

# 圆柏属常绿木本植物元素含量的季节动态

陈银萍<sup>1,2</sup>, 张满效<sup>3</sup>, 陈拓<sup>4</sup>, 安黎哲<sup>2,4</sup>

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000; 3. 兰州石化职业技术学院, 兰州 730060; 4. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 测定分析了圆柏属 2 种常绿木本植物叶片干物质含量、叶绿素含量及 N、P、K、Na、Ca、Mg 等元素含量的季节变化和元素间的关系。结果发现, 两种圆柏叶片 N 含量与叶绿素含量正相关, 反映了其一年四季的生长情况; 两树种 N 和 K 含量的季节变化趋势相似, 夏、秋季高于冬、春季, 表明两树种夏、秋季富集的营养物质较多, 与夏、秋季较高的生物量一致; 而 P、Ca、Mg 和 Na 含量是冬、春季较夏、秋季高, 表明圆柏属植物通过积累这些无机渗透调节剂来增强其对低温的抗性。两树种叶片对 N 和 K 同步积累, 对 P、Na 和 Mg 同步积累, 但在元素积累模式上也存在一定的差异, 元素间的关系也要复杂得多。

**关键词:** 圆柏属; 常绿木本植物; 元素; 季节变化; 抗冷冻能力

中图分类号: Q142 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2009)03-0315-06

## Seasonal changes of element concentrations in the leaves of *Sabina*

CHEN Yin-Ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Man-Xiao<sup>3</sup>, CHEN Tuo<sup>4</sup>, AN Li-Zhe<sup>2,4</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou College of Petrochemical Technology, Lanzhou 730060, China; 4. Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The seasonal changes of dry matters, chlorophyll contents and N, P, K, Na, Ca and Mg concentrations in the leaves of *S. przewalskii* and *S. chinensis* were studied, the relations among these elements were also discussed. The results showed that N concentrations were positively correlated with chlorophyll contents, reflecting seasonal changes of growth of the evergreen woody plants of *Sabina*. N and K concentrations in summer and autumn were higher than that in winter and spring, indicating that two species enriched abundant nutrient matters in summer and autumn, which were identical with accumulating higher biomass in these two seasons. P, Ca, Mg and Na concentrations in winter and spring were higher than that in summer and autumn, and this indicated that two species could accumulate abundant inorganic osmotica to adapt itself to low temperature. N and K were accumulated synchronously, P, Na and Mg were accumulated synchronously, however, two species were different in the patterns of element accumulation and seasonal changes, and the relations among elements were very complicated.

**Key words:** *Sabina*; evergreen woody plants; element; seasonal changes; freezing tolerance

植物中化学元素含量是植物生物学特性与生态环境相统一的结果, 反映了植物自身的特征, 也反映了植物在一定的生境下从土壤中吸收和蓄积矿质养

分的能力。目前, 人们已经就水体富营养化(关保华等, 2002)、自由空气 CO<sub>2</sub> 浓度升高(庞静等, 2005)、土壤重金属污染(王春春等, 2001; 江洪等, 2007)和

收稿日期: 2008-05-20 修回日期: 2008-12-16

基金项目: 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金(QL-08-14A); 国家自然科学基金(30670319)[Supported by “Qing Lan” Talent Engineering Funds by Lanzhou Jiaotong University(QL-08-14A); the National Natural Science Foundation of China(30670319)]

作者简介: 陈银萍(1974-), 女, 甘肃榆中人, 博士, 副教授, 主要从事环境生物学研究, (E-mail) yinpch@mail.lzjtu.cn.

土壤累积酸化(刘菊秀等,2005;Huntington等,2000)等多种生境下植物元素含量变化进行了大量的研究。同时,研究植物的元素成分及其季节变化对揭示植物的营养需求及其对气候变化的反应具有重要意义(梁士楚等,1996;王文卿等,2001;侯爱敏等,2002;方运霆等,2005)。祁连圆柏(*S. przewalskii* Kom)是中国特有的耐寒、耐旱、耐贫瘠树种,分布于年均温 $0.5^{\circ}\text{C}$ 、海拔 $2\,600\sim 4\,000\text{ m}$ 的高山地区,以它为建群种形成的天然林在祁连山水源涵养林中占有重要地位,是山区造林及城乡绿化的优良树种,圆柏(*S. chinensis* (L.) Ant.)是一种四季常绿、树形优美较珍贵的绿化、美化城市的树种,分布在年均温 $8.5^{\circ}\text{C}$ 、海拔 $500\sim 1\,900\text{ m}$ 的低山地区(冯自成,1994)。而有关圆柏属植物叶片养分含量的季节变化的研究还未见报道。本文以上述两种圆柏属植物为研究对象,通过叶片叶绿素含量、元素含量及其季节变化的研究,揭示圆柏属植物的抗低温特性。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

试验地位于兰州市东南 $20\text{ km}$ 处的榆中县二阴山区( $103^{\circ}50'\sim 104^{\circ}10'\text{ E}$ , $35^{\circ}38'\sim 35^{\circ}58'\text{ N}$ ),海拔为 $1\,900\text{ m}$ 。该区属高寒半湿润气候区,年均气温 $7.6^{\circ}\text{C}$ ,极端最高温度为 $28.4^{\circ}\text{C}$ ,极端最低温度为 $-13.9^{\circ}\text{C}$ ,从10月至翌年4月最低气温在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下(图1),土壤冻结,年均无霜期 $110\text{ d}$ ,年均降水量 $362\text{ mm}$ ,年均空气相对湿度 $59.8\%$ ,年均日照时数 $7.2\text{ h}$ 。

### 1.2 材料

实验材料为生长良好的5年生祁连圆柏和圆柏实生苗针叶。自2004年8月至2005年7月,每月的22日取1次叶样,每次取样时间 $10:00\sim 12:00$ 。将每种试验苗木分为3组,即3次重复( $n=30$ ),在田间采集苗木中间部位枝条上的针叶,分组混匀后带回实验室。叶样分三部分,一部分叶片立即测定叶绿素含量,另一部分叶片经蒸馏水冲洗后置烘箱中, $110^{\circ}\text{C}$ 杀青 $10\text{ min}$ , $80^{\circ}\text{C}$ 下干燥 $24\text{ h}$ ,称重,磨粉用以测定元素含量,第三部分用纱布擦干净用以测定干物质含量。

### 1.3 测定方法

按Arnon(1949)的方法测定叶绿素含量;称重法测定干物质含量;有机碳测定用重铬酸钾、硫酸氧

化—外加热法,全氮测定用凯氏法(意大利产DK6,UDK140分析仪)(董鸣,1996);将烘干的样品置玛瑙研钵中研磨成粉末,用双面胶粘在铝材的平板上,置于JSM-5600LV低真空扫描电子显微镜(日本)X-射线能量色散谱仪(美国),进行能谱扫描,测定元素(P、K、Na、Mg、Ca)含量(Harvey等,1985)。

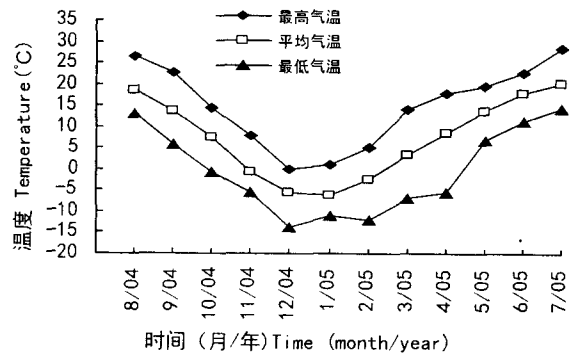


图1 2004.8~2005.7各月平均气温和最高、最低气温  
Fig.1 Variations of mean air temperatures, maximum and minimum temperatures in each month from August 2004 to July 2005 of research site

### 1.4 统计分析

用SPSS 10.0双变量相关性分析程序进行变量间的相关性分析,独立样本 $t$ -检验程序分析两树种间差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 两种圆柏叶片干物质含量的季节变化

随秋季(8~10月)气温下降,祁连圆柏和圆柏叶中干物质含量呈现明显上升趋势,冬季(11月至翌年1月)持续上升,翌年1月达到最高值,此后随春季(2~4月)气温的回升又有所下降,4月达最低值,之后在夏季(5~7月)都维持较低值(图2)。相关分析表明,两树种叶中干物质含量均与月均温极显著负相关( $r=-0.856, P<0.001$ ;  $r=-0.878, P<0.001$ )(表1)。

### 2.2 两种圆柏叶片叶绿素含量的季节变化

秋季随气温下降,两种圆柏叶中叶绿素a含量上升,10月出现一峰值;冬季开始显著下降,并于12月达到最低值;春季随气温上升,两种圆柏叶中叶绿素a含量持续增加,并于7月达最大值(图3:A)。叶绿素b含量则从秋季就开始显著下降,也于12月达到最低值;春季植物恢复生长,两种圆柏叶中叶绿素b含量缓慢增加;生长季显著增加并于7月达最

大值(图 3:B)。叶绿素总含量的变化动态与叶绿素 a 的变化动态相似(图 3:C)。叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值随温度降低在秋季和冬季都呈现上升趋势,春季再次上升并于 4 月达整个观察期中最大值,夏季显著降低,7 月达最低值(图 3:D)。相关分析表明,两种圆柏叶中叶绿素含量都与月均温极显著正相关(祁连圆柏:  $r=0.758, P<0.01$ ; 圆柏:  $r=0.723, P<0.01$ ),祁连圆柏叶中叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值与月均温极显著负相关( $r=-0.714, P<0.01$ ),圆柏叶中叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值与月均温显著负相关( $r=-0.646, P<0.05$ )(表 1)。

2.3 两种圆柏叶片元素含量季节变化

两树种叶片 N 含量的季节变动模式极其相似,

表 1 两种圆柏属植物叶片干物质、叶绿素、元素含量与平均温度之间的相关性分析(2004 年 8 月~2005 年 7 月)

Table 1 Pearson correlations between dry matters and mean temperature, between chlorophyll and mean temperature, and between element concentrations and mean temperature

	干物质 Dry matter	Chla+b	Chla/b	N	C/N	P	K	Ca	Mg	Na
祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	-0.856***	0.758**	-0.714**	0.766**	-0.823***	-0.817***	0.535	-0.384	-0.545	-0.725**
圆柏 <i>S. chinensis</i>	-0.878***	0.723**	-0.646*	0.174	-0.498	-0.864***	0.851***	-0.263	-0.838***	-0.771**

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

都是生长期开始浓度最高,生长旺盛的夏季急剧下

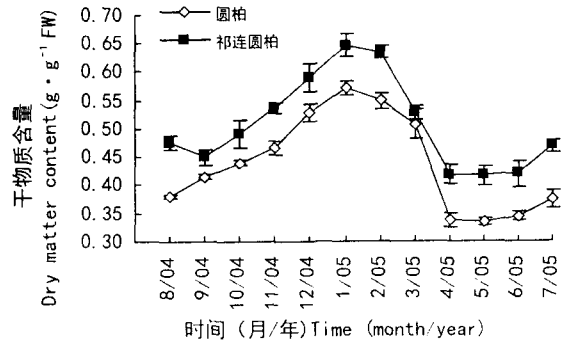


图 2 两树种叶中干物质含量的季节变化  
Fig. 2 Seasonal variations of dry matter contents(mean  $\pm$  SE) in the leaves of *S. chinensis* and *S. przewalskii*

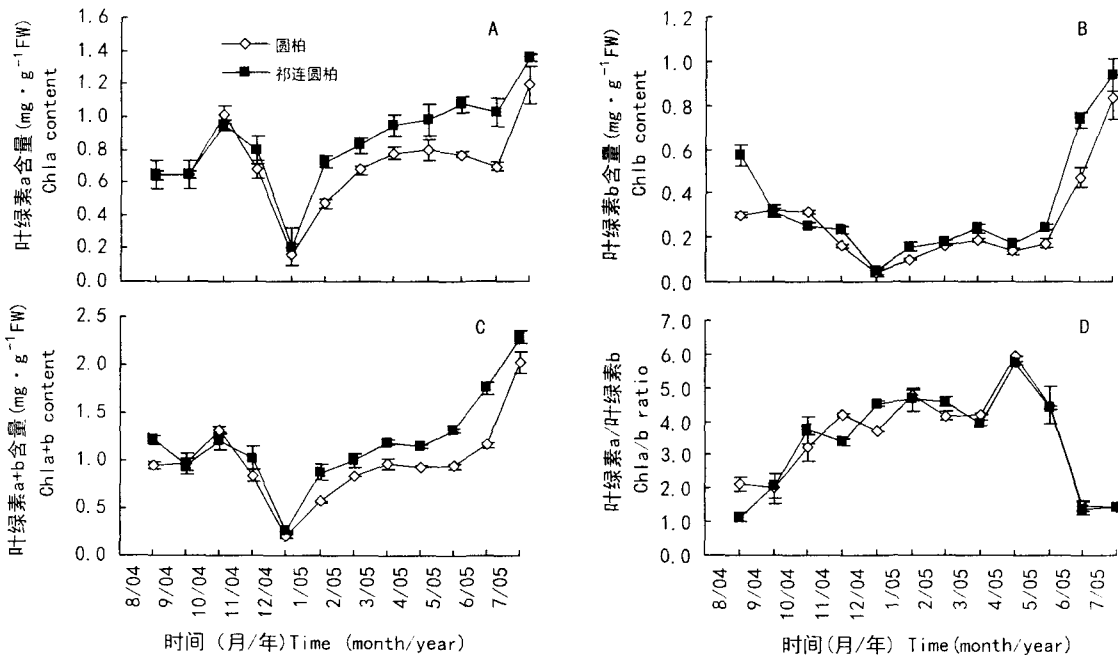


图 3 两树种叶片叶绿素含量的季节变化  
Fig. 3 Seasonal variations in contents of chlorophyll(mean  $\pm$  SE) in the leaves of *S. chinensis* and *S. przewalskii*

跌,然后逐渐上升,秋季达新的最高值后又转而下降,冬季出现第 2 个最低值。因此,叶片 N 含量季节变动一年有两个峰值和两个低谷。总体为夏、秋季高于冬、春季,夏季与秋季比较接近,差异较小,

冬季与春季比较接近,差异较小(图 4 A);相关分析表明,祁连圆柏叶中 N 含量与月均温极显著正相关( $r=0.766, P<0.01$ ),圆柏叶中 N 含量与月均温相关性不显著。C/N 的季节变化趋势是冬、春季高于

夏、秋季(图 4 C),与月均温负相关,祁连圆柏呈极显著负相关( $r=-0.823, P<0.01$ )。这种现象是冬、春季 N 含量降低和冬、春季 C 含量大量增加(图 4 B)同时引起。与 N 含量相反,两树种叶片的 P 含量均为冬、春季高于夏、秋季(图 4 D),且与月均温极显著负相关(祁连圆柏: $r=-0.817, P<0.01$ ;圆柏: $r$

$=-0.864, P<0.001$ )。K 含量均是夏季最高,祁连圆柏春季最低,圆柏冬季最低(图 4 E);圆柏叶中 K 含量与月均温极显著正相关( $r=0.851, P<0.001$ ),祁连圆柏叶中 K 含量与月均温相关性不显著。Ca 含量在整个测定期中呈波动性变化(图 4 F),虽与月均温负相关,但不显著。Mg 和 Na 含量

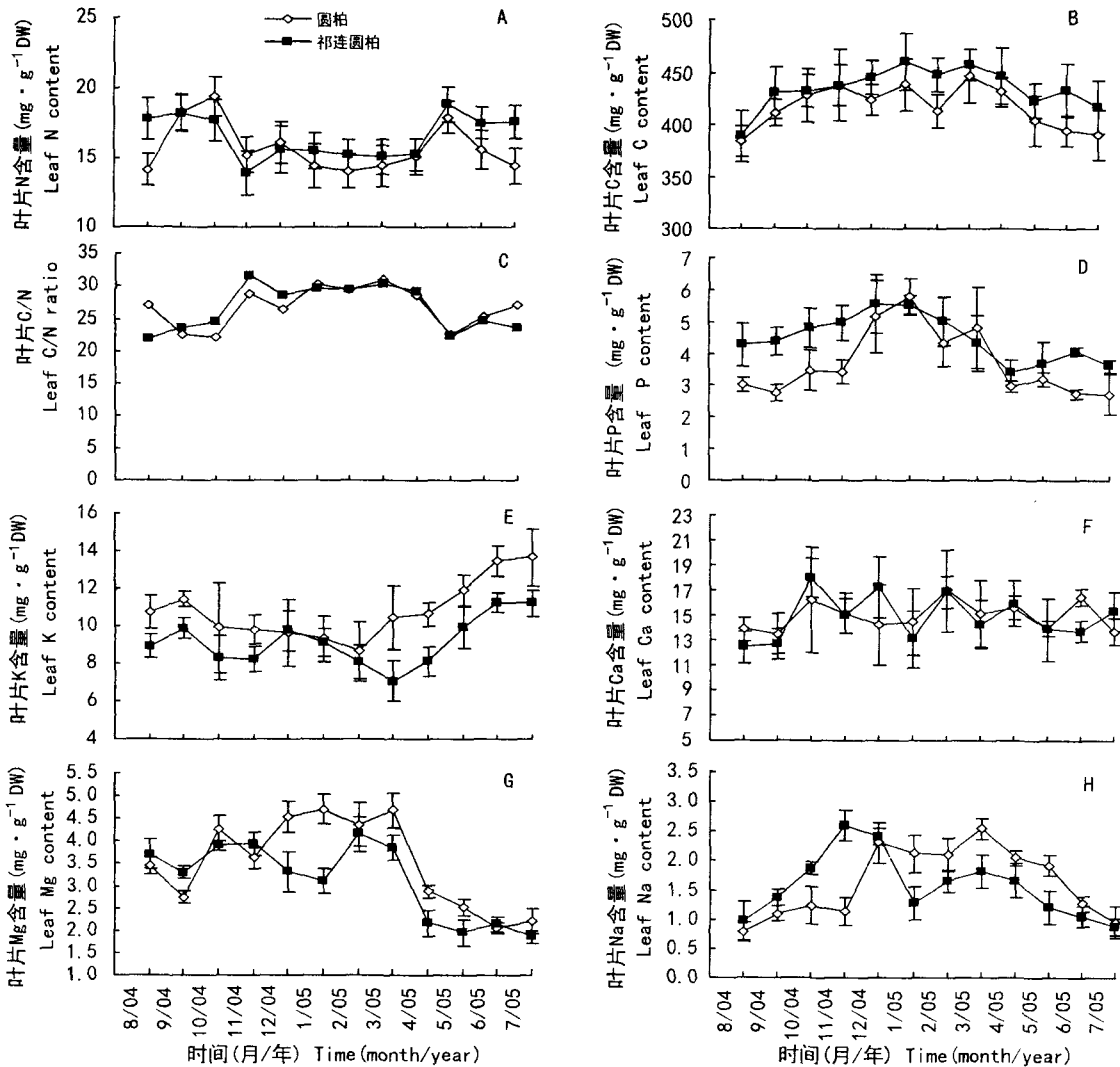


图 4 两树种叶中元素含量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations in element concentrations (mean  $\pm$  SE) in the leaves of *S. chinensis* and *S. przewalskii*

变化趋势相似,均是夏季最低,秋、冬、春三季相对较高(图 4 G, H);圆柏叶中 Mg 含量与月均温极显著负相关( $r=-0.838, P<0.001$ ),两树种叶中 Na 与月均温均极显著负相关(祁连圆柏: $r=-0.725, P<0.01$ ;圆柏: $r=-0.771, P<0.01$ )(表 1)。

2.4 叶绿素与 N 的相关性分析

一般情况下,叶片氮含量与叶绿素含量相关良好(Hamerlynck 等,2004)。本研究中,两种圆柏叶片氮

含量与叶绿素 a 及叶绿素总含量正相关(表 2)。

2.5 元素之间的相关性分析

两树种叶片 N 和 K 含量的季节变化趋势相同,祁连圆柏叶片 N 和 K 含量之间显著正相关( $r=0.603, P<0.05$ ),圆柏叶片 N 和 K 含量之间正相关但不显著。P、Na、Mg 含量季节变化趋势相似,两两元素之间均显示正相关性。Ca 与其它各元素间相关性均不显著。两树种不同的是, K 与 Na 在祁

连圆柏叶中也表现为正相关,而在圆柏叶中表现为负相关。由此可见,两树种在叶片元素积累模式上也存在一定的差异(表 3)。

### 2.6 两树种间差异性分析

祁连圆柏和圆柏虽然同为圆柏属常绿木本植物,但仍存在种间差异(表 4)。两树种叶片干物质含量除春季外,在其余三季中均为种间差异性极显

表 2 两种圆柏属植物叶片叶绿素与 N 含量的相关性分析  
Table 2 Pearson correlations between chlorophyll and N concentrations

		Chla	Chlb	Chla+b	Chla/b
祁连圆柏	Coefficient	0.272	0.483	0.420	-0.521
<i>S. przewalskii</i>	P value	0.393	0.112	0.175	0.082
圆柏	Coefficient	0.115	-0.036	0.049	-0.109
<i>S. chinensis</i>	P value	0.723	0.912	0.879	0.736

表 3 两种圆柏属植物叶片各元素之间的相关性分析  
Table 3 Pearson correlations between element concentrations

		N	P	K	Ca	Mg
Na	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	-0.262	0.237	0.127	0.383	0.285
	圆柏 <i>S. chinensis</i>	-0.408	0.967 **	-0.531	0.122	0.807 *
Mg	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	-0.446	0.680 *	-0.700 *	0.198	
	圆柏 <i>S. chinensis</i>	-0.165	0.864 **	-0.875 **	0.211	
Ca	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	-0.303	0.232	-0.242		
	圆柏 <i>S. chinensis</i>	-0.076	0.066	-0.283		
K	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	0.603 *	-0.258			
	圆柏 <i>S. chinensis</i>	0.096	-0.678 *			
P	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	-0.469				
	圆柏 <i>S. chinensis</i>	-0.283				

\*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ .

表 4 不同生长阶段两树种叶绿素、元素含量差异性分析  
Table 4 Difference analysis of chlorophyll and element concentrations between two tree species during different growing stages

	秋季 Autumn (2004.8~2004.10)			冬季 Winter (2004.11~2005.1)			春季 Spring (2005.2~2005.4)			夏季 Summer (2005.5~2005.7)		
	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	圆柏 <i>S. chinensis</i>	T-test (P value)	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	圆柏 <i>S. chinensis</i>	T-test (P value)	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	圆柏 <i>S. chinensis</i>	T-test (P value)	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	圆柏 <i>S. chinensis</i>	T-test (P value)
干物质	0.47±0.02	0.41±0.03	0.001	0.59±0.05	0.52±0.05	0.006	0.53±0.11	0.46±0.11	0.178	0.43±0.03	0.35±0.02	0.000
Chla+b	1.12±0.15	1.08±0.21	0.551	0.72±0.41	0.54±0.32	0.239	1.11±0.10	0.91±0.07	0.000	1.78±0.49	1.37±0.57	0.078
Chla/b	2.31±1.32	2.45±0.66	0.749	4.19±0.69	4.22±0.53	0.834	4.76±0.91	4.76±1.02	0.857	2.41±1.72	2.46±1.75	0.841
N	17.9±1.30	17.3±1.28	0.530	15.0±1.10	15.2±1.08	0.363	15.2±1.08	14.5±1.60	0.006	18.0±1.80	16.0±1.18	0.003
C/N	23.3±1.32	23.9±2.82	0.466	29.9±1.55	28.5±2.00	0.573	29.7±0.61	29.6±1.24	0.544	23.6±1.16	25.0±2.30	0.118
P	4.48±0.28	3.08±0.36	0.000	5.34±0.33	4.79±1.22	0.148	4.25±0.80	4.04±0.96	0.560	3.79±0.24	2.89±0.28	0.000
K	9.03±0.80	10.7±0.77	0.000	9.04±0.76	9.57±0.24	0.090	7.75±0.59	9.92±1.11	0.020	10.8±0.76	13.0±0.95	0.000
Ca	14.4±3.15	14.5±1.51	0.637	15.1±2.09	14.6±0.49	0.413	15.7±1.32	15.9±0.97	0.525	14.3±0.92	14.7±1.55	0.422
Mg	3.64±0.31	3.48±0.75	0.455	3.45±0.43	4.29±0.58	0.001	3.39±1.07	3.98±0.96	0.001	1.98±0.14	2.27±0.23	0.001
Na	1.41±0.46	1.04±0.23	0.000	2.09±0.72	1.86±0.63	0.541	1.73±0.11	2.33±0.31	0.000	1.04±0.17	1.38±0.49	0.216
Total	50.8±3.24	50.1±3.83	0.536	50.7±2.68	50.4±1.63	0.765	48.0±2.25	50.6±2.68	0.006	49.9±0.62	50.3±2.01	0.600

著( $P < 0.01$ ),表现为祁连圆柏>圆柏。叶绿素含量仅在春季恢复生长阶段种间差异极显著( $P < 0.01$ ),表现为祁连圆柏>圆柏。N含量在春季恢复生长阶段和夏季生长旺盛阶段种间差异极显著( $P < 0.01$ ),表现为祁连圆柏>圆柏。C/N在整个测定期中种间差异不显著( $P > 0.05$ )。P含量在夏季生长旺盛阶段和秋季生长末期种间差异极显著( $P < 0.001$ ),表现为祁连圆柏>圆柏。K含量在春、夏和秋季种间差异均

显著( $P < 0.05$ ),表现为圆柏>祁连圆柏。Ca含量种间差异不显著( $P > 0.05$ )。Mg含量在冬、春、夏三季种间差异极显著( $P < 0.001$ ),表现为圆柏>祁连圆柏。Na含量在秋季差异极显著( $P < 0.001$ ),表现为祁连圆柏>圆柏;在春季差异极显著( $P < 0.001$ ),表现为圆柏>祁连圆柏。两树种叶片元素总含量仅在春季种间差异性显著,其余季节差异性不显著(表 4),但都是冬季维持较高值,与夏季相比,圆柏增加

0.2%, 祁连圆柏增加 1.5%。虽然物种间元素含量存在差异, 但有其共同特点, 就是两树种元素含量大小顺序都为  $C > N > Ca > K > P > Mg > Na$ 。

### 3 讨论

叶绿素是植物有机营养的基础。叶绿素 a 和叶绿素 b 是高等植物叶绿体内的重要光合色素, 直接关系到植物的光合同化过程。较高的氮素水平可提高叶片叶绿素含量, 进而增强叶片光合功能, 使可溶性碳水化合物合成也相应增加, 并且, 由于光合酶 RUBPase 常常含有大量的 N, 因此, 叶片 N 含量越高, 叶片的光合作用越强 (Hamerlynck 等, 2004), 本研究中, 两种圆柏叶片氮含量均与叶绿素 a 及叶绿素总含量正相关, 可以看出, 在自然降温过程中, 两树种叶片的 N 素水平降低, 叶绿素含量呈下降趋势, 光合作用逐渐减弱, 最后停止生长进入休眠期, 同时叶片中水分含量也逐渐减少, 导致叶中干物质含量上升; 此后随春季气温回升, 两树种叶片的 N 素水平缓慢升高, 叶绿素含量增加, 光合作用增强, 植物开始解冻恢复生长, 叶片含水量升高, 干物质含量有所下降。

植物营养元素含量的季节变化反映了其一年四季的生长情况和环境因子的变化。祁连圆柏和圆柏叶片 N 和 K 含量的季节变化趋势相似, 相关性分析表明, N 和 K 含量与月均温显著正相关, 两种元素含量的季节变化均为夏、秋季 > 冬、春季。夏季为两种圆柏属植物的生长旺盛期, 秋季为生长末期, 冬季为休眠期, 春季为恢复生长期, 因此夏、秋季为两树种生长和物质积累最多的季节, 主要养分元素 N 和 K 含量较冬、春季高, 这与林睦就等 (1998) 对引种针叶树种矿质元素季节变化的研究结果一致。但是, 两树种叶片 P、Ca、Mg、Na 含量与月均温显著负相关, 也就是说冬、春季两树种叶片 P、Ca、Mg、Na 含量较夏、秋季高, 这可能是它们为增强对低温的抗性而积累营养物质所致。但两树种叶片 P、Ca、Mg、Na 含量的季节趋势方面存在较大差异。相对而言, 祁连圆柏的抗寒能力大于圆柏 (冯自成, 1994)。在低温胁迫下, 植物通过积累有机及无机渗透调节剂以增加细胞的渗透压, 从而提高其抗寒能力 (张石城, 1990)。本研究发现虽然祁连圆柏和圆柏叶片元素总含量仅在春季种间差异性显著, 其余季节差异性不显著, 但都是冬季较夏季有所增加, 而且圆柏增加的幅度没有祁连圆柏增加的幅度大, 可以表明在低温胁迫下, 祁连圆柏能比圆

柏更有效地积累这些无机渗透调节剂以增加细胞的渗透压, 从而提高其抗寒能力。这一点与王文卿 (2001) 对红树植物秋茄和红海榄叶片元素含量及季节动态的研究结果一致。

就元素间的关系而言, 两种圆柏叶片 N 和 K 含量的季节变化趋势基本相同, 祁连圆柏叶片 N 和 K 含量显著正相关, 圆柏叶片 N 和 K 含量正相关但不显著, 这说明圆柏属常绿木本植物叶片积累 N 和 K 是同步的。这与其它针叶树种基本一致。林睦就等 (1998) 对 15 种针叶树种的研究表明, 针叶树种 N、P 和 K 的季节变化模式相似, 尤其是 P 和 K。两树种叶片 P、Na、Mg 含量季节变化趋势相似, 两两元素之间均显示正相关性, 说明圆柏属植物叶片对 P、Na、Mg 这几种元素的积累也是同步的。对大多数植物而言, Na 会对  $K^+$  和  $Ca^{2+}$  的吸收产生不同程度的拮抗作用 (Gramer 等, 1985)。圆柏叶片的 K 和 Na 含量变化趋势相反, 表现出拮抗作用, 但不是很明显, 而在祁连圆柏叶中 K 和 Na 含量变化趋势相似,  $Na^+$  对  $K^+$  的吸收没有产生拮抗作用; 两种圆柏叶片 Na 与 Ca 含量之间存在正相关关系, 也没有表现出拮抗作用。另外, K 与 Na 在祁连圆柏叶中也表现为正相关, 而在圆柏叶中表现为负相关。由此可见, 两树种在叶片元素积累模式上也存在一定的差异。就叶片元素含量的季节变化模式来说, 元素间的关系要复杂得多。

### 参考文献:

- 董鸣. 1996. 陆地生物群落调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 236—238
- 冯自成. 1994. 甘南树木图志 [M]. 兰州: 甘肃科技出版社, 27—34
- 张石城. 1990. 植物的抗寒生理 [M]. 北京: 农业出版社, 36—38
- Arnon DL. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiol*, **24**: 1—15
- Fang YT (方运霆), Mo JM (莫江明), Zhou GY (周国逸), et al. 2005. Minor nutrient element status of plant and soil in a lower subtropical evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Biosphere Reserve (鼎湖山亚热带常绿阔叶林植物和土壤微量元素含量) [J]. *Guihaia* (广西植物), **25**(6): 504—510
- Gramer GR, Lauchi A, Polito VS. 1985. Displacement of  $Ca^{2+}$  by  $Na^+$  from the plasmalemma of root cells [J]. *Plant Physiol*, **79**: 207—211
- Guan BH (关保华), Ge Y (葛滢), Chang J (常杰), et al. 2002. Relationship between elements in the absorption and purification ability of plants in eutrophic water (富营养化水体中植物的元素吸收与净化能力的关系) [J]. *J Zhejiang Univ (Sci)* (浙江大学学报·理学版), **29**(2): 190—197
- Hamerlynck EP, Huxman TE, McAuliffe JR. 2004. Carbon isotope discrimination and foliar nutrient status of *Larrea tridentate* (下转第 399 页 Continue on page 399)

- Rea PA. 1999. MRP subfamily ABC transporters from plants and yeast[J]. *J Exp Bot*, **50**:895—913
- Rea PA, Li ZS, Lu YP, et al. 1998. From vacuolar GS-X pumps to multispecific ABC transporters[J]. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, **49**:727—760
- Rea PA, Sanders D. 1987. Tonoplast energization; two H<sup>+</sup> pumps, one membrane[J]. *Physiol Plant*, **71**:131—141
- Saunders JA, Conn E. 1978. Presence of the cyanogenic glucoside dhurrin in isolated vacuoles from sorghum[J]. *Plant Physiol*, **61**:154—157
- Scott SV, Baba M, Ohsumi Y, et al. 1997. Aminopeptidase I is targeted to the vacuole by a nonclassical vesicular mechanism[J]. *J Cell Biol*, **138**:37—44
- Spelt C, Quattrocchio F, Mol J, et al. 2002. ANTHOCYANIN1 of *Petunia* controls pigment synthesis, vacuolar pH, and seed coat development by genetically distinct mechanisms[J]. *Plant Cell*, **14**:2 121—2 135
- Springob K, Nakajima J, Yamazaki M, et al. 2003. Recent advances in the biosynthesis and accumulation of anthocyanins[J]. *Nat Prod Rep*, **20**:288—303
- Sze H, Li H, Palmgren M. 1999. Energization of plant cell membranes by H<sup>+</sup>-pumping ATPases; regulation and biosynthesis[J]. *Plant Cell*, **11**:677—689
- Wagner GJ. 1979. Content and vacuole/extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts[J]. *Plant Physiol*, **64**:88—93
- Wagner GJ, Hrazdina G. 1984. Endoplasmic reticulum as a site of phenylpropanoid and flavonoid metabolism in *Hippeastrum*[J]. *Plant Physiol*, **74**:901—906
- Wink M. 1997. Compartmentation of secondary metabolites and xenobiotics in plant vacuoles[C]//Leigh RA, Sanders D, Callow JA. The Plant Vacuole; Advances in Botanical Research, Vol 25[C]. London: Academic Press, 141—170
- Winkel-Shirley B. 1999. Evidence of enzyme complexes in the phenylpropanoid and flavonoid pathways[J]. *Physiol Plant*, **107**:142—149
- Winkel-Shirley B. 2001. Flavonoid biosynthesis. A colorful model for genetics, biochemistry, cell biology, and biotechnology[J]. *Plant Physiol*, **126**:485—493
- Xu W, Shioiri H, Kojima M, et al. 2001. Primary structure and expression of a 24-kD vacuolar protein (VP24) precursor in anthocyanin-producing cells of sweet potato in suspension culture[J]. *Plant Physiol*, **125**:447—455
- Zhao CL, Guo WM, Chen JY. 2003. Biochemical and molecular biological mechanism of the expression of the flower color of higher plant and its ameliorating by gene engineering[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, **23**:1 024—1 035(In Chinese)
- Zhen RG, Kim EJ, Rea PA. 1997. The molecular and biochemical basis of pyrophosphatase-energized proton translocation at the vacuolar membrane[C]//Leigh RA, Sanders D, Callow JA. The Plant Vacuole; Advances in Botanical Research, Vol 25. London: Academic Press, 297—337
- Zobel A. 1986. Localization of phenolic compounds in tanninsecreting cells from *Sambucus racemosa* shoots[J]. *Ann Bot*, **57**:801—810

( 上接第 320 页 Continue from page 320 )

- (creosote bush) in contrasting Mojave Desert soils[J]. *Oecologia*, **138**:210—215
- Harvey PH, Stenning MJ, Campbell B. 1985. Individual variation in seasonal breeding success of *Pied Flycatchers* (*Ficedula hypoleuca*)[J]. *J Animal Ecol*, **54**:391—398
- Hou AM(侯爱敏), Peng SL(彭少麟), Zhou GY(周国逸). 2002. Concentrations and correlation of eight important elements in the annual rings of *Pinus massoniana* in Dinghushan, Guangdong(广东鼎湖山马尾松年轮元素含量及其相关性研究)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **21**(1):6—9
- Huntington TG, Hooper RP, Johnson CE, et al. 2000. Calcium depletion in a southeastern United States forest ecosystem[J]. *Soil Sci Soc Am J*, **64**:1 845—1 858
- Jiang H(江洪), Zhang ZH(张朝晖). 2007. Mensuration and correlating analyse of heavy metal elements in three mosses and soil from Lao Wanchang Lateritic Gold Deposit in Qinglong, Guizhou(贵州晴隆老万场红土型金矿三种藓类植物及其土壤基质的重金属元素测定及相关性分析)[J]. *Guihaia*(广西植物), **27**(4): 610—615
- Liang SC(梁士楚), Li RT(李瑞棠), Liang FY(梁发英). 1996. A preliminary study on mineral element contents in mangrove seedlings at Yingluo Bay in Guangxi(广西英罗湾红树植物幼苗矿质元素含量初步研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **16**(4):363—366
- Lin MJ(林睦就), Xue P(薛萍), Zhang YY(张云跃), et al. 1998. A comparison study on nutrient concentrations and seasonal dynamics in needles of 15 introduced conifers(引种针叶树种矿质元素浓度及季节变化的比较研究)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学), **34**(5):21—28
- Liu JX(刘菊秀), Zhou GY(周国逸). 2005. Effects of cumulative acidification of soil on element transfer in *Pinus massoniana* Lamb. forest at Dinghushan(土壤累积酸化对鼎湖山马尾松林物质元素迁移规律的影响)[J]. *J Zhejiang Univ(Agric & Life Sci)*(浙江大学学报·农业与生命科学版), **31**(4):381—391
- Pang J(庞静), Zhu JG(朱建国), Xie ZB(谢祖彬), et al. 2005. Effects of elevated pCO<sub>2</sub> on nutrient uptake by rice and nutrient contents in rice grain(自由空气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对水稻营养元素吸收和籽粒中营养元素含量的影响)[J]. *Chin J Rice Sci*(中国水稻科学), **19**(4):350—354
- Wang CC(王春春), Shen ZG(沈振国). 2001. Uptake of Cd by three species of plants and responses of mung bean to Cd toxicity (镉在植物体内的积累及其对绿豆幼苗生长的影响)[J]. *J Nanjing Agric Univ*(南京农业大学学报), **24**(4):9—13
- Wang WQ(王文卿), Lin P(林鹏). 2001. Comparative study on seasonal changes in element concentrations in leaves of *Kandelia candel* and *Rhizophora stylosa* at Jiulongjiang estuary(红树植物秋茄和红海榄叶片元素含量及季节动态的比较研究)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **21**(8):1 233—1 238