

巨桉人工林叶片养分交互效应

冯茂松, 张健*, 杨万勤

(四川农业大学林学院, 四川雅安 625014)

摘要: 在四川巨桉栽培区设立了 60 个标准地, 采用相关分析和矢量诊断法进行分析, 以了解巨桉人工林养分的相互作用关系。结果表明, 巨桉人工林叶片的养分交互作用较为复杂。N 可促进 P、K、Ca、Mn 等的吸收, 但易受到 Fe、Zn、高 Ca、高 Mg 的拮抗, 而且高 N 抑制了 Mn 的吸收; P 可促进 K、Mg、Mn 等的吸收, 但易受 Zn、Fe、高 Mn、高 K、高 Ca、高 Mg 的拮抗, 而高浓度的 P 将抑制 K、Zn、Fe 等的吸收; K 对其他养分元素均没有明显的促进作用, 但高浓度 K 限制 P 的吸收; Ca、Mg 之间可相互促进吸收。同时, 低浓度的 Ca 和 Mg 有利于 Fe、Zn 的吸收, 高浓度的 Ca 和 Mg 将对 N、P、Fe、Mn、S、B 等养分产生拮抗, 限制吸收; S 可促进 Zn 的吸收, 但易受高 Ca、高 Mg 拮抗; Cu、Zn、Fe、Mn 之间主要以拮抗为主。B 相互作用较少, 对其他养分几乎没有明显的促进作用。

关键词: 巨桉; 交互作用; 矢量诊断法

中图分类号: S792.39; S714.8.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)05-1160-10

Nutrient interactions in leaves of the eucalypt(*Eucalyptus grandis*) plantations

FENG Mao-song, ZHANG Jian*, YANG Wan-qin

(College of Forestry, Sichuan Agriculture University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

Abstract: Interactions between nutrients in the leaves of eucalypt(*Eucalyptus grandis*) plantations in Sichuan were studied in order to provide scientific basis for nutrient management in the plantation. The vector diagnosis in combination with correlative test was used. N facilitated the uptake of P, K, Ca and Mn, but the interactions in the eucalypt tissue were subjected to antagonism by high concentrations of Fe, Zn, Ca and Mg in the eucalypt leaves. Furthermore, high N concentration in the eucalypt leaves inhibited the uptake of Mn. P accelerated the uptake of K, Mg and Mn, and was subjected to antagonism by high concentrations of Zn, Fe, Mn, K, Ca and Mg in leaves of the eucalypt tree. High P concentrations also limited the uptake of K, Zn and Fe. No significant interactions between the K and the other nutrients were found, but high K concentration in leaves of the eucalypt reduced P uptake. Positive interactions between Ca and Mg were found in leaves of the eucalypt. Low concentrations of Ca and Mg in leaves favored Fe and Zn uptake, while higher concentrations reduced the uptake of N, P, Fe, Mn, S and B. Similarly, S could facilitate the Zn uptake, but was labile to be subjected to antagonism by high concentrations of Ca and Mg in plant tissues. Negative interaction was found between Cu, Zn, Fe and Mn in the eucalypt tissues. No significant interactions between B and other nutrients were found in the eucalypt leaf.

Key words: eucalypt(*Eucalyptus grandis*); nutrient interaction; vector diagnosis

在一定条件下, 两个或多个养分元素的结合其生理效应小于或超过它们各自效应之和, 即植物养分离子间存在交互作用关系, 又称相互作用^[1-2]。植物营养离子的交互作用主要有协同作用(Synergistic effect)和拮抗作用(Antagonistic effect)两大类。交

互作用对林木生长和元素循环有着明显的影响, 据研究, 在林木营养中, 交互作用是十分普遍的^[1], 而林木养分元素之间的交互作用对施肥措施的制定必将产生深刻的影响, 如养分平衡的人工调节, 有益元素的定向培育, 有毒、有害元素的人为控制等。养分

收稿日期: 2008-11-17

接受日期: 2009-03-16

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2008BAD2B01); 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC01A11)资助。

作者简介: 冯茂松(1974—), 男, 四川平昌人, 讲师, 博士, 主要从事森林培育和森林生态研究。E-mail: fms444@sicau.edu.cn

* 通讯作者 Tel: 0835-2882794, E-mail: sicauzhangjian@163.com

管理作为人工林可持续经营的重要途径或手段,必须建立在清楚认识林木对养分需求的基础上。目前人工林特别是巨桉人工林林木与土壤中养分元素之间的相互作用研究较少,不能满足生产需要。开展巨桉人工林交互作用研究有利于科学施肥和可持续经营管理,从而节约资源投入,减少环境污染,对巨桉人工林的发展具有重要意义。

巨桉(*Eucalyptus grandis*)属桃金娘科(*Myrtaceae*)桉属(*Eucalyptus*)的优良速生用材树种,原产于澳大利亚,现为四川省主栽桉树种之一。但巨桉人工林养分管理粗放,施肥措施未有效与养分诊断相结合,肥料浪费大,施肥效应不明显。为此,开展巨桉人工林养分交互效应即养分管理^[3-5]的研究,以期对巨桉人工林的科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

巨桉人工林主要分布于四川盆地南部、西南部地带,包括泸州、宜宾、乐山、眉山、洪雅、蒲江、彭山、新津一线,东经 103.28°~105.25°,北纬 28.16°~30.39°,海拔 345~646 m,近 5 年年均降水量 934.6~1493.8 mm,年均温 16.8~18.1℃,绝对最低温度 -6~-3.3℃,绝对最高温度 36.8~40.3℃,土壤类型以黄壤、紫色土为主,地带性植被类型为亚热带常绿阔叶林,属中亚热带湿润性气候。

巨桉人工林均采用百日营养袋苗营造。根据地方造林技术规程,整地前进行炼山,采用 50 cm×40 cm 穴状整地,2.5 m×3 m 株行距,施 400~500 g/株桉树专用肥(N≥18%,P≥5%,总养分≥30%,水分≤2%,粒度 95%)或 250~500 g/株钙镁磷肥作底肥,不进行追肥,次年进行补植,林分郁闭前进行除草割灌,郁闭后林下未采用任何抚育措施,5~6 年采伐。

1.2 调查方法及采样

按照典型布样,分别按林分年龄、立地条件、林分生长状况共设立 60 块 20 m×20 m 标准地。分别在各标准地调查立地等级、林木生长量,沿对角线等距挖取 5 个土壤剖面,采集根系分布层(0—40 cm)混合土壤样品用于养分分析,同时选取 10~15 株生长正常、无明显缺素症状(典型缺素标准地例外)的平均木作为采样木,分别在树冠上、中、下三层,阴、阳两面收集生长完全、无缺陷的新成长 1 年生叶片,混合样品,用于百叶干重和叶片养分分析。

由于在巨桉生长期林地土壤养分总量和活性、林木组织养分浓度和含量会随时间发生变化,不同的养分元素变化规律又不尽相同,为消除取样时间带来的误差,以便比较不同立地林木的营养状况,确定调查采样时间为 2004 年 12 月至 2005 年 1 月,即巨桉生长休眠期,此期土壤养分变化较小,树液基本停止流动,树木组织之间养分循环较弱,其养分浓度和含量处于相对稳定状态。

1.3 测定项目与数据处理

土壤养分分析参照 GB 7848-87、GB 7849-87、GB 7852-87、GB 7853-87、GB 7854-87、GB 7856-87、GB 7857-87、GB 7859-87、GB 7865-87、GB 7879-87、GB 7880-87、GB 7881-87、GB 7882-87 等国家标准;叶片养分分析参照 GB 7886-87、GB 7887-87、GB 7890-87 等国家标准,K、Ca、Mg、Zn、Fe、Cu、Mn 等元素均采用原子吸收分光光度法(TAS-986 型,产地北京)进行测定。材积、立地等级采用黄从德^[6-8]编制的四川巨桉人工林二元材积表(公式 $V = 0.0000783738 \times D^{1.71182751} \times H^{0.997981}$)和四川巨桉人工林地位指数表、立地等级表进行计算。

按照养分含量(X)、养分浓度(Y)和生物量(Z)的函数关系 $X = f(Y, Z)$ 计算叶片中各养分元素浓度和含量,并以设立的对照或高产组巨桉叶片养分和百叶干重为参考,绘制矢量诊断图,然后根据矢量的大小、方向判断各营养元素营养状况(亏缺、充足、奢侈消耗、毒害、稀释等)及其程度,其诊断原理和判定方法参见文献^[3]。

2 结果与分析

60 块标准地土壤养分浓度和叶片养分浓度及百叶干重(DW of 100 leaf)分别列于表 1 和表 2。

2.1 相关性分析

土壤养分是植物养分的直接来源,植物对某种养分的吸收不仅受到该养分在土壤中的供应量影响,而且也受到土壤中其他养分供应量的影响,因而表现为土壤养分浓度与植物组织养分浓度之间存在较好的线性相关性。由于植物对养分的吸收具有选择性,植物体内各养分浓度也表现出一定的相关关系^[9]。

除两个变量的简单相关关系外,土壤养分与叶片养分之间同时存在着复杂的相互作用关系。考虑到养分之间的多重关系可简化为两个变量相互作用关系的集合,本文仅作简单相关性分析。分析结果

表 1 四川巨桉人工林标准地土壤养分浓度

Table 1 Soil nutrient concentration of *Eucalyptus grandis* plantation in Sichuan

标准地 Sites	土壤养分全量 Total soil nutrient (g/kg)/有效量 Soil available nutrient (mg/kg)									
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn	C	Cu
1	1.15/60.8	0.59/0.69	22.1/46.7	1.19/59	19.5/160	50.8/85.8	1.22/10.6	0.46/28.5	16.1	3.25
2	1.32/98.6	0.64/0.55	16.9/69.6	0.84/237	12.7/378	58.8/83.3	1.10/9.16	0.47/10.1	25.7	3.03
3	0.84/44.3	0.39/0.63	23.5/72.0	1.51/610	27.2/1251	35.0/65.1	1.46/5.31	0.45/34.5	14.2	0.83
4	1.97/88.1	0.57/4.50	20.3/56.2	1.09/299	11.2/509	16.7/84.0	1.00/9.30	0.39/28.9	17.3	2.63
5	1.02/70.9	0.43/9.60	18.1/55.8	1.47/1324	16.7/1019	24.1/97.3	0.85/8.47	0.48/49.2	17.3	5.20
6	1.09/68.7	0.78/52.3	18.3/58.8	1.22/969	17.8/968	32.7/83.6	0.84/6.79	0.52/42.9	15.2	2.51
7	0.68/57.4	0.24/0.72	24.0/49.1	0.99/68	11.8/251	15.5/59.7	0.69/3.92	0.42/1.99	7.60	0.83
8	0.75/63.9	0.28/0.75	15.6/57.8	1.01/393	4.31/545	6.75/80.5	1.48/5.46	0.38/41.5	5.30	0.78
9	0.68/46.3	0.27/0.54	16.1/45.6	1.53/63	8.06/69	9.77/85.3	1.78/3.46	0.36/6.63	7.30	0.51
10	0.85/70.9	0.57/0.68	16.5/48.8	1.30/129	13.5/151	69.9/52.3	0.95/8.36	0.45/1.33	11.3	1.23
11	2.71/173.5	0.32/1.35	13.0/109	3.05/286	14.4/486	15.7/93.1	1.23/11.3	0.44/39.9	28.5	0.79
12	1.06/60.2	0.28/0.77	24.4/90.5	2.85/37	15.6/199	14.5/76.5	1.33/4.32	0.34/1.81	10.5	0.58
13	0.76/55.4	0.26/0.79	17.8/40.8	2.77/438	11.6/1121	15.9/76.2	1.26/4.41	0.34/26.9	7.20	0.67
14	1.58/59.9	0.29/0.92	16.9/56.4	3.05/619	14.3/1386	30.8/62.5	1.09/5.54	0.43/25.0	8.70	0.80
15	0.73/56.7	0.29/0.61	13.6/52.3	1.17/40	22.4/109	19.3/70.6	1.12/6.34	0.44/10.8	14.1	0.66
16	0.84/79.1	0.25/0.63	13.5/55.2	1.25/21	15.5/69	26.3/45.1	1.48/8.59	0.37/2.69	8.90	0.73
17	0.58/34.9	0.30/0.63	13.4/51.6	1.76/9.3	22.3/58	23.6/68.9	1.29/8.44	0.38/8.72	15.1	0.70
18	0.73/30.4	0.88/2.11	24.6/58.1	16.3/5739	92.5/1169	34.8/1.15	1.04/0.26	0.79/28.8	10.0	0.20
19	1.42/71.8	0.75/136	25.3/70.2	3.00/2678	47.6/1039	32.8/66.3	1.06/11.7	0.74/53.9	15.2	2.13
20	0.99/88.8	0.49/20.2	24.7/70.3	1.64/2378	37.0/621	27.7/93.3	1.08/13.6	0.66/52.7	12.2	5.15
21	8.66/334	1.12/93.4	17.5/63.8	2.30/1640	14.1/686	12.4/79.0	1.65/19.7	0.51/37.0	259	4.39
22	0.46/24.0	0.81/3.65	24.1/47.2	14.8/2000	74.8/1094	35.1/1.27	0.71/0.40	0.65/33.0	5.00	0.26
23	1.15/79.8	0.89/1.05	26.1/53.9	12.6/4620	86.0/518	40.0/1.26	1.03/0.22	0.81/20.7	20.9	0.25
24	1.04/62.5	0.92/9.21	25.4/69.8	16.6/2920	87.5/1487	34.4/1.27	0.97/0.23	0.86/35.0	18.3	0.21
25	1.02/48.9	0.97/9.83	25.5/60.2	15.4/2711	81.1/733	33.5/1.29	0.92/0.32	0.77/34.5	21.6	0.24
26	0.85/34.5	0.88/2.72	23.6/46.9	12.9/2654	80.6/1351	32.8/1.28	0.97/0.50	0.75/33.4	12.2	0.26
27	0.69/78.3	0.35/5.23	24.7/37.4	0.80/498	10.2/1081	16.5/96.6	0.81/8.74	0.47/41.5	9.60	4.58
28	0.76/91.7	0.54/8.04	24.6/54.0	1.40/1427	15.4/1035	43.4/82.7	0.63/8.06	0.57/47.8	16.2	5.83
29	1.45/129	0.72/3.99	18.2/44.2	1.13/853	15.6/737	45.0/102	0.96/8.42	0.56/25.9	23.9	5.60
30	0.91/76.4	0.34/3.39	13.6/55.6	1.50/40	12.4/130	19.9/74.5	0.92/8.54	0.47/28.3	10.5	0.53
31	0.98/85.2	0.29/0.66	20.3/60.7	1.58/55	15.6/295	18.9/73.5	1.27/9.37	0.42/24.1	8.00	0.61
32	0.93/43.9	0.32/0.55	28.0/56.6	3.72/21	15.5/100	23.2/75.5	2.21/13.3	0.47/5.86	12.3	3.02
33	2.10/88.9	0.40/0.58	20.5/45.8	3.34/245	25.4/518	27.1/46.1	1.92/8.73	0.55/45.9	11.0	0.92
34	0.53/45.6	0.36/0.54	19.4/36.6	6.74/138	43.6/683	24.6/58.5	1.92/7.19	0.56/44.6	7.20	0.83
35	0.38/58.2	0.43/0.67	21.6/63.8	4.50/541	37.0/1619	22.7/23.2	1.19/7.00	0.45/21.5	5.80	0.48
36	0.87/49.2	0.34/0.62	11.9/62.6	6.21/668	37.1/1984	38.5/13.6	0.85/8.23	0.41/26.2	4.60	0.55
37	0.88/48.4	0.85/1.26	29.1/47.2	11.9/4018	61.8/893	42.8/1.37	2.00/0.35	0.85/21.8	8.10	0.25
38	0.84/47.5	0.45/0.66	20.3/86.7	8.07/2272	49.7/2079	41.0/71.9	1.97/6.41	0.65/48.5	7.10	0.76
39	1.31/82.5	0.36/0.61	23.8/68.3	4.40/2041	30.1/2494	22.4/67.0	1.50/6.21	0.54/44.7	10.8	1.03
40	1.90/107	0.34/0.74	21.5/67.7	3.51/1889	23.4/2134	26.0/47.4	0.95/7.50	0.56/38.9	17.4	0.66
41	1.68/170	0.62/1.31	26.8/86.3	2.41/2973	38.8/1904	30.3/76.0	1.30/8.97	0.59/52.1	9.70	2.22
42	0.91/96.8	0.94/2.88	26.6/76.1	15.8/3964	48.4/1062	36.6/1.28	1.33/0.31	0.75/23.2	9.80	0.13
43	1.63/100	0.44/0.68	29.9/80.3	2.29/978	29.7/2544	50.4/24.1	1.55/5.41	0.40/3.33	11.0	0.96
44	1.08/103	0.83/6.76	23.9/86.8	7.55/3982	46.6/1376	35.3/1.24	1.85/0.31	0.67/27.1	10.1	0.17
45	1.00/123	1.02/6.05	27.7/114	12.2/3826	65.5/1927	43.2/1.16	1.38/0.3	0.74/20.6	13.1	0.16
46	1.71/115	0.87/4.26	30.0/83.0	9.17/4019	46.9/1096	42.0/1.29	1.47/0.31	0.82/22.1	8.40	0.16
47	2.26/114	0.90/1.13	16.1/68.7	16.11/3945	46.9/863	34.2/1.31	1.83/0.31	0.75/15.4	14.4	0.14
48	1.10/79.0	0.65/1.00	26.0/93.6	5.88/3063	66.4/2721	38.6/4.30	1.21/7.41	0.78/48.6	4.60	0.66
49	1.67/159	0.41/0.88	16.3/48.8	2.38/1803	21.7/672	22.9/80.4	2.23/8.00	0.49/44.3	19.5	0.60
50	1.08/118	0.34/0.61	19.1/81.3	2.54/224	34.7/2490	25.6/65.6	1.41/4.67	0.52/6.81	10.9	1.01
51	0.88/101	0.32/0.63	16.3/60.3	1.65/803	13.2/1417	22.1/65.6	1.18/7.96	0.44/8.65	11.4	0.59
52	0.65/107	0.32/0.92	18.8/54.9	0.86/179	11.6/281	14.8/67.0	0.84/7.60	0.45/13.4	9.70	0.54
53	0.80/104	0.29/0.64	20.7/56.0	1.20/1529	11.3/1522	19.0/48.7	0.87/5.25	0.59/44.1	10.0	0.59
54	1.39/96.1	0.26/0.56	21.7/68.3	2.07/1668	22.1/2812	19.3/70.6	0.76/7.71	0.46/37.6	7.10	0.64
55	0.59/105	0.28/0.60	19.4/54.0	4.01/1725	19.9/2649	22.1/66.1	1.54/6.83	0.39/7.40	3.00	0.66
56	1.02/122	0.80/0.62	35.7/114	25.6/4084	75.2/924	48.5/1.27	1.60/0.32	0.90/14.4	17.8	0.20
57	0.92/110	0.35/0.64	25.0/69.7	3.47/1459	19.5/2058	20.7/57.4	1.20/5.34	0.46/39.0	11.5	0.66
58	0.92/116	0.36/0.66	24.4/78.7	3.39/1736	14.5/2166	21.4/82.0	1.43/8.99	0.54/47.2	7.00	0.69
59	1.46/110	0.65/1.23	29.2/84.2	15.5/3978	35.9/1175	30.0/1.3	1.14/0.34	0.68/23.0	17.9	0.17
60	0.87/110	0.38/0.87	24.8/66.7	3.72/2126	22.1/2229	22.0/84.7	1.07/8.77	0.54/46.0	15.1	0.75

表 2 四川巨桉人工林标准地叶片养分浓度

Table 2 Foliar nutrient concentration of *Eucalyptus grandis* plantation in sichuan

标准地 Site	叶片养分浓度 Foliar nutrient concentration											百叶干重 DW of 100 leaf (g)
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Fe	Mn	B	
	(g/kg)						(mg/kg)					
1	14.66	1.02	8.64	5.77	15.16	1.72	10.19	27.89	211.93	390.7	36.9	66.44
2	13.17	0.86	9.28	5.67	19.31	2.32	9.96	44.63	262.38	912.97	42.59	35.01
3	9.13	1.21	8.69	4.49	15.76	2.71	8.36	54.83	161.7	714.85	39.03	38.05
4	20.27	1.16	12.36	5.09	18.67	2.36	11.39	38.39	205.82	605.59	45.32	41.58
5	19.57	1.3	11.56	5.36	16.24	1.68	13.54	33.36	403.94	701.89	53.22	27.32
6	21.6	1.92	11.28	4.27	21.98	1.72	15.92	16.47	146.19	1768.88	58.35	31.57
7	14.01	0.84	12.04	5.23	19.45	2.18	4.88	88.48	212.34	1319.52	47.83	21.37
8	14.24	0.64	8.61	5.4	13.82	3.11	7.27	121.46	660.15	1006.02	53.01	52.29
9	15.08	0.82	16.14	3.93	11.82	2.96	10.66	43.73	832.72	2678.03	39.18	27.01
10	21.37	0.99	6.58	8.15	14.97	1.67	8.07	60.68	375.2	545.22	41.82	37.87
11	18.44	0.94	14.4	5.29	12.15	3.39	20.7	14.74	189.3	818.84	39.19	38.42
12	16.59	1.17	14.86	5.53	13.38	2.83	11.07	41.73	210.5	1477.6	28.64	19.91
13	18.01	0.77	6.73	4.72	17.86	2.06	7.7	74.22	108.08	672.82	33.28	25.25
14	14.01	1.33	11.6	3.92	15.2	2.42	12.15	46.68	396.99	568.49	34.07	39.1
15	16.42	1.2	9.18	5.43	17.22	3.18	16.66	28.65	831.28	1179.37	39.98	24.53
16	11.47	1.05	9.85	4.28	13.39	2.31	6.52	59.9	191.09	545.12	50.1	58.78
17	18.9	1.1	10.28	5.43	15.67	2.53	7.4	124.59	94.53	976.48	27.62	35.74
18	16.56	1.05	14.04	6.35	24.35	1.69	14.24	23.97	252.21	71.51	50.27	28.71
19	16.67	1.08	11.94	6.46	18.62	2.12	10.25	53.17	375.73	104.57	48.7	36.39
20	23.08	1.57	11.65	4.57	20.90	1.95	11.83	31.82	258	90.17	43.25	15.09
21	39.99	2.45	11.44	3.54	21.13	2.49	10.96	27.77	126.87	54.68	62.99	13.47
22	24.5	1.62	11.13	6.56	23.42	2.48	13.11	26.85	220.42	71.41	41.81	12.05
23	26.74	1.81	9.87	3.22	19.03	2.00	7.99	50.39	156.29	60.25	33.46	14.89
24	18.95	1.09	9.52	3.48	16.81	1.74	5.46	56.47	92.86	76.78	41.62	44.39
25	17.53	1.34	12.99	6.24	15.98	2.54	12.59	36.82	125.48	163.63	53.53	16.95
26	19.63	1.33	12.25	10.56	27.18	1.71	11.13	40.19	127.13	63.35	56.8	21.62
27	16.75	1.2	10.07	4.48	18.06	1.65	7.13	34.78	246.43	293.39	36.23	34.05
28	18.12	1.08	11.41	3.95	19.90	1.68	10.78	23.35	194.88	431.96	33.08	38.73
29	26.23	1.61	11.15	4.47	20.06	1.95	15.32	17.75	115.13	399.47	42.98	24.03
30	13.06	0.69	12.54	6.37	18.58	2.59	8.68	66.34	709.79	3140.87	49.81	31.68
31	13.54	0.76	8.56	6.7	21.68	3.00	9.38	46.33	230.14	2550.49	41.08	25.66
32	11.59	0.86	17.69	1.7	22.08	4.09	10.79	51.64	625.16	566.87	36.51	18.85
33	11.46	1.51	13.31	5.25	17.59	1.40	7.63	48.19	220.68	1713.19	45.17	29.1
34	17.81	1.04	14.71	8.54	19.35	1.34	12.72	16.23	239.48	2960.96	57.63	48.88
35	10.45	1.3	12.19	6.59	15.94	1.91	6.62	42.7	214.68	779.53	42.52	28.51
36	10.84	0.43	7.36	7.86	26.4	1.59	6.56	92.36	189.7	1589.16	45.58	32.84
37	15.39	1.29	12.97	7.15	20.51	1.82	15.15	12.2	312.7	198.61	21.98	15.94
38	6.32	1.22	8.82	9.19	20.52	2.33	15.17	37.42	245.03	302.46	36.9	12.18
39	5.72	0.8	7.73	4.33	14.06	1.83	6.68	35.24	163.9	178.73	39.15	48.4
40	13.58	1.02	13.83	9.27	24.62	1.39	15.62	15.43	200.52	1491.87	38.23	28.67
41	13.17	2.54	16.9	7.3	28.29	1.83	11.54	53.56	241.63	79.65	40.63	31.01
42	6.71	2.05	12.11	7.15	26.51	2.83	8.66	68.89	151.28	161.76	56.67	37.81
43	13.04	1.8	10.05	9.57	27.1	1.48	11.29	18.54	235.55	1010.59	30.53	29.81
44	14.67	1.7	9.83	6.21	19	1.71	7.31	24.13	69.58	120.58	36.99	41.45
45	10.33	2.11	11.47	7.41	18.52	2.99	8.82	64.27	184.21	178.08	53.12	26.03
46	12.63	1.98	9.88	5.31	22.84	2.09	8.42	30.67	137.28	122.29	33.67	39.46
47	10.13	1.17	8.53	7.18	26.15	1.17	6.98	55.77	393.02	129.91	40.37	39.17
48	18.67	1.99	14.05	6.53	22.68	1.98	9.7	34.67	157.44	106.05	42.89	39.2
49	15.75	1.38	6.44	7.75	17.36	1.93	8.7	38.96	241.6	754.17	29.55	30.38
50	15.07	1.31	8.95	7.58	22.01	2.18	14.51	21.21	268.83	984.12	45.97	38.64
51	14.88	0.91	9.31	8.07	21.58	2.17	12.8	14.74	214.61	753.12	29.79	35.03
52	15.96	1.16	6.29	6.8	18.69	1.68	10	24.73	212.75	1372.57	37.42	50.51
53	11.88	1.38	6.61	8.02	17.36	2.23	10.91	22.18	159.38	329.39	29.93	43.74
54	14.31	0.86	7.64	6.52	18.62	1.64	10.09	27.67	94.59	779.97	36.11	45.68
55	10.9	1.04	10.3	8.91	20.37	1.83	8.16	43.33	164.19	1024.93	46.12	41.76
56	11.04	1.2	12.34	10.35	23.17	2.11	9.66	80.35	332.34	93.53	37.67	18.48
57	15.23	1.48	11.64	8.03	20.7	2.24	11.96	13.65	133.06	1414.92	50.51	42.26
58	9.99	0.49	3.67	5.56	11.92	2.12	18.09	64.74	6128.38	865.76	51.1	36.6
59	8.73	0.72	7.63	9.3	25.17	2.40	10.61	47.47	190.22	167.76	41.96	26.19
60	7.91	0.94	8.44	9.19	22.75	1.50	10.56	19.03	20.32	1900.88	33.7	47.54

(表 3)表明,1)土壤全 N 和速效 N 与巨桉叶片 N 均呈极显著相关关系,是巨桉 N 营养的主要来源;土壤 P、Zn 全量,有机质、P、K、Mg、Zn、Cu 有效量与叶片 N 关系显著,是巨桉 N 营养的影响因子。这些养分之间可能存在显著的相互作用关系。2)与 N 相似,土壤 P 库仍是巨桉 P 营养的主要来源,但由于受 P 易被固定因素的影响,土壤全 P 与巨桉叶片 P 关系更加显著。此外,土壤 K、Mg、Fe、Mn 全量、Ca、Fe 有效量与叶片 P 关系显著,一定程度上将影响巨桉

对 P 的吸收或富集。3)巨桉叶片 K 与土壤养分有效量关系均不显著,仅与土壤 P、Mg、Zn 全量关系显著,可能与研究区域 K 供应充分以及 K 的主动吸收特性有关。钾肥的增产效应则可能通过 K 与其他离子之间的相互作用体现。4)土壤 Ca、Mg 是巨桉 Ca、Mg 主要来源,但受 K、P、Fe、Mn、Zn、Cu、有机质等养分的影响。除与土壤 K 显著相关外,Fe、Mn、Zn、Cu 等微量元素与土壤其他大量或中量养分关系不显著,仅与土壤中该养分含量有关。

表 3 巨桉人工林土壤养分与植物叶片养分相关性分析

Table 3 Relationships between soil nutrients and foliar nutrients in the eucalypt (*Eucalyptus grandis*) plantation

叶片养分		相关系数 Correlative coefficient (r)										
Foliar nutrient		N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Fe	Mn	B
土壤全量 Total soil nutrient	N	0.841**	0.530**	0.111	0.212	0.094	0.036	0.102	0.160	0.142	0.191	0.418**
	P	0.417**	0.582**	0.332**	0.075	0.392**	0.175	0.16	0.212	0.290*	0.732**	0.387**
	K	0.179	0.346**	0.220	0.352**	0.371**	0.087	0.289*	0.264*	0.268*	0.480**	0.125
	Ca	0.156	0.199	0.197	0.385**	0.404**	0.076	0.070	0.221	0.169	0.600**	0.111
	Mg	0.069	0.372**	0.297*	0.264*	0.383**	0.192	0.084	0.176	0.268*	0.657**	0.121
	Fe	0.076	0.281*	0.218	0.239	0.293*	0.296*	0.166	0.190	0.205	0.400**	0.129
	Zn	0.388**	0.095	0.311*	0.215	0.104	0.351**	0.042	0.064	0.199	0.109	0.268*
	Mn	0.067	0.415**	0.222	0.236	0.424**	0.222	0.111	0.222	0.213	0.755**	0.117
	C	0.933**	0.492**	0.125	0.268*	0.114	0.135	0.099	0.113	0.127	0.193	0.537**
土壤有效量 Soil available nutrient	N	0.656**	0.590**	0.083	0.033	0.134	0.088	0.129	0.209	0.229	0.158	0.251
	P	0.510**	0.283*	0.205	0.172	0.190	0.131	0.138	0.083	0.041	0.225	0.438**
	K	0.355**	0.322*	0.089	0.256*	0.272*	0.234	0.206	0.123	0.202	0.268*	0.161
	Ca	0.179	0.400**	0.143	0.261*	0.465**	0.260*	0.125	0.188	0.274*	0.718**	0.108
	Mg	0.368**	0.188	0.188	0.427**	0.345**	0.381**	0.106	0.240	0.419**	0.239	0.108
	Fe	0.149	0.279*	0.221	0.338**	0.434**	0.168	0.253	0.175	0.270*	0.494**	0.068
	Mn	0.127	0.192	0.027	0.143	0.092	0.244	0.234	0.216	0.235	0.272*	0.227
	Zn	0.376**	0.295*	0.199	0.274*	0.224	0.192	0.150	0.113	0.140	0.302*	0.104
	Cu	0.452**	0.150	0.165	0.434**	0.230	0.125	0.246	0.214	0.056	0.152	0.118

** : $r_{0.01(58)} = 0.330$; * : $r_{0.05(58)} = 0.254$

巨桉叶片养分浓度相关性分析结果(表 4)表明,叶片 N 与 P 之间存在显著的正相关关系(协同效应),而与 Ca 之间存在显著的负相关关系(拮抗作用);P 吸收量与 K、Mg 吸收量成正比,表现出协同效应,而与 Zn、Fe、Mn 成负相关关系,表现为拮抗作用;K 除与 P 为正相关外,仅与 Fe 负相关,受影响的因素较少;Ca、Mg 之间,S、Zn 之间,Cu、Fe 之间存在明显的协同效应,而 S 与 Ca、Mg,Fe 与 Mg,Zn 与 Cu 之间存在明显的拮抗作用;B 在相关性分析中与其他养分元素关系均不显著,说明该养分交互效应不明显。

2.2 矢量诊断

向量分析是在一幅综合性的向量分析图中,揭示林木生长效应、养分浓度及养分含量之间的内在联系。该方法在解释多种养分的交互作用和一些施肥反应时具有较大的优越性^[10]。

由于高产组标准地生长量相对较高,其养分供应状况更加平衡,因此以高产组巨桉叶片养分浓度、百叶干重、百叶养分含量作为对照(表 5)进行养分矢量诊断,有利于对比不同标准地巨桉林养分供应平衡状况和诊断 11 种养分元素之间的交互效应。

表 4 巨桉人工林植物叶片养分的相关性

Table 4 Relationships among nutrients in leaves of the eucalypt (*Eucalyptus grandis*) plantation

元素 Elements	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Fe	Mn
P	0.366**									
K	0.165	0.309*								
Ca	-0.351**	-0.029	-0.152							
Mg	-0.040	0.355**	0.158	0.489**						
S	-0.028	-0.079	0.245	-0.344**	-0.296*					
Cu	0.195	0.057	0.189	0.109	0.016	0.151				
Zn	-0.198	-0.269*	-0.137	-0.109	-0.150	0.266*	-0.547**			
Fe	-0.147	-0.280*	-0.277*	-0.082	-0.282*	0.083	0.319*	0.155		
Mn	-0.144	-0.398**	0.098	0.077	-0.162	0.059	0.049	0.017	0.092	
B	0.204	0.147	0.161	-0.008	0.085	0.048	0.057	0.116	0.141	0.105

** : $r_{0.01(58)} = 0.330$; * : $r_{0.05(58)} = 0.254$

表 5 巨桉养分矢量诊断参考值

Table 5 Referenced values of nutrients in leaves of the eucalypt (*Eucalyptus grandis*) plantation by vector diagnosis

指标 Index	参考值 Referenced values	指标 Index	参考值 Referenced values	指标 Index	参考值 Referenced values
DW/100 leaf (g)	31.68	Ca (g/kg)	5.66	Zn (mg/kg)	49.32
N (g/kg)	16.89	Mg (g/kg)	18.58	Fe (mg/kg)	290.68
P (g/kg)	1.16	S (g/kg)	2.08	Mn (mg/kg)	660.32
K (g/kg)	11.37	Cu (mg/kg)	9.30	B (mg/kg)	44.10

1~60号标准地矢量诊断如图1所示。由图1可知:

1) 1、2号标准地(洪雅)土壤N、K、Ca、Mg有效量均为2号显著高于1号,但叶片浓度则相反,说明存在一定的因素限制(对2号标准地而言)或促进(对1号标准地而言)了N、K、Ca、Mg的吸收,这可能与土壤中N的存在形态以及K、Ca、Mg等的三角交互作用有关。祖艳群等^[11]研究认为,由于 K^+ 与 NO_3^- 电荷相反, NH_4^+ 的代换作用以及根际离子吸收的酸化效应促进了 K^+ 与 NO_3^- 的吸收,而 K^+ 参与 NO_3^- 运输和蛋白酶活化均提高了N、K的相互促进作用。陈际型等人^[12]认为,尽管K、Mg和Mg、Ca、N由于竞争根的吸收位或由于K阻碍Mg向地上部分转移而产生拮抗作用,但K、Ca、Mg的交互作用仍以协同作用为主,可能是由于K、Ca、Mg的结合促进了根系的生长,根膜的吸收系统有所增加,因而减弱了K、Mg和Mg、Ca离子对吸收位点的竞争作用。本研究中2号标准地Mn诊断结果为过量毒害,其叶片浓度(913.0 mg/kg)远远高于1号(390.7 mg/kg),比较土壤中养分含量,有效Fe、Cu、Zn不存在明显差别,Fe分别为85.80、83.32 mg/kg;Cu分别为3.25、

3.03 mg/kg,Zn分别为10.55、9.16 mg/kg),有效P、Mn含量处于中等水平,仅速效N差别较大(分别为60.76、98.58 mg/kg),结合其他研究^[1,13]结果看出,Mn容易受N、P、Fe、Zn、Cu等的相互作用影响,2号标准地中主要是由于N促进了Mn的吸收,引起Mn富集,这与孙清斌等人^[14]的研究结果相同。

2) 3、4号标准地(夹江)干物质重变化不大,养分供应状态相近;其中N、Cu、Zn叶片浓度与土壤供应状况一致,Fe、Mn、B等土壤养分和叶片养分含量差异不显著,交互作用不明显。土壤K浓度(21.50、20.30 g/kg)差异不显著,但叶片K浓度4号标准地(12.36 g/kg)显著高于3号(8.69 g/kg),结合前期对N、K施肥效应研究^[3-5,15-16],K受到N的协同作用,富集作用较为明显。4号标准地土壤有效P(4.50 mg/kg)远高于3号标准地(0.63 mg/kg),而叶片P含量不存在显著差异,可能存在一定的因素限制(对4号而言)或促进(对3号而言)了P的吸收。结合“只有K才能活化磷离子的专性吸附位”这一论点^[17],4号标准地K供应充分,对根系磷离子专性吸附位活化程度较高,但叶片P浓度并不增加。证明土壤Ca、Mg等离子降低了土壤P离子有效性,导致P吸

收受阻,最终表现为两者叶片 P 不存在显著差异。另一种原因可能与 P-Zn 的相互作用有关。郑绍建等人^[18]认为,Zn 对 P 存在一定的拮抗作用,Zn 是细胞膜的组成部分,缺 Zn 或供 Zn 不足会使细胞膜失

去完整性,引起 P 向细胞内渗透,最终导致体内 P-Zn 比率失调。李惠英等人^[19]的研究也证实了这一结论。

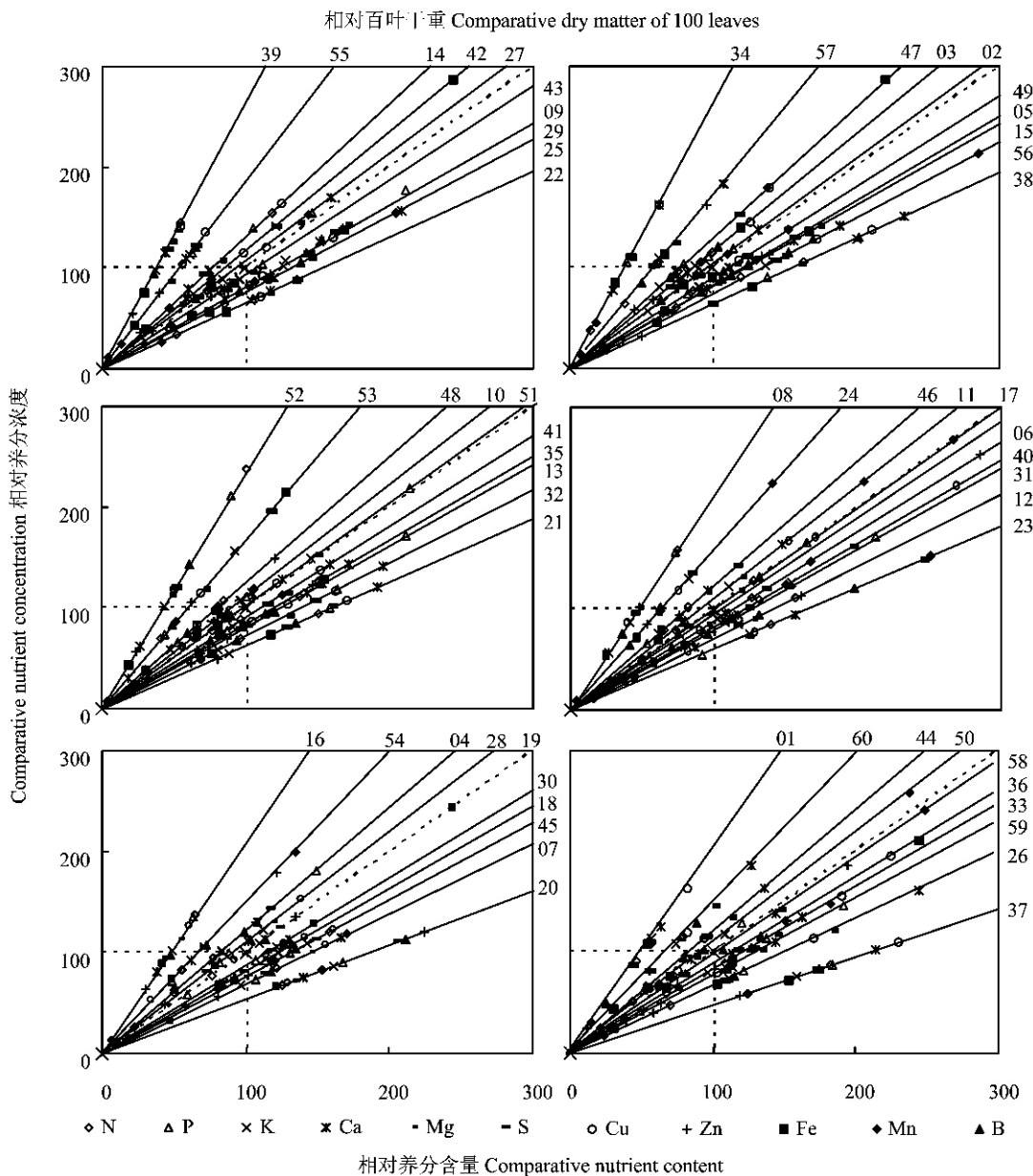


图 1 四川巨桉人工林养分矢量诊断图

Fig.1 Diagram of nutrient vector diagnosis in the eucalypt (*Eucalyptus grandis*) plantation of Sichuan

3)比较 5、6 号标准地(新津普兴),叶片 N、K、S、Cu、B 浓度没有显著差异,P、Mg、Ca 等小幅度增减,Fe、Mn、Zn 差异显著;而土壤中有有效 Fe(97.34、83.56 mg/kg)有效 Cu(5.20、2.51 mg/kg)含量较高,有效 P(9.60、52.29 mg/kg)交换性 Ca(1323.8、968.7 mg/kg)差别较大,其他养分元素不存在显著

差异。根据王家玉^[11]、王建^[13]、钟安良等人^[20]的研究,Cu²⁺、Zn²⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺与 Fe²⁺容易产生竞争,高浓度的 P、Fe²⁺、Mn²⁺、Cu²⁺、Ca²⁺、Mg²⁺均在一定程度上抑制根对 Zn 的吸收,导致缺 Zn,细胞膜透性增加,提高了 P 的渗透性,进而导致 P 吸收过量产生毒害。5、6 号标准地中 P 诊断结果为奢侈吸

收, Mn、Cu、Fe 的拮抗作用较为明显, Zn 为稀释效应, 与上述研究结果表现一致。

4) 7~9 号标准地(纳溪河丰)中, 土壤 Mn 供应量(10.76、2.69、8.72 mg/kg)相对较低, 对 Fe、Zn 的拮抗作用不明显, 而随叶片 Fe 富集(831.28、191.09、94.53 mg/kg), Zn 浓度(28.65、59.90、124.59 mg/kg)相应降低, 表现为明显的拮抗作用。一般认为, Mn 与叶绿素光合作用有关, 能显著促进 N、P、K 等的吸收, 而 Zn 容易与 P 结合, 并占用 Ca、N 等的运输通道, 因此低的 Mn 含量和高的 Zn 含量共同决定了 N、P、Ca 等元素受到拮抗^[1, 43]。10~12 号标准地(宜宾来复)和 13~16 号标准地(蒲江石象湖)的诊断结果也证实了这一结论。随 Mn 浓度降低, Zn 浓度增大, 叶片 N、P、Ca 均表现出降低的趋势, 而 Fe 的诊断结果表明, 高浓度的 Fe 对 N、P 也具有一定的拮抗作用。

5) 17~18 号标准地(彭山公义)叶片 Cu、Ca 浓度较高, 但土壤 Cu 含量较低, 表现为 Ca 对 N、Zn、Mn、B 等的拮抗。19~20 号标准地(彭山公义)土壤有效 N(82.54、106.53 mg/kg)相对较高, N 吸收量增加, 叶片 Mn、Ca 浓度增加, 表现为 N 对 Mn、Ca 的促进作用。21~28 号标准地(彭山保胜)土壤 N、P、K、Ca、Mg 等养分浓度较高, Fe、Zn、Cu 等养分浓度较低, 但出现叶片 P、Ca、Mg 与 Zn、Mn 等的分离, 说明 P、Ca、Mg 与 N、Fe、Zn、Mn 等养分之间存在相互抑制作用。29~40 号标准地(彭山金刚)叶片 Ca 浓度普遍较低, 但土壤 Ca 含量普遍较高, 说明存在其他养分离子对 Ca 的拮抗。其中 36、39 号标准地土壤 Ca 和叶片 Ca 浓度均较高, 但叶片 Mn、N、P 等浓度较低, 说明高 Ca 对 Mn、N、P、Zn、Fe、Cu 等具有明显的拮抗作用。

6) 乐山 20 个标准地中, 41~43 号标准地(乐山杨坪)由于 Ca、Mg 施肥量较大, 导致过量吸收, 进而引起 Fe、Zn 拮抗, Mn 仍然受 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等的拮抗; 44~46 号标准地(乐山平兴), P、K、Mg、S、Cu、Mn 诊断为稀释效应, N、Ca、Zn、Fe 诊断为缺乏, 这与其他离子吸收量增多要求更高的 N 或其他养分对 Fe、Zn、Ca 等的拮抗作用导致 Fe、Zn、Ca 吸收量下降有关; 47~48 号标准地(乐山杨军坡)仅 Fe、K、P 等发生分化, Fe、Mn、Zn 等元素之间仍存在明显的相互拮抗作用; 49~51 号标准地(乐山沙湾), 高 Fe、Cu、Ca 吸收量对 Mn 起限制作用, 而由

于 PO_4^{3-} 可与土壤中 Ca、Fe、Al、Mn 等发生沉淀反应, 不仅降低了 P 的有效性, 同时降低了 Fe、Zn 等的有效性^[1, 43, 20], 因此 P、Fe、Zn 等均诊断为缺乏; 52~60 号标准地(乐山苏稽)N、P、Mg、S、Cu、B 诊断为明显的过量毒害, 而 K、Ca、Zn、Fe、Mn 等元素由于受拮抗作用影响养分浓度和含量均较低。结合植株可见症状诊断, 53、55、56、59 号标准地植株叶片呈黄色(部分间杂红色小点)或红色, 具有明显的缺素或毒害症状; 而 52、54、57、58、60 号标准地植株正常, 未表现出明显的缺素或毒害症状。说明养分供应状况不平衡, N、P、Mg、S、Cu、B 等养分元素相对过量, K、Ca、Zn、Fe、Mn 等元素相对缺乏。可能是由于过量 P 与 Mn 发生沉淀, 抑制 Mn 吸收和运转, 同时降低 Zn 的有效性, 容易发生磷酸铁沉淀, 因而导致 Mn、Fe、Zn 吸收受阻。

3 讨论与结论

四川巨桉人工林林分养分相互作用中, N 可促进 P、K、Ca、Mn 等的吸收(高 N 抑制 Mn 吸收), 但易受到 Fe、Zn、高 Ca、高 Mg 的拮抗; P 可促进 K、Mg、Mn 等的吸收, 但易受 Zn、Fe、高 Mn、高 K、高 Ca、高 Mg 的拮抗, 而高浓度的 P 将抑制 K、Zn、Fe 等的吸收; K 对其他养分元素均没有明显的促进作用, 但高浓度 K 限制 P 的吸收; Ca、Mg 之间可相互促进吸收。同时, 低浓度的 Ca 和 Mg 有利于 Fe、Zn 的吸收, 高浓度的 Ca 和 Mg 将对 N、P、Fe、Mn、S、B 等养分产生拮抗, 限制吸收; S 可促进 Zn 的吸收, 但易受高 Ca、高 Mg 拮抗; Cu、Zn、Fe、Mn 之间主要以拮抗为主, 如高 Mn 对 Fe, 高 Cu 对 Zn 的拮抗。Fe 对 Cu 有一定的促进作用, 但对 K、B 具有明显的拮抗作用; B 相互作用较少, 对其他养分几乎没有明显的促进作用, 但易受高 Ca、高 Mg、高 Fe 的拮抗。

结合上述分析结果, 可用图 2 表示四川巨桉人工林养分元素之间的相互作用关系。这与植物营养学上营养元素相互关系图具有一定的共同点, 如 N 对 P、K, P 对 K、Mg, Ca 对 Fe 等的促进作用以及 P 与 Fe, Fe 与 Mn 之间的拮抗作用。但也存在不一致的作用关系, 如高 Ca 对 Fe、Mn、B, 高 Mg 对 N、P、K, 高 P 对 K、Zn 等的拮抗作用, 其原因在于养分元素之间的相互作用关系受植物对养分的吸收特性以及养分元素所处浓度范围影响, 最终表现形式有所差异。

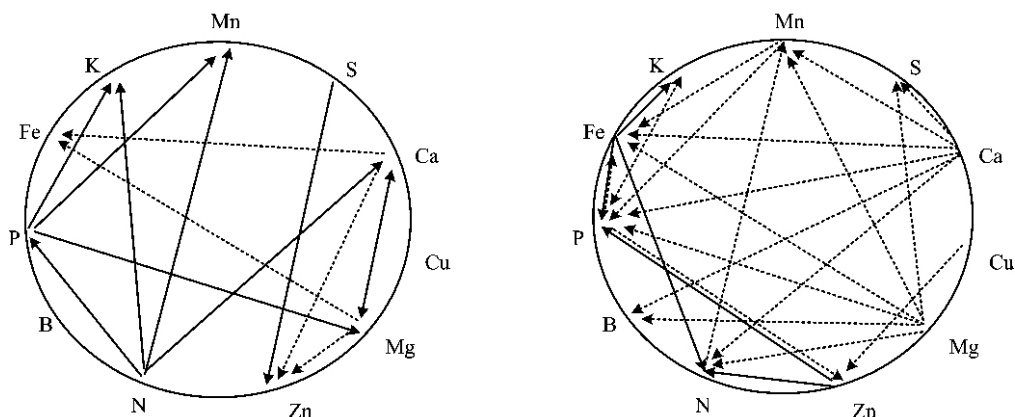


图 2 巨桉人工林养分元素相互促进作用和拮抗作用

Fig. 2 Synergistic effects and antagonistic effects between nutrients in leaves of the eucalypt (*Eucalyptus grandis*) plantation

(左图中实心箭头表示促进作用,虚箭头表示低浓度起促进作用;右图实心箭头表示抑制作用,虚箭头表示高浓度起抑制作用。)

Real and dummy arrows showed the positive interactions under the conditions of normal and lower concentrations in the left figure, respectively;

Real and dummy arrows showed the negative interactions under the conditions of normal and higher concentrations in the right figure, respectively.)

林木养分之间的相互作用较为复杂,不仅两个养分元素之间存在相互促进和拮抗作用,三个乃至更多养分元素之间也存在交互效应;同时,元素与元素之间的交互效应在一定浓度范围内方可表现出来,这给交互效应的研究带来了一定难度。但研究养分交互作用对指导生产仍具有重要的科学意义,如根据交互作用的表现调整养分供应状况,有利于林木养分达到更平衡的供应状态,也有利于提高养分利用率,降低养分管理成本,减少环境污染。本研究仅从交互作用的表现形式做出了有益的尝试,而交互作用的浓度作用范围,交互作用的植物生理学、酶学、土壤化学、微生物学、植物遗传学等机理有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 王家玉. 植物营养元素交互作用研究[J]. 土壤学进展, 1992, 20(2): 1-10.
Wang J Y. Research on domino effect among nutrient element of plant [J]. Prog. Soil Sci., 1992, 20(2): 1-10.
- [2] Boyle J R. Mineral relation [A]. Gloquitz M. Trees physiology [M]. Canada: Oxford University Press, 1973. 141.
- [3] 冯茂松, 张健, 钟宇. 巨桉短周期工业原料林养分平衡的矢量诊断[J]. 林业科学, 2006, 42(2): 56-62.
Feng M S, Zhang J, Zhong Y. Vector diagnosis of nutrient balance of *Eucalyptus grandis* fast-growth plantation [J]. Sci. Sil. Sin., 2006, 42(2): 56-62.
- [4] 冯茂松, 张健. 巨桉叶片营养 DRIS 诊断研究[J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(4): 303-307.
Feng M S, Zhang J. On leaf nutrition DRIS diagnosis of *Eucalyptus grandis* [J]. J. Sichuan Agric. Univ., 2003, 21(4): 303-307.
- [5] 冯茂松, 张健. 巨桉纸浆原料林施肥效应研究[J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(3): 221-225.
Feng M S, Zhang J. On fertilizer effect on *Eucalyptus grandis* pulpwood timber [J]. J. Sichuan Agric. Univ., 2003, 21(3): 221-225.
- [6] 黄从德, 胡庭兴, 赖家明. 四川巨桉短周期工业原料林地位级表的编制[J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(1): 29-31.
Huang C D, Hu T X, Lai J M. The establishment of site class table for pulpwood plantation of *Eucalyptus grandis* plantation in Sichuan [J]. J. Sichuan Agric. Univ., 2003, 21(1): 29-31.
- [7] 黄从德, 胡庭兴, 赖家明. 四川巨桉短周期工业原料林二元材积表的编制[J]. 四川农业大学学报, 2003, 21(2): 106-108.
Huang C D, Hu T X, Lai J M. The establishment of volume table with two factors for pulpwood plantation of *Eucalyptus grandis* in Sichuan [J]. J. Sichuan Agric. Univ., 2003, 21(2): 106-108.
- [8] 黄从德, 胡庭兴, 赖家明. 四川巨桉短周期工业原料林人工林直径分布规律及其收获模型的研究[J]. 四川林业科技, 2003, 24(3): 41-45.
Huang C D, Hu T X, Lai J M. Research on the DBH distribution and yield model of pulpwood plantation of *Eucalyptus grandis* in Sichuan Province [J]. J. Sichuan For. Sci. Tech., 2003, 24(3): 41-45.
- [9] 孙羲. 植物营养原理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995. 1-6.
Sun X. Botany nutrient principle [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995. 1-6.
- [10] 张健, 宫渊波. 向量分析法及其在林木营养诊断中的应用 [A]. 森林与土壤—第六次全国森林土壤学术讨论会论文集选编 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997. 128-132.
Zhang J, Gong Y B. Vector analysis and its use for assessing forest nutrient [A]. Forestry and soil - No. 6 forest and soil academic seminar in China [C]. Beijing: Science and Technology. Press of China, 1998. 128-132.
- [11] 祖艳群, 林克惠. 氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响 [J]. 土壤肥料, 2000 (2): 3-7.
Zhu Y Q, Lin K H. Interactions of N and K and which effect on pro-

- duction and quality of crop [J]. *Soils Fert.* , 2000 , (2) : 3-7.
- [12] 陈际型,宣家祥. 低盐基土壤 K、Ca、Mg 的交互作用对水稻生长与养分吸收的影响 [J]. *土壤学报* , 1999 , 36 (4) : 433-439.
Chen J X , Xuan J X. Effect of interactions of K , Ca and Mg applied to soils with low base content on growth and nutrient uptake by rice plan [J]. *Acta Pedol. Sin.* , 1999 , 36 (4) : 433-439.
- [13] 王建,贾玉彬,张钢民. 银杏种子生长发育过程中营养元素含量相关性分析 [J]. *河北林果研究* , 1998 , 13 (1) : 49-53.
Wang J , Jia Y B , Zhang G M. Correlation between nutrient elements during growth and development of *Ginkgo biloba* seeds [J]. *Hebei J. For. Orch. Res.* , 1998 , 13 (1) : 49-53.
- [14] 孙清斌,尹春芹,沈仁芳,等. 锰与氮钾配施对冬小麦氮钾吸收影响及交互作用 [J]. *土壤* , 2008 , 40 (1) : 83-87.
Sun Q B , Yin C Q , Shen R F *et al.* Effects of addition of manganese in fertilization and its interactions with nitrogen and potassium on N and K absorption by winter wheat [J]. *Soils* , 2008 , 40 (1) : 83-87.
- [15] 冯茂松. 巨桉短周期工业原料林营养诊断指标体系研究 [D]. 四川雅安 : 四川农业大学博士学位论文 , 2007.
Feng M S. Study on nutrient diagnosis index system of short-cycle *Eucalyptus grandis* industry material plantation [D]. Ya ' an , Sichuan : PhD thesis , Sichuan Agricultural University , 2007.
- [16] 冯茂松. 巨桉纸浆原料林施肥效应研究 [D]. 四川雅安 : 四川农业大学硕士学位论文 , 2001.
Feng M S. On fertilizer effect on eucalyptus grandis pulpwood timber [D]. Ya ' an , Sichuan : Master thesis of Sichuan Agricultural University , 2001.
- [17] 鲁剑巍,陈防,张竹青,等. 磷钾肥配合施用对油菜产量及养分积累的影响 [J]. *中国油料作物学报* , 2003 , 25 (2) : 52-55.
Lu J W , Chen F , Zhang Z Q *et al.* Effect of combination of phosphorus and potassium application on rapeseed yield and nutrients accumulation [J]. *Chin. J. Oil Crop Sci.* , 2003 , 25 (2) : 52-55.
- [18] 郑绍建,杨志敏,胡霏堂. 玉米、小麦细胞磷、锌营养及交互作用的研究 [J]. *植物营养与肥料学报* , 1999 , 5 (2) : 150-155.
Zheng S J , Yang Z M , Hu A T. Study on the cell nutrition of phosphorus and zinc interaction in corn and wheat [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.* , 1999 , 5 (2) : 150-155.
- [19] 李惠英,朱永官. 不同磷钾施肥量对大麦产量及其吸收的影响 [J]. *中国生态农业学报* , 2002 , 10 (4) : 51-53.
Li H Y , Zhu Y G. The effects of different levels of phosphorus and zinc fertilizers on production and absorption in two barley species [J]. *Chin. J. Eco-Agric.* , 2002 , 10 (4) : 51-53.
- [20] 钟安良,熊文愈. 杉木人工林林木养分的季节变化及养分间的相互关系 [J]. *南京林业大学学报* , 1993 , 17 (3) : 1-8.
Zhang A L , Xiong W Y. Seasonal changes of nutrient concentrations and nutrient interactions in needles of Chinese fir plantations [J]. *J. Nanjing For. Univ.* , 1993 , 17 (3) : 1-8.