昆仑山、海南等地区所得到的元素间的相互关系就有很大不同[15, 21-22, 24]。本文的样点涉及全国范围的诸多生境,因此元素间的关系就更突出了植物对元素选择吸收的内在属性。对于元素间相互关系的报道已有很多,Al通过与膜上特殊通道受体结合位点结合,阻碍Ca的吸收[59];SiO_2可以减少植物对Mn的吸收,还可能降低叶片的Mn含量[52-53];Mn和Fe通过影响氧化还原电位而抑制彼此含量[53];Ca与Al、Mn竞争吸收位点,并且Ca可以增加土壤pH,降低Al、Mn溶解度,因而减少植物中Al、Mn的含量[51]。这些元素间的负相关关系也与本文的结果相一致。而有报道认为过量的Al抑制植物对K的吸收[59-60],但在本文的结果中两者负相关关系并不显著,可能是植物在不受Al胁迫时,与K的负相关关系并不明显。现有许多研究结果显示出Fe与Al之间呈正相关关系[12, 21-22],但具体生理原因尚不明确。

3.3　植物元素含量的水平地带性分布规律

以 K 为例,缓效 K 是土壤供 K 潜力的重要指标[61]。根据中国土壤 K 素养分潜力图[62],土壤缓效 K 分为 7 个等级,分别是 <7、7—17、17—33、33—50、50—75、75—116mg·g^{-1}和 >116mg·g^{-1}。本文中每一等级的样本数量分别是 57、319、39、112、209、236、58。除 1、2、3 组之间差异不显著外 ($P>0.05$),叶片 K 含量在不同土壤等级之间差异均显著 ($P<0.05$) (图 2)。可见叶片中 K 含量总体上随土壤中 K 的有效含量增加而增加。而在土壤缓效 K 含量 <33 mg·g^{-1}的 3 个等级中(均分布于我国南部),叶片 K 含量并没有随缓效 K 含量的下降而下降 ($P>0.05$),很可能由于我国南部地区水热条件充裕,营养元素循环速率高,周转强度大所致[49]。

由此可见,除植物的内在特征外,植物元素含量还取决于植物所处的气候及土壤因素[49]。气候因素主要包括温度与降水,本文所收集的数据中温度随纬度的增加显著降低($r=-0.87$,$P<0.001$),降水随经度的增加显著增加 ($r=0.63$,$P<0.001$)。土壤因素主要有土壤盐碱度和土壤中元素的有效含量等。土壤中元素的有效含量与气候、土壤种类、土壤 pH 等因素有关,尤其与土壤 pH 关系密切[63],本文的数据显示土壤 pH 与纬度呈极显著正相关($r=0.57$,$P<0.001$),与经度呈极显著负相关($r=-0.31$,$P<0.001$),这些因素使得土壤中 S、K、Na、Ca、SiO_2的有效含量随纬度的增加而增加,随经度的增加而减少,而 Fe、Al、Mn 则恰好相反[54, 64-65]。

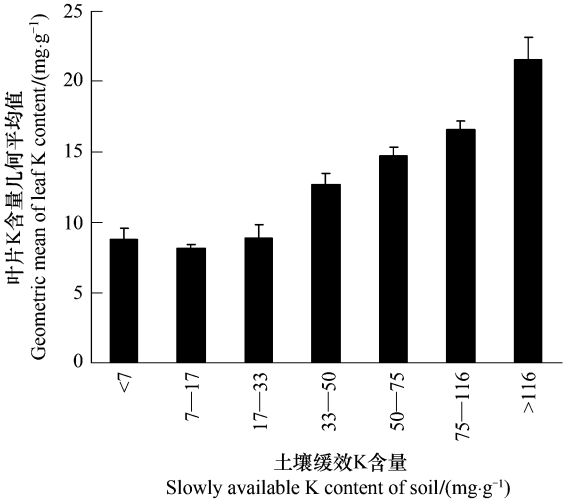

图 2　土壤 K 含量与叶片 K 含量之间的关系

Fig. 2　Relationship between slowly available K contents in soil and K contents in leaf

北方温度低,所以植物叶寿命短,生长速度快,光合强度大,同时植物需要以增加渗透压、酶活性和降低冰点等方式抵御寒冷气候[7, 9],而西部植物由于水分和盐分胁迫需要进行渗透调节、气孔调节、酶调节等方式增加植物抗性[1, 66],且由南至北及由东至西土壤 S、K、Na、SiO_2的有效含量都是呈递增的趋势,这些因素使得植物 S、K、Na、SiO_2含量随纬度的增加而增加,随经度的增加而减少。Ca 也受同样的气候及土壤机理影响,而 Ca 与 SiO_2虽然在很多植物中相互拮抗,但落叶植物中 Ca 与 SiO_2的含量明显高于常绿植物,且落叶植物多分布于北方,常绿植物多分布于南方,因此,在纬度水平上,Ca 的含量也随纬度的增加而增加。但从经度水平上看,Ca 并没有随经度的增加显著性递减,可能是因为西部地区的盐碱胁迫使得 Ca 下降[66],也可能是它与 Fe、Al、SiO_2的拮抗关系对其经向分布影响较大。虽然土壤 Fe 有效含量变化趋势与 S、K、Na、Ca、SiO_2相反,但因为低温和干旱导致的上述生理需要,使北部和西部植物 Fe 含量有升高的要求,因此 Fe 含量随纬度的增加而增加,随经度的增加而递减,而 Fe 虽然随纬度的增加而增加,但相关性较低($r=0.07$,$P=0.03$,$n=877$),可能与 Fe、Al 之间协同作用有关。Al、Mn 的土壤有效含量变化趋势与 Fe 相同,都是随纬度的增加而降低,随经度的增加而增加,这可能是影响植物中 Al、Mn 含量分布的最重要因素,因此在纬度水平上,南方植物 Al、Mn 含量高,甚至有可能出现 Al、Mn 中毒现象[67],在经度水平上,Mn 随经度的增加而增加。而 Al 却随经度的增加而降低,这与土壤中有效 Al 的分布格局相反,可能是由于 Al 与植物的抗旱性有关[68],也可能是由于 Al 与 Fe 之间的协同关系起到了重要作用,具体原因有待进一步研究。

References:

[1] Pan R C. Plant Physiology//Pan R C ed. Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2004: 27-301.

[2] Garten C T. Correlations between concentrations of elements in plants. Nature, 1976, 261: 686-688.

[3] Garten C T. Multivariate perspectives on the ecology of plant mineral element composition. American Naturalist, 1978, 112: 533-544.

[4] Foulds W. Nutrient concentrations of foliage and soil in South-western Australia. New Phytologist, 1993, 125(3): 529-546.

[5] Grime J P, Thompson K, Hunt R, Hodgson J G, Cornelissen J H C, Rorison I H, Hendry G A F, Ashenden T W, Askew A P, Band S R, Booth R E, Bossard C C, Campbell B D, Cooper J E L, Davison A W, Gupta P L, Hall W, Hand D W, Hannah M A, Hillier S H, Hodkinson D J, Jalili A, Liu Z, Mackey J M L, Matthews N, Mowforth M A, Neal A M, Reader R J, Reiling K, Ross-Fraser W, Spencer R E, Sutton F, Tasker D E, Thorpe P C, Whitehouse J. Integrated screening validates primary axes of specialisation in plants. Oikos, 1997, 79(2): 259-281.

[6] Thompson K, Parkinson J A, Band S R, Spencer R E. A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora. New Phytologist, 1997, 136(4): 679-689.

[7] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets U, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. Nature, 2004, 428(6985): 821-827.

[8] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, Falster D S, Garnier E, Hikosaka K, Lamont B B, Lee W, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Villar R, Warton D I, Westoby M. Assessing the generality of global leaf trait relationships. New Phytologist, 2005, 166(2): 485-496.

[9] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. PNAS, 2004, 101(30): 11001-11006.

[10] Reich P B. Global biogeography of plant chemistry: filling in the blanks. New Phytologist, 2005, 168(2), 263-266.

[11] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, Enquist B J. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants. American Naturalist, 2006, 168(4): 103-122.

[12] Watanabe T, Broadley M R, Jansen S, White P J, Takada J, Satake K, Takamatsu T, Tuah S J, Osaki M. Evolutionary control of leaf element composition in plants. New Phytologist, 2007, 174(3): 516-523.

[13] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[14] Lin Z F, Li S S, Sun G C, Wang W, Lin G Z, Ehleringer J, Fiele C. The mineral elements in leaves of plants in south subtropical area of MT. Dinghu Shan. Acta Ecologica Sinica, 1989, 9(4): 320-324.

[15] He J S, Chen W L, Wang Q B. Studies on the characteristics of element contents in the dominant plant species of the Three-Gorges Region in China. Acta Botanica Sinica, 1998, 40(5): 453-460.

[16] An L Z, Liu Y H, Feng H Y, Feng G N, Cheng G D. Studies on the characteristics of element contents of altifrigetic subnival vegetation at the source area of Urumqi River. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2000, 20(6): 1063-1069.

[17] Zheng Y Q, Liu J S, Wan J D, Yu J B. Variation of chemical elements of Carex lasiocarpa litter in Sanjiang Plain. Grass of China, 2000, (3): 12-16.

[18] Liu G Q, Tu X N, Zhao S D, Sun S H, Gravenhorst G. Distributional characteristics on biomass and nutrient elements of pine-oak forest belt in MT. Qinling. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(1): 28-36.

[19] Li T C, Chen G C, Suo Y R. Characteristics of the contents of grand nutrition element in plants of the Qinghai Lake region. Pratacultural Science, 2001, 18(1): 27-29.

[20] Kong L S, Ma M H, Pan D Y. Characteristic and quantitative analysis of K, Na, Ca, Mg and S contents in the dominant plant species on the Hutube Cattle Stock Farm Area, Xinjiang. Acta Botanica Sinica, 1994, 36; 627-635.

[21] Kong L S, Li B S, Guo K, Ma M H. Characteristics of element contents in plant species of the Karakorum and Kunlun Mountains. Acta Phytoecologica Sinica, 1995, 19: 13-22.

[22] Kong L S, Wang Q B, Guo K. Characteristics and quantitative analysis of elements in plants in Alashan Area, Nei Mongol. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(5): 534-540.

[23] Kong L S, Guo K, Wang Q B. The Characteristics of element content of dominant species in South Junggar Desert, Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1202-1210.

[24] Guan D S, Luo L. Chemical element concentrations of tropical plant leaves in Hainan province. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(2): 28-32.

[25] Yang C, Liu C L, Song Z L, Liu Z M. Characteristics of the nutrient element contents in plants from Guizhou karst mountainous area of China. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 503-508.

[26] Gao S P, Li J X, Xu M C, Chen X, Dai J. Leaf N and P stoichiometry of common species in successional stages of the evergreen broad-leafed forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 947-952.

[27] He J S, Fang J Y, Wang Z H, Guo D L, Flynn D F B, Geng Z. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grasslands

of China. Oecologia, 2006, 149(1): 115-122.

[28] He J S, Wang L, Flynn D F B, Wang X P, Ma W H, Fang J Y. Leaf nitrogen:phosphorus stoichiometry across Chinese grassland Biomes. Oecologia, 2008, 155(2): 301-310.

[29] Ren S J, Yu G R, Tao B, Wang S Q. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. Environmental Science, 2007, 28(12): 2665-2673.

[30] Hedin, L O. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions. PNAS, 2004, 101(30), 10849-10850.

[31] Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants. Annual Review of Ecology & Systematics, 1980, 11, 233-260.

[32] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.

[33] Wassen M J, Venterink H O, Lapshina E D, Taanneberger F. Endangered plants persist under phosphorus limitation. Nature, 2005, 437(7058): 547-550.

[34] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.

[35] Elser J J. Ecological stoichiometry: from sea to lake to land. Trends in Ecology and Evolution, 2000, 15(10): 393-394.

[36] Gusewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.

[37] Hou X Y. Chinese Vegetable Geography and Chemical Elements: Analyses of the Dominant Plant Species // Hou X Y ed. Chinese Vegetable Geography and Chemical Elements: Analyses of the Dominant Plant Species. Beijing: Science Press, 1982: 1-418.

[38] Huang J H, Chen L Z. A study of chemical contents in a mixed shrubland near Baihuashan Mountain in Beijing. Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica, 1991, 15(3): 224-233.

[39] Mo D L, Wu J X. A study on the characteristics of the chemical composition and the interrelationship between the elements in the plants of 86 species in HaiNan Island, Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica, 1988, 12(1): 51-62.

[40] Chen Z Z, Huang D H, Zhang H F. The characteristics of element chemistry of 122 plants on the Xilin River Valley, Inner Mongolia // Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station eds. Grassland Ecosystem Research (Series 1). Beijng: Science Press, 1985: 112-131.

[41] Chen Z Z, Huang D H. Seasonal variations of nutritional composition of 9 range plants in Stipa grandis steppe. Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica, 1989, 13(4): 325-331.

[42] Bowen H J M. Environmental chemistry of elements // Bowen H J M ed. Environmental chemistry of elements. Beijing: Science Press, 1986: 71-73.

[43] Zhou W, Lin B. Progress in study on Sulfur behavior in soil and plant. Soils and Fertilizers, 1997, 23(2): 12-17.

[44] Zhang Y L, Wang X Y, Liu M D. The research status and prospects about plant silicon nutrition and soil silicon fertility. Chinese Journey of Soil Science, 2004, 35(6): 785-788.

[45] Xu X J, Chen M C, Zhang Q, Yang Z P. Progress in study on calcium nutrition in soil and plant. Journey of Shanxi Agricultural Science, 2004, 32(1): 33-38.

[46] Aerts R. The advantages of being evergreen. Trends in Ecology & Evolution, 1995, 10(10): 402-406.

[47] Reich P B, Ellsworth D S, Walters M B, Vose J M, Gresham C, Volin J C, Bowman W D. Generality of leaf trait relationships: A test across six biomes. Ecology, 1999, 80(6): 1955-1969.

[48] Zheng S X, ShangGuan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 965-973.

[49] Chen L Z, Huang J H, Yan C R, Han X G, Xu G S. Nutrient cycling in forest ecosystem in China // Chen L Z ed. Nutrient cycling in forest ecosystem in China. Beijing: China Meteorological Press, 1997: 31-191.

[50] Villar R, Merino J. Comparison of leaf construction costs in woody species with differing leaf life-spans in contrasting ecosystems. New Phytologist, 2001, 151: 213-226.

[51] Zhou W, Lin B. Progress in study on plant calcium nutrition mechnism. Progress in Soil Science, 1995, 23(2): 12-17.

[52] Zang X P. Manganic poison of soil and manganic toxicity on plants. Chinese Journey of Soil Science, 1999, 30(3): 139-141.

[53] Shi Y H, Liu P. Review of advance in physiological function of manganese in plants. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2003, (2): 26-28.

[54] Lin P. Regional soil geography // Lin P ed. Regional soil geography. Beijing: Agricultural University Press, 1993: 237-240.

[55] Takahashi E, Miyake Y. Distribution of silica accumulator plants in the plant kingdom. (1) Monocotyledons. Comparative studies on the silica nutrition in plants (Part 5). Jounal of the Science of Soil and Manure (Japan), 1976, 47(7): 296-300.

[56] Takahashi E, Miyake Y. Distribution of silica accumulator plants in the plant kingdom. (2) Dicotyledons. Comparative studies on the silica

nutrition in plants (Part 6). Jounal of the Science of Soil and Manure (Japan), 1976, 47(7): 301-306.

[57] Takahashi E, Miyake Y. Distribution of silica accumulator plants in the plant kingdom. (3) Gymnosperm, Fern and Moss. Comparative studies on the silica nutrition in plants (Part 7). Jounal of the Science of Soil and Manure (Japan), 1976, 47(7): 333-337.

[58] Mo J M, Zhang D Q, Huang Z L, Yu Q F, Kong G H. Distribution pattern of nutrient elements in plants of DinghuShan lower subtropical evergreen broad-leafed forest. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2000, 8(3): 198-206.

[59] Shen H, Yan X L. Types of aluminum toxicity and plants resistance to aluminum toxicity. Chinese Journey of Soil Science, 2001, 32(6): 281-285.

[60] Xiao X X, Liu X H, Yang Z W, Chen L S. Advances in the Plant Aluminum Poisoning Research. Journey of Fujian Forestry Science and Techology, 2004, 31(4): 94-99.

[61] Xie J C, Zhou J M. The advance of soil potassium and applying potassium fertilizer soil in China. Soils, 1999, 31(5): 244-254.

[62] Xie J C, Du C L, Ma M T, Chen J X. Map of soil potassium potential of China//Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, ed. The Soil Atlas of China. Beijing: Cartographic Publishing House, 1986: 39-40.

[63] Liu Q Y, Tong Y P, Li J Y, Sun J H. Factors influencing the availability of nutrients in the soil of Duolun County in mixed area of agriculture and pasturing. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(6): 1034-1037.

[64] Zang H L. Study on variation of soil available silicon content. Soils, 1987, 3: 123-126.

[65] Liu C Q, Cao S Q, Chen G A, Wu X J. Sulphur in the agricultural of China. Acta Pedologica Sinica, 1990, 27(4): 398-404.

[66] Wang B, Song F B, Zhang J C. Advances in study of salt-stress tolerance in plants. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007, 23(2): 212-216.

[67] Osaki M, Yamada S, Ishizawa T, Watanabe T, Shinano T, Tuah S J, Urayama M. Mineral characteristics of leaves of plants from different phylogeny grown in various soil types in the temperate region. Plant Foods for Human Nutrition, 2003, 58(2): 117-137.

[68] Lu J L. Plant Nutrition//Lu J L. Plant Nutrition. Beijing: Agricultural University Press, 1994: 91.

参考文献:

[1] 潘瑞炽. 植物生理学//潘瑞炽主编. 植物生理学. 北京:高等教育出版社, 2004: 27-301.

[14] 林植芳, 李双顺, 孙谷畴, 王伟, 林桂珠, Ehleringer J, Fiele C. 鼎湖山南亚热带地区植物的叶片矿质元素. 生态学报, 1989, 9(4): 320-324.

[15] 贺金生, 陈伟烈, 王其兵. 长江三峡地区优势植物的化学元素含量特征. 植物学报, 1998, 40(5): 453-460.

[16] 安黎哲, 刘艳红, 冯虎元, 冯国宁, 程国栋. 乌鲁木齐河源区高寒冰缘植物化学元素的含量特征. 西北植物学报, 2000, 20(6): 1063-1069.

[17] 郑玉琪, 刘景双, 王金达, 于君宝. 三江平原典型沼泽生态系统毛果苔草枯落物中化学元素变化分析. 中国草地, 2000, (3): 12-16.

[18] 刘广全, 土小宁, 赵士洞, 孙升辉, Gravenhorst G. 秦岭松栎林带生物量及其营养元素分布特征. 林业科学, 2001, 37(1): 28-36.

[19] 李天才, 陈贵琛, 索有瑞. 青海湖地区植物中常量营养元素含量特征. 草业科学, 2001, 18(1): 27-29.

[20] 孔令韶, 马茂华, 潘代远. 新疆呼图壁种牛场地区优势植物 K, Na, Ca, Mg, S 的含量特征和数量分析. 植物学报, 1994, 36; 627-635.

[21] 孔令韶, 李渤生, 郭柯, 马茂华. 喀喇昆仑,昆仑山地区植物中一些元素的自然含量特征. 植物生态学报, 1995, 19: 13-22.

[22] 孔令韶, 王其兵, 郭柯. 内蒙古阿拉善地区植物元素含量特征及数量分析. 植物学报, 2001, 43(5): 534-540.

[23] 孔令韶, 郭柯, 王其兵. 新疆南准噶尔荒漠优势植物德化学成分含量特点. 生态学报, 2002, 22(8): 1202-1210.

[24] 管东生, 罗琳. 海南热带植物叶片化学元素含量特征. 林业科学, 2003, 39(2): 28-32.

[25] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 刘占民. 贵州喀斯特山区植物营养元素含量特征. 生态环境, 2007, 16(2): 503-508.

[26] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 陈熙, 戴洁. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N, P 化学计量学特征. 生态学报, 2007, 27(3): 947-952.

[29] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.

[37] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分//侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分. 北京:科学出版社, 1982: 1-418.

[38] 黄建辉, 陈灵芝. 北京百花山附近杂灌丛的化学元素含量特征. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(3): 224-233.

[39] 莫大伦, 吴建学. 海南岛 86 种植物的化学成分特点及元素间的关系研究. 植物生态学与地植物学学报, 1988, 12(1): 51-62.

[40] 陈佐忠, 黄德华, 张鸿芳. 内蒙古锡林河流域 122 种植物的元素化学特征//中国科学院内蒙古草原生态系统定位站主编. 草原生态系统研究. 北京:科学出版社, 1985: 112-131.

[41] 陈佐忠, 黄德华. 自然条件下大针茅草原几种主要植物氮,磷,钾,铁的季节动态. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(4): 325-331.

[42] 鲍恩. 元素的环境化学//鲍恩主编. 元素的环境化学. 北京:科学出版社, 1986: 71-73.

[43] 周卫, 林葆. 土壤与植物中硫行为研究进展. 土壤肥料, 1997, 23(2): 12-17.
[44] 张玉龙, 王喜艳, 刘鸣达. 植物硅素营养与土壤硅素肥力研究现状和展望. 土壤通报, 2004, 35(6): 785-788.
[45] 许仙菊, 陈明昌, 张强, 杨治平. 土壤与植物中钙营养的研究进展. 山西农业科学, 2004, 32(1): 33-38.
[48] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965-973.
[49] 陈灵芝, 黄建辉, 严昌荣, 韩兴国, 许广山. 中国森林生态系统养分循环//陈灵芝主编. 中国森林生态系统养分循环. 北京:中国气象出版社, 1997: 31-191.
[51] 周卫, 林葆. 植物钙素营养机理研究进展. 土壤学进展, 1995, 23(2): 12-17.
[52] 臧小平. 土壤锰毒与植物锰的毒害. 土壤通报, 1999, 30(3): 139-141.
[53] 施益华, 刘鹏. 锰在植物体内生理功能研究进展. 江西林业科技, 2003, (2): 26-28.
[54] 林培. 区域土壤地理学//林培主编. 区域土壤地理学. 北京:北京农业大学出版社, 1993: 237-240.
[58] 莫江明, 张德强, 黄忠良, 余清发, 孔国辉. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究. 亚热带热带植物学报, 2000, 8(3): 198-206.
[59] 沈宏, 严小龙. 铝对植物的毒害和植物抗铝毒机理及其影响因素. 土壤通报, 2001, 32(6): 281-285.
[60] 肖祥希, 刘星辉, 杨宗武, 陈立松. 植物铝毒害研究进展. 福建林业科技, 2004, 31(4): 94-99.
[61] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展. 土壤, 1999, 31(5): 244-254.
[62] 谢建昌, 杜承林, 马茂桐, 陈际型. 中国土壤钾素养分潜力图//中国科学院南京土壤研究所主编, 中国土壤图集. 北京:地图出版社, 1986: 39-40.
[63] 刘全友, 童依平, 李继云, 孙建华. 多伦县土壤营养元素有效态含量的影响因素研究. 生态学报, 2000, 20(6): 1034-1037.
[64] 藏惠林. 土壤有效硅含量变化的初步研究. 土壤, 1987, 3: 123-126.
[65] 刘崇群, 曹淑卿, 陈国安, 吴锡军. 中国南方农业中的硫. 土壤学报, 1990, 27(4): 398-404.
[66] 王波, 宋凤斌, 张金才. 植物耐盐性研究进展. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(2): 212-216.
[68] 陆景陵. 植物营养学//陆景陵主编. 植物营养学. 北京:农业大学出版社, 1994: 91.