

文章编号: 1007-4619 (2001) 05-0334-06

微量元素在植物光谱中的响应机理研究

马超飞, 马建文, 韩秀珍

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 微量元素与植物光谱特征的研究是光学遥感定量化研究的重要内容之一。本研究利用高光谱地面光谱仪(GER)在湖南黔阳地区不同地质地球化学背景下的同一垂直剖面上分别测量了岩石、土壤植物(林灌草)的反射光谱曲线和植物叶片的8种微量元素含量。通过研究微量元素Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Cr, Mo, B与植物(包括林灌草)反射光谱间的相关性研究发现Co的含量与植物光谱绿区(0.56 μm 附近)反射率存在强的负相关, Mn, B, Mo和Zn分别在可见光、近红外、短波红外存在较好的相关性和光谱响应。

关键词: 叶片光谱; 微量元素; 特征吸收; 光谱响应

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

植物体内存在70多种化学元素,但植物需要的营养元素约十几种,它们是:C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, Fe, S, B, Mn, Cu, Zn, Mo, Co等,其中C, H, O是构成一切有机质的主要元素,占植物总成分的95%左右,其它元素只占5%。植物中的营养元素可以分为宏量营养元素和微量营养元素(简称微量元素),它们的植物生理功能各不相同,不能相互替代。

植物中微量元素的生理功能与光合作用、蛋白质合成、生长刺激素合成等有关,同时在调节植物中的氧化-还原过程也起重要作用,而且能决定植物体内新陈代谢的一般特征^[1],因此植物体内若缺乏某些微量元素将阻碍其正常的生长发育,甚至产生生理病症,例如,植物Fe, S, Mg, Mn的缺乏会降低叶绿素含量,从而降低叶片对太阳辐射能的吸收^[2]。植物营养元素状况变化直接导致光谱特征的变化^[3-5]。中量、微量元素对植物冠层光谱特征的影响与主量元素具有相似性,但影响程度差异较大^[6]。因此探测植物的微量元素的营养状况是了解植物生长状况的重要途径。国内外很多学者利用遥感探测技术成功地估算、评价叶片和林冠层生化成分含量,如叶绿素、氮(N)、水、木质素、淀粉、纤维素、糖、蛋

白质等^[7,8];利用高光谱数据评价磷(P)和钾(K)的营养状况也有成功的范例^[9];通过田国良^[10]、郭世忠等^[11]研究发现土壤中过量铜、镉能对水稻、棉花叶片光谱特征产生影响。

在前人工作的基础上,本研究利用实地测量的光谱数据和相同叶片样品的微量元素含量,分析了原始光谱波形、光谱壳特征和导数特征及其与微量元素含量之间的相关性,发现Mn, B等元素很好的光谱响应区间,探索了微量元素光谱响应机理,为区域遥感生物量探测研究与解译提供依据。

2 数据采集及预处理

2.1 数据采集

选择2000年6月早春植被生长“窗口”,在湖南黔阳地区3个不同的乡(蒋家湾、铁坡山和石宝)分别采集马尾松、水杉、蕨、灌以及湖南特有的南竹叶片及其生长土壤和岩石样品,分别测量它们的高光谱数据与微量元素成分。其中对马尾松叶片又分为新生长的嫩叶(当年松)和老叶(往年松)两种。每个样本又由5个原始样品(同一个乡同种叶片不同采样点)组合而成。在10:00—16:00区间,用美国GER公司的红外智能野外地物光谱辐射计MARK-V测量岩石、土壤和所有植物叶片在400—2500 nm波长范围的光谱,光谱分辨率约为1.1 nm。微量元

收稿日期: 2000-09-17; 修订日期: 2000-12-12

基金项目: 本文得到中国科学院知识创新工程项目CX000027及CX000050的支持。

作者简介: 马超飞(1971—),男,在读博士,研究方向为遥感数据模型与处理方法。

素成分送中国科学院自然资源综合考察委员会实验室用 ICP-AES 法测定, 其中 Fe, Mn, Cu, Zn 由蒸馏水浸提, Mo, Co, Cr 由 0.1 mL HCl 浸提, B 由沸水浸

提。测试仪器为美国 Jarrell-ICAP-9000 型多道直读光谱仪, 微量元素的检出限见表 1。

表 1 微量元素检出限表

Table 1 The detect limit of trace elements

单位: $g \cdot t^{-1}$

元素	Fe	Mn	B	Mo	Zn	Cr	Cu	Co
检出限	0.002	0.0001	0.0006	0.0021	0.0003	0.0008	0.00025	0.0002

2.2 光谱数据预处理

光谱数据处理的第一步是整理数据的过程, 包括对原始光谱数据的平滑、去水、特征分析和壳函数、一阶微分处理等。经过预处理的光谱数据重新编码输入数据库, 为下一步数据分析作准备。

3 分析方法及结果

3.1 光谱波形分析

Guyot 等研究结果表明不同植物的反射光谱曲线形态基本是相同的, 主要区别在于反射率的不同^[2]。Masomi 等的研究得出相同的结果, 认为不同营养元素将导致植物光谱反射率不同, 但对波形影响不大^[2]。本研究以蒋家湾乡水杉叶片反射光谱为例(图 1)对植物在 400—2400 nm 之间的反射光谱做一般解释。植物的光谱特征取决于植物的色素含量、水分含量和细胞结构等特征^[13], 在可见光区的 0.4—0.7 μm 波段, 叶面反射特征的主控因素是叶色素(叶绿素、胡萝卜素、叶黄素等), 叶绿素对光谱特性的影响最大, 它强烈吸收蓝光(0.48 μm 左右)和红光(0.68 μm 左右), 而对绿光(0.52—0.6 μm) 起微弱反射, 在 0.56 μm 处显示出反射率增高。在 0.68—0.75 μm 光谱区, 植物叶的反射率急剧上升, 这种特性称为“红边”, 主要是由于光在叶内的内散射使得叶在 0.75—1.25 μm 光谱区反射率非常高, 而叶绿素又在 0.68 μm 附近有强烈的吸收, 使得其反射率非常低而造成的。

在 0.75—1.30 μm 光谱区, 叶片反射波谱特征主要受叶内细胞结构和叶冠结构控制, 其反射率增高。在 1.30—2.40 μm 光谱区, 叶片光谱主要受叶内水分含量的控制, 其中存在 3 个比较明显的水吸收带。

采取截枝法测试光谱不可避免地导致部分植物

丢失水分。这种水分的丢失不会造成植物光谱特征行为的变化。从图 1 中也可以看到, 水杉在 1.3—2.5 μm 的水分控制区间的光谱反射率分布情况。童庆禧等则指出只有叶片水分含量变化巨大, 像干枯, 才能产生 1.5 μm 范围以外红外反射率的强烈变化^[14]。

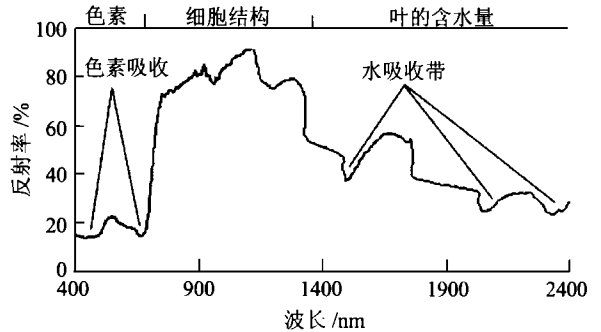


图 1 蒋家湾乡水杉叶片反射光谱特征

Fig. 1 Spectrum features of metasequoia leaf in Jiangjiawan area

3.2 微量元素相关性分析

微量元素在植物体内的相互作用是十分复杂的, 既有协同作用, 也存在元素之间的拮抗作用(排它性)。因此在研究某个元素含量规律时, 往往需要同时考虑生物地球化学行为方面与之相类似或与之存在某种关系的元素变化, 即常采取元素对或元素组及其比值的分析方法。本文测量的 8 种微量元素中 Fe, Co, Cr, Mn 属于铁族元素, Mo 为亲铁元素, Cu, Zn 属于亲硫元素。通过观察这些微量元素的相关性来统计同类元素之间以及异类元素之间是否存在着元素对的生物化学效应。从表 2 得知除亲硫元素 Cu, Zn 相关性较高外, 铁族元素之间相关性都较小 (<0.5), B 与 Zn 存在一定的相关性。由此可以排除元素对分析方法而集中分析单个元素含量对植物光谱的影响。

3.3 微量元素方差分析

方差分析了 3 个采样位置 and 不同年份之间微量

元素平均含量差异, 下面就以马尾松样品为例, 见表 3, 分析结果表明微量元素的差异主要是反应采样背景或是样品年份的不同造成的。

表 2 8 种微量元素相关系数

Table 2 Correlation between the trace elements

	Fe	Mn	Cu	Zn	Co	Cr	Mo
Fe	1						
Mn	0.11	1					
Cu	0.45	-0.07	1				
Zn	0.23	-0.10	0.75	1			
Co	-0.01	0.30	0.03	0.16	1		
Cr	0.40	-0.18	0.13	0.18	0.18	1	
Mo	0.39	-0.001	0.22	-0.02	0.09	0.43	1
B	0.03	-0.06	0.40	0.51	-0.11	0.28	-0.16

表 3 微量元素方差分析结果

Table 3 Result of variance analysis

项目	采样位置				样品年份		
	蒋家湾	铁坡山	石宝	方差	当年	往年	方差
Fe	45.9	76.57	89.985	340.45	102.48	39.157	1002.4
Mn	107.85	179.7	955.75	147372.3	420.8	408.067	40.53
Cu	2.217	1.179	1.993	0.1989	1.97	1.622	0.03
Zn	18.555	10.623	13.645	10.68	13.65	14.899	0.39
Co	0.183	0.17225	0.46065	0.0178	0.17	0.3739	0.01
Cr	0.14075	0.16075	0.10005	0.0006	0.16307	0.10463	0.00085
Mo	0.01305	0.0325	0.0189	6.64×10^{-5}	0.02397	0.019	6.18×10^{-6}
B	3.6165	2.834	1.717	0.607	2.7403	2.7047	0.0003

在方差分析中, 方差越大, 对微量元素在植物体内的差异贡献越大。从表 3 中可以看出 Mn, Zn, B, Mo 针对采样位置的方差显著大于样品年份的方差, 表明在该区这 4 种元素主要受采样背景元素含量影响, Fe 主要受样品年份的影响。其它 3 种元素方差在采样位置和样品年份之间没有明显的差别。

3.4 单变量分析

在光谱波形分析, 微量元素相关性分析和微量元素方差分析的基础上, 为了找出光谱与微量元素之间的关联, 将两种光谱变量(原始光谱和一阶微分光谱)分别与 8 种微量元素进行单相关分析。经预处理后, 每个高光谱数据有 705 个原始波段, 波段宽度约 1.1 nm。然后按相邻 3 个波段求算术平均缩减 705 个原始波段到 235 个波段, 波段宽度扩张到 3.4 nm 左右。近似计算 705 原始波段的一阶微分(703 个波段)。最后在原始光谱及一阶微分光谱与 8 种

微量元素之间计算单相关系数及相关系数的平方(封四图版 I 图 2)。在微量元素与原始光谱的相关性分析中, Co 元素于 569.22 nm 波段附近相关性较高, R^2 达到 0.623, 相关系数为 -0.77。从光谱波形分析知道, 该波段正好位于植物光谱的绿区(封四图版 I 图 2(a) 中高峰值)。一般认为叶绿素是导致光谱特征差异的主要内在因素。Al-Abas 等研究了不同营养(N, P, K, Ca, Mg, S)胁迫下不同叶位叶片的光谱特征, 认为在所有营养胁迫下叶片的叶绿素含量都会降低, 这与本文中 Co 的光谱响应是一致的^[3]。其它几种微量元素在此区间并没有这种响应, 其原因就是它们还没有达到胁迫的程度。

Johnson 在研究氮素含量时发现叶片反射率的一阶导数与叶片全氮量间的相关性在整个光谱区间最好^[15], Yoder 等也认为以反射率的一阶导数与叶片建模精度最高^[16]。为了反应光谱反射峰位置是否因微量元素的含量不同而发生偏移, 采用封四图

版 I 图 2(b) 所示的一阶光谱导数与微量元素的相关系数平方在波段上的分布图。从图 3 中可以看出 Mn, B, Mo 和 Zn 分别与中心波长为 (402.87, 1161.88), (470.28, 878, 2191.02, 2338.93), (1623.06) 和 (2338.93) nm 的光谱反射峰位置有较好的相关性 ($R^2 > 0.5$)。波段范围从可见光一直到中波红外, 既包括色素区间, 也包括细胞结构区间以及水分控制区间, 可以说微量元素的生理作用涉及植物的各个方面。另外这 4 个微量元素与其方差分

析结果有很好的—致性。表 4 归纳了上述相关性并在前人工作的基础上总结了这几种元素的植物生理功能, 以及 8 个吸收特征波段所对应的生物化学成分。从表 4 中比较清楚地反映微量元素生理功能不同所造成的主量生化成分的差异, 进而间接影响植物的光谱响应, 如 B 元素能促进植物蛋白质代谢及增强植物输导系统, 与特征吸收波长 2.19 μm 和 2.34 μm 所对应的生化成分有很好的—致性。

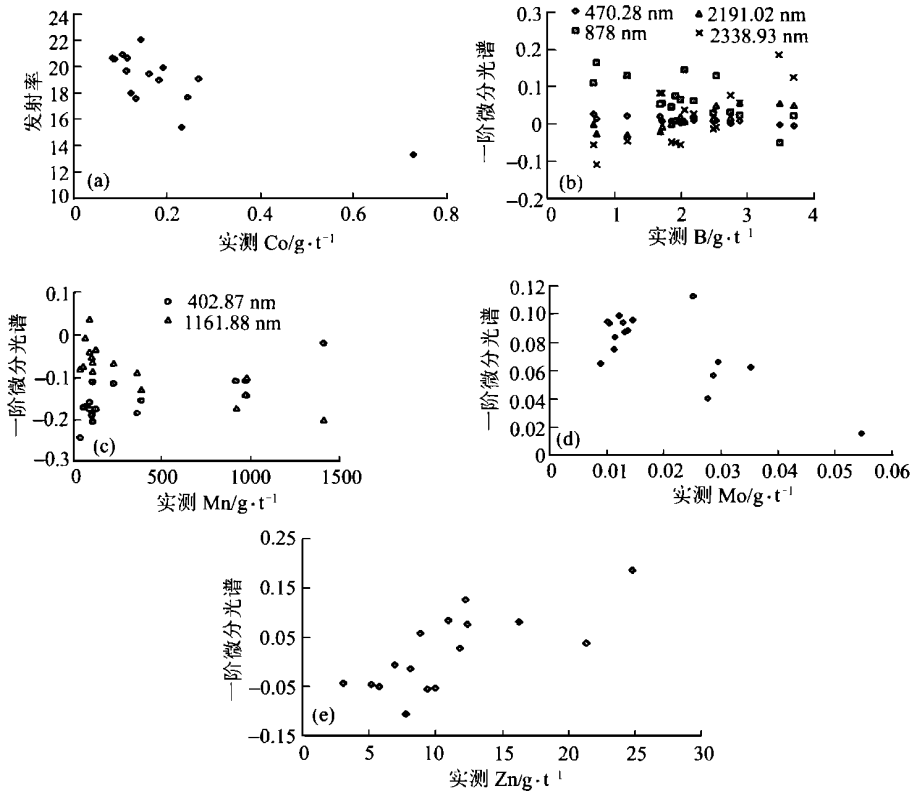


图 3 微量元素与特征吸收波段处光谱散点图

Fig. 3 Scatter map of trace elements content in absorption feature wavelength

表 4 微量元素特征吸收波段分析

Table 4 Absorption features analysis of trace elements

元素	波长/ μm	R^2	生化成分 ^[17,18]	元素生理功能 ^[19]
Mn	0.40	0.58	-	增强光合作用, 增加蛋白质积累, 参与维生素 C 和核黄酸的合成。
	1.16	0.66	木质素	
B	0.47	0.70	叶绿素 b	
	0.88	0.53	-	促进糖类和蛋白质代谢, 增强植物输导系统, 促进糖分对植物各部分的供应。
	2.19	0.73	蛋白质, N	
	2.34	0.57	纤维素	
Mo	1.62	0.56	-	固氮作用及促进蛋白质的合成
Zn	2.34	0.54	纤维素	促进光合作用, 参与生长素的合成

图 3 分别为微量元素在其高相关性波段处的散点图, 其中(a) 针对的是原始光谱, 反映的是 Co 元素含量与波段 569.22 处反射率的相关性, (b) 分别为 B 与波段 470.28, 878, 2191.02, 2338.93 nm 处一阶微分光谱的散点图; (c) 分别为 Mn 与波段 402.87, 1161.88 nm 处一阶微分光谱的散点图; (d), (e) 分别为 Mo 和 Zn 与波段 1623.06 和 2338.93 nm 处一阶微分光谱的散点图。散点图可以更为直观地看出相关性, 同时还可以反映相关状态, 即它们之间究竟存在的是正相关还是负相关。

4 结 论

本文定量化研究了微量元素与植物光谱的反射率大小以及光谱位置的变化, 探讨了微量元素对植物光谱的响应机理。通过研究发现在整个波长范围内均存在着微量元素的植物光谱响应, Co 的含量与植物光谱绿区(0.56 μm 附近) 反射率存在强的负相关; Mn, B, Mo 和 Zn 分别与中心波长为 0.4, 1.16; 0.47, 0.88, 2.19, 2.34; 1.62 和 2.34 μm 的光谱反射峰位置有较好的相关性。

致 谢 本研究在光谱数据采集工作中得到了王成的帮助, 另外在数据处理和分析方面得到牛铮、刘建贵的大力支持, 在此一并表示感谢!

参 考 文 献 (References)

[1] WANG Jiange, *et al.* Biogeochemistry [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1999. [王将克等. 生物地球化学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1999.]

[2] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M. Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese [J]. *Agron. J.*, 1996, **88**: 937—943.

[3] Al-Abbas A.H., Barr R, Hall S.D., *et al.* Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves [J]. *Agron. J.*, 1974, **66**: 16—20.

[4] Walburg G, Bauer M. E, Daughtry C.S.T, *et al.* Effect of nitrogen nutrition on growth, yield and reflectance characteristics of corn canopies [J]. *Agron. J.*, 1982, **74**: 677—683.

[5] Milton N M, Eiswerth B A, Ager C M. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants [J]. *Remote Sensing Environ*, 1991, **36**: 121—127.

[6] Wang Ke, Shen Zhangquan, Wang Rendao. Vegetation nutrient condition and spectral feature [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1999, **1**: 1—4. [王珂, 沈掌泉, 王人潮. 植物营养胁迫与光谱特性. 国土资源遥感, 1999, 1(1): 1—4.]

[7] Fourty Th., Baret F., Jacquemoud S., *et al.* Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition direct and inverse problems [J]. *Remote Sensing Environ*, 1996, **56**: 104—117.

[8] Niu Zheng, Chen Yonghua, Sui Hongzhi, *et al.*, Mechanism analysis of leaf biochemical concentration by high spectral remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(2): 125—130. [牛铮, 陈永华, 隋洪智等. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析 [J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 125—130.]

[9] Pu Ruiqiang, Gong Peng. Hyperspectral remote sensing and its application [M]. Higher Education Press, 2000. [浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.]

[10] Tian Guoliang, Bao Peili, Li Jianjin, *et al.*. Effects of Cadmium and Copper in soil on spectral reflectance of rice [J]. *Remote Sensing of Environment*. China, 1990, **5**(2): 140—149. [田国良, 包佩丽, 李建军等. 土壤中镉、铜伤害对水稻光谱特性的影响 [J]. 环境遥感, 1990, 5(2): 140—149.]

[11] Guo Shizhong, Tian Guoliang, *et al.* Effects of Sulfur dioxide and heavy metal element: Cadmium on spectral feature of vegetation [J]. *Environmental Sciences*, 1984, **5**(6): 13—18. [郭世忠, 田国良等. 二氧化硫和重金属镉、铜等物质对植物光谱特性的影响 [J]. 环境科学, 1984, 5(6): 13—18.]

[12] Guyot G, Baret F, Jacquemoud S. Imaging spectroscopy for vegetation studies [C]. *Imaging spectroscopy: Fundamentals and prospective application*. 1989, 145—165.

[13] Ma Yueliang, Xu Ruisong, *et al.* Biogeochemical effect of gold deposit and remote sensing information extract [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, **13**(1): 8—16. [马跃良, 徐瑞松等. 金矿生物地球化学效应及遥感信息提取 [J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(1): 8—16.]

[14] Tong Qingxi, Tian Guoliang. Study on radiation feature of electromagnetic wave about natural objects [M]. Remote sensing application center of the ministry of water resources, China. [童庆禧, 田国良, 自然界物体电磁波辐射特性的研究 [R], 水利部遥感应用中心, 1981.]

[15] Johnson L F, Billow C R. Spectrometric estimation of total nitrogen concentration in Douglas-fir foliage [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, **17**: 489—500.

[16] Yoder Barbara J, Rita E Pettigrew-Crosby. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentration from reflectance spectra (400—2500 nm) at leaf and canopy scales [J]. *Remote Sens. Environ*, 1995, **53**: 199—211.

[17] Himmelsbach D S, Boer J D, Akin D E, *et al.* Solid-state carbon-13 NMR, FTIR and NIR spectroscopic studies of ruminant silage digestion [M]. Analytical applications of spectroscopy. 1988.

[18] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry: review [J]. 1989, *Remote Sensing Environ*. 1989, **30**: 271—278.

[19] Wu Xiangyao. Biogeochemical generality [M]. Chengdu University of Science and Technology Press, 1993. [吴香尧, 生物地球化学概论 [M]. 成都科技大学出版社, 1993.]

Mechanism Analysis of Leaf Spectrum Response Resulted from Trace Elements

MA Chao-fei, MA Jian-wen, HAN Xiu-zhen

(*Institute of Remote Sensing of Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: This study presents a mechanism analysis to the response of leaf spectrum result from trace elements. A wide range of leaves were collected including variations in species and leaf status. The biochemistry composition was measured using ICP-AES techniques to determine Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Cr, Mo and B contents. Concurrently, leaf reflectance was measured with a high spectral resolution spectrophotometer in the 400—2500 nm range with approximately 1.1 nm spectral resolution. Trace elements are helpful to natural growth of vegetable, and the detection in trace elements' status is an important approach to find out growth condition of vegetable. The study for trace element and spectral characters is one of important methods in quantitative remote sensing. In this paper, spectrum data and trace elements are firstly analyzed using different techniques, and in the end the relationship was studied between trace elements and leaf spectrum, and differential coefficient spectrum. Result shows that Co content is strongly correlative with leaf spectral reflectivity negatively in around 569.22 nm. In addition, Mn, B, Mo and Zn are in good consistent with absorption features of leaf spectrum in (0.4, 1.16), (0.47, 0.88, 2.19, 2.34), 1.62 and 2.34 μm . Its' mechanism is discussed chiefly other than only discovering the location of leaf spectrum response resulted from different trace elements.

Key words: leaf spectrum; trace element; characteristic absorption; spectrum response