

网络出版时间:2014-07-30 16:13 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.09.005  
网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.09.005.html>

# 四川 5 种杉科植物的核型分析

马诗钰,周兰英,熊海燕,蒲光兰,刘 焕,蔡利娟

(四川农业大学 林学院,四川 雅安 625014)

**[摘要]** 【目的】对杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)、柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr)、日本柳杉(*Cryptomeria japonica* (Linn. f.) D. Don)、池杉(*Taxodium ascendens* Brongn)和落羽杉(*Taxodium distichum* (Linn.) Rich)染色体核型进行分析,并对它们的种间亲缘关系和进化趋势进行探讨,旨在为该科植物进化及分类提供细胞遗传学资料。【方法】采用常规压片法,运用 AI 细胞遗传工作站系统对 5 种杉科植物的染色体及核型进行研究。【结果】杉木核型公式为:2n=2x=22=20m (2SAT)+2sm,核型类型属于 2B 型;柳杉和日本柳杉的核型公式为:2n=2x=22=20m+2sm,核型类型属于 2A 型;池杉和落羽杉核型公式为:2n=2x=22=22m,核型类型属于 1A 型。平均臂比值差异不大,为 1.20~1.31;核型不对称系数变化较小,为 54.24%~55.57%;最长/最短染色体值为 1.36~2.18。柳杉与日本柳杉的亲缘关系较近,池杉与落羽杉的亲缘关系较近,可分为 3 组:杉木、柳杉和日本柳杉、池杉和落羽杉。进化顺序为杉木>柳杉>日本柳杉>池杉>落羽杉。【结论】杉科植物总体进化程度相对原始,进化速度缓慢,但种间存在广泛变异,以杉木的核型进化程度最高。

**[关键词]** 杉科;核型分析;进化趋势;亲缘关系;四川省

**[中图分类号]** S791

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2014)09-0063-07

## Karyotypes of five Taxodiaceae species in Sichuan

MA Shi-yu, ZHOU Lan-ying, XIONG Hai-yan,

PU Guang-lan, LIU Huan, Cai Li-juan

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

**Abstract:** 【Objective】This study analyzed the karyotypes of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook), *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr, *Cryptomeria japonica* (Linn. f.) D. Don, *Taxodium ascendens* Brongn and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich, and investigated the genetic relationship and evolution trend to provide cytogenetical information for plant evolution and classification. 【Method】Traditional squashing method and cytogenetic workstation system were used to study the karyotypes of five *Taxodiaceae* species. 【Result】The karyotype formula of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook was: 2n=2x=22=20m (2SAT)+2sm, belonging to class 2B. The karyotype formula of *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr and *Cryptomeria japonica* (Linn. f.) D. Don was: 2n=2x=22=20m+2sm, belonging to 2A. The karyotype formula of *T. ascendens* and *T. distichum* was: 2n=2x=22=20m, belonging to 1A. Average arm ratios were 1.20—1.31 with minor differences. Karyotype asymmetry coefficients ranged from 54.24%—55.57% with small variations. The ratios of the longest chromosome to the shortest chromosome were 1.36—2.18. *Taxodiaceae*, *C. fortunei* and *C. japonica* were close, while *Taxodium ascendens* Brongn and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich were close according to genetic relation-

**[收稿日期]** 2013-06-24

**[作者简介]** 马诗钰(1989—),女,四川阆中人,在读硕士,主要从事松杉植物育种研究。E-mail: melishery1989@163.com

**[通信作者]** 周兰英(1960—),女,四川西昌人,教授,博士生导师,主要从事园林植物及林木遗传育种研究。

E-mail: kelin1234@sina.com

ship. The five species were divided into 3 categories: *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook by itself, *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr and *Cryptomeria japonica* (Linn. f.) D. Don, and *Taxodium ascendens* Brongn and *Taxodium distichum* (Linn.) Rich. The evolutionary tendency was in an order of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook > *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr > *Cryptomeria japonica* (Linn. f.) D. Don > *Taxodium ascendens* Brongn > *Taxodium distichum* (Linn.) Rich.

【Conclusion】 Taxodiaceae species were in relatively primitive evolutionary degree and the evolution was slowly. There were wide-ranging variations between species and the karyotype of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook had the highest evolutionary degree.

**Key words:** Taxodiaceae; karyotype; evolutionary trend; genetic relationship; Sichuan

杉科(Taxodiaceae)隶属于裸子植物门(Gymnospermae)松杉纲(Coniferopsida)松杉目(Pinales),科下含10属16种,主要分布于东亚、北美及大洋洲。中国产5属7种,引入栽培4属7种,现存各属均为古老的孑遗类群<sup>[1-2]</sup>。从1890年正式创立杉科至今,关于该科植物种、亚种、变种分类及亲缘关系一直存在分歧。1890—1926年,松杉科植物分类争议最大,各学者对族、亚族、属的分类意见均不统一。1926年,Pilger对裸子植物进行系统整理,结束了杉科分类混乱的局面,为后继学者的研究奠定了基础。在后续发展中,杉科分类问题依旧存在,焦点多集中在杉木、落羽杉、柳杉等族、亚族或组等问题上。如Hida<sup>[3]</sup>认为,杉木、柳杉、落羽杉各自成为一个亚科,并包含相应属。而Price等<sup>[4]</sup>认为,应在科下分组,且柳杉属与落羽杉属、水松属为一组,不涉及杉木。此外,对不同属间及同属不同植物分类的分歧也广泛存在<sup>[5-7]</sup>。

分类学并不单独以某一种水平上的依据解决植物分类问题<sup>[8]</sup>。近年来,随着科技水平的不断发展,关于杉科植物形态结构<sup>[9]</sup>、孢粉学<sup>[10]</sup>、系统发生学<sup>[5,7]</sup>及分子水平<sup>[11-13]</sup>等研究内容不断完善,从不同

角度为分类提供了辅助依据。在细胞染色体水平上,有关杉科植物的核型虽已有部分报道<sup>[14-18]</sup>,但仍缺乏对杉科染色体核型及亲缘关系、进化程度的探讨,且已有研究多集中在20世纪80年代,这些研究均采用手工配对分析染色体,误差较大,在一定程度上影响了核型分析的准确性<sup>[19]</sup>。本研究运用AI细胞遗传工作系统对5种杉科植物核型进行了全面分析,探讨适合的取材时间、制片技术等,以期为该杉科植物染色体制片技术的优化提供依据;且通过核型研究,为该科植物染色体图像分析数据库的建立、杉科演化过程等提供部分细胞学证据,并进一步为杉科遗传资源保护、遗传育种(倍性育种等)提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用的5种杉科植物分别为杉木、柳杉、日本柳杉、池杉和落羽杉,产地见表1。采集方法为:在林地中随机抽取30株长势良好的植株,于树冠中上部东、西、南、北4个方位上分别采集1个球果(4个/株),种子取出后混匀备用。

表1 四川5种杉科植物材料的来源

Table 1 Sources of 5 Taxodiaceae species in Sichuan

中文种名 Chinese name	属名 Generic name	拉丁名 Latin name	来源 Origin
杉木	杉木属 <i>Cunninghamia</i>	<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook	四川洪雅林场 Forestry Centre of Hongya
柳杉	柳杉属 <i>Cryptomeria</i>	<i>Cryptomeria fortunei</i> Hooibrenk ex Otto et Dietr	四川农业大学 Sichuan Agricultural University
日本柳杉	柳杉属 <i>Cryptomeria</i>	<i>Cryptomeria japonica</i> (Linn. f.) D. Don	四川洪雅林场 Forestry Centre of Hongya
池杉	落羽杉属 <i>Taxodium</i>	<i>Taxodium ascendens</i> Brongn	四川林红苗业 Nursery Garden of Linhong
落羽杉	落羽杉属 <i>Taxodium</i>	<i>Taxodium distichum</i> (Linn.) Rich	四川林红苗业 Nursery Garden of Linhong

### 1.2 试验方法

选取饱满种子于25℃人工气候箱中培养,待幼根长至0.5~1.0 cm时取样。采用常规压片法进行染色体制片,上午08:00—10:00切取生长旺盛的根尖作试验材料,用质量分数0.2%秋水仙素和0.002

mol/L 8-羟基喹啉体积比为1:1的混合液于室温下处理6~8 h,以卡诺氏I液(V(无水乙醇):V(冰醋酸)=3:1)为固定液于4℃冰箱中固定24 h,1 mol/L HCl 60℃水浴条件下解离6~8 min,改良苯酚品红染液染色及压片。用Nikon55i显微镜观察,

用AI Cytovision软件对中期相细胞进行显微拍照和保存。

### 1.3 数据处理与分析

本试验中,5种材料均统计30个以上的合格细胞,以超过85%细胞具有的相同染色体数,作为该种植物的染色体数目<sup>[20]</sup>;每种植物均取5个以上染色体分散良好、染色体纵向收缩程度较为一致以及缢痕区清晰的中期相照片进行核型分析,所有核型参数均以5张照片测量结果的平均值为分析数据。用Image Pro Plus软件测量染色体的全长、臂长(具随体的染色体将随体长度计算在内);参照李懋学等<sup>[20]</sup>的方法,计算平均臂比、核型不对称系数、最长/最短染色体、着丝点指数均值;依据染色体分类

系统标准<sup>[21]</sup>确定染色体类型,并得出核型公式;参照Stebbins<sup>[22]</sup>的核型分类标准确定核型类型;染色体相对长度系数按Kuo等<sup>[23]</sup>的方法计算并命名。根据染色体核型参数及形态特征,用AI Cytovision软件进行同源染色体配对,用Excel 2003软件将各种植物的染色体测量数据进行汇总,分别以最长/最短染色体值、平均臂比为纵坐标和横坐标,绘制5种杉科植物的核型不对称性程度散布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 5种杉科植物的核型

5种植物的核型参数、核型特征分别见表2和表3。染色体形态、核型及核型模式见图1。

表2 四川5种杉科植物的核型参数

Table 2 Karyotype parameters of five Taxodiaceae species

种名 Species	染色体序号 No.	平均相对长度/% Relative length			平均臂比 Arm ratio	染色体相对长度系数 Coefficient of relative length		染色体 类型 Type
		短臂 Short arm	长臂 Long arm	全长 Total length		计算值 Value	名称 Name	
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook	1	6.24	7.11	13.35	1.14	1.47	M2	m
	2	5.62	6.11	11.73	1.09	1.29	M2	m
	3	4.93	6.01	10.94	1.22	1.20	M2	m
	4*	4.62	6.19	10.81	1.34	1.19	M2	m
	5	4.20	4.68	8.88	1.11	0.98	M1	m
	6	3.51	5.16	8.67	1.47	0.95	M1	m
	7	3.95	4.21	8.16	1.07	0.90	M1	m
	8	3.46	4.32	7.78	1.25	0.86	M1	m
	9	3.37	3.70	7.07	1.10	0.78	M1	m
	10	2.10	4.38	6.48	2.08	0.71	S	sm
	11	2.42	3.70	6.12	1.53	0.67	S	m
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i> Hooibrenk ex Otto et Dietr	1	5.88	6.16	12.04	1.05	1.32	M2	m
	2	4.99	5.53	10.52	1.11	1.16	M2	m
	3	4.23	5.79	10.02	1.37	1.10	M2	m
	4	4.45	4.76	9.21	1.07	1.01	M2	m
	5	3.87	5.10	8.97	1.32	0.99	M1	m
	6	3.37	5.40	8.77	1.60	0.96	M1	m
	7	4.25	4.37	8.62	1.03	0.95	M1	m
	8	3.97	4.46	8.43	1.12	0.93	M1	m
	9	3.73	4.18	7.91	1.12	0.87	M1	m
	10	3.87	3.97	7.84	1.02	0.86	M1	m
	11	2.18	5.50	7.68	2.53	0.84	M1	sm
日本柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i> (Linn. f.) D. Don	1	5.32	5.65	10.97	1.06	1.21	M2	m
	2	5.19	5.49	10.68	1.06	1.18	M2	m
	3	5.06	5.38	10.44	1.06	1.15	M2	m
	4	4.63	4.88	9.51	1.05	1.14	M2	m
	5	4.16	4.84	9.00	1.16	1.05	M2	m
	6	3.93	4.61	8.54	1.17	0.94	M1	m
	7	4.07	4.42	8.49	1.09	0.93	M1	m
	8	3.78	4.55	8.33	1.20	0.92	M1	m
	9	2.46	5.80	8.26	2.36	0.91	M1	sm
	10	3.71	4.17	7.88	1.12	0.87	M1	m
	11	2.89	4.98	7.87	1.72	0.87	M1	m

续表 2 Continued table 2

种名 Species	染色体序号 No.	平均相对长度/% Relative length			平均臂比 Arm ratio	染色体相对长度系数 Coefficient of relative length		染色体 类型 Type
		短臂 Short arm	长臂 Long arm	全长 Total length		计算值 Value	名称 Name	
池杉 <i>Taxodium ascendens</i> Brongn	1	5.50	5.93	11.43	1.08	1.26	M2	m
	2	5.11	5.51	10.62	1.08	1.17	M2	m
	3	4.34	5.99	10.33	1.38	1.08	M2	m
	4	4.74	5.12	9.86	1.08	1.05	M2	m
	5	3.04	5.99	9.03	1.97	0.99	M1	m
	6	4.09	4.86	8.95	1.19	0.99	M1	m
	7	4.05	4.73	8.78	1.17	0.97	M1	m
	8	3.73	4.78	8.51	1.28	0.94	M1	m
	9	4.07	4.29	8.36	1.05	0.92	M1	m
	10	3.37	4.44	7.81	1.31	0.86	M1	m
	11	3.44	3.65	7.09	1.06	0.78	M1	m
落羽杉 <i>Taxodium distichum</i> (Linn.) Rich	1	4.74	6.15	10.89	1.30	1.20	M2	m
	2	5.04	5.31	10.35	1.05	1.14	M2	m
	3	4.41	5.48	9.89	1.24	1.09	M2	m
	4	4.49	4.92	9.41	1.10	1.04	M2	m
	5	3.69	5.43	9.12	1.47	1.00	M1	m
	6	4.34	4.63	8.97	1.07	0.99	M1	m
	7	4.31	4.39	8.70	1.02	0.96	M1	m
	8	3.46	4.85	8.31	1.40	0.91	M1	m
	9	3.87	4.43	8.30	1.14	0.91	M1	m
	10	3.97	4.08	8.05	1.03	0.88	M1	m
	11	3.44	4.56	8.00	1.32	0.88	M1	m

注: \* 示随体染色体, 随体长度计算在内。

Note: \* indicates chromosome with satellite, and the length of satellite was included.

由表 2 和表 3 以及图 1 可知, 5 种杉科植物的染色体数目均为  $2n=2x=22$ ; 杉木核型公式为  $2n=2x=22=20m(2SAT)+2sm$ , 柳杉和日本柳杉的核型公式为:  $2n=2x=22=20m+2sm$ , 池杉和落羽杉的核型公式为:  $2n=2x=22=22m$ , 均为 2 倍体。染色体主要由近中部(sm)和中部着丝点染色体(m)组成, 近中部着丝点染色体(sm)有杉木 10 号、柳杉 11 号、日本柳杉 9 号染色体, 其余均为中部着丝点染色体(m), 随体仅出现在杉木 4 号染色体上。核型不

对称系数变化较小, 为 54.24%~55.57%, 说明 5 种植物均为较原始类型; 平均臂比值差异不大, 为 1.20~1.31; 最长/最短染色体值为 1.36~2.18; 柳杉、日本柳杉、池杉、落羽杉的染色体相对长度组成中只有 M1 和 M2, 无 L 和 S; 杉木的染色体相对组成中包含 M1、M2 和 S, 无 L。按核型分类标准<sup>[22]</sup>, 5 种植物被分为 3 类: 杉木为 2B 型, 柳杉和日本柳杉均为 2A 型, 池杉和落羽杉均为 1A 型。

表 3 四川 5 种杉科植物的核型特征

Table 3 Comparison of karyotype features of five Taxodiaceae species in Sichuan

种名 Species	核型公式 Formula	核型不对称系数/% As. k.	平均臂比 Mean arm ratio	最长/最短染色体 Longest/shortest chromosome	相对长度组成 Relative length	核型类型 Chromosome type
杉木 <i>C. lanceolata</i>	20m (2SAT)+2sm	55.57	1.31	2.18	8M2+10M1+4S	2B
柳杉 <i>C. fortunei</i>	20m+2sm	55.21	1.30	1.57	8M2+14M1	2A
日本柳杉 <i>C. japonica</i>	20m+2sm	54.78	1.28	1.39	10M2+12M1	2A
池杉 <i>T. ascendens</i>	22m	54.52	1.24	1.61	8M2+14M1	1A
落羽杉 <i>T. distichum</i>	22m	54.24	1.20	1.36	8M2+14M1	1A

## 2.2 5 种杉科植物核型的不对称程度

图 2 中, 坐标点的相对位置反映了 5 种杉科植物的不对称性、进化程度及其相互之间的关系, 植物坐标点越靠近左下方, 表明其核型的不对称性越低,

种越原始, 种的进化程度也相对越低; 相反, 越靠近右上方, 其核型的不对称性越高, 种的进化程度越高<sup>[22]</sup>。由图 2 和表 3 可知, 5 种杉科植物的核型不对称性系数依次为: 落羽杉 (54.24%) < 池杉

(54.52%)<日本柳杉(54.78%)<柳杉(55.21%)<杉木(55.57%),说明杉木的进化程度最高,柳杉和日本柳杉的进化程度较低,池杉和落羽杉的进化

程度最低,进化程度由高到低顺序为杉木>柳杉>日本柳杉>池杉>落羽杉。

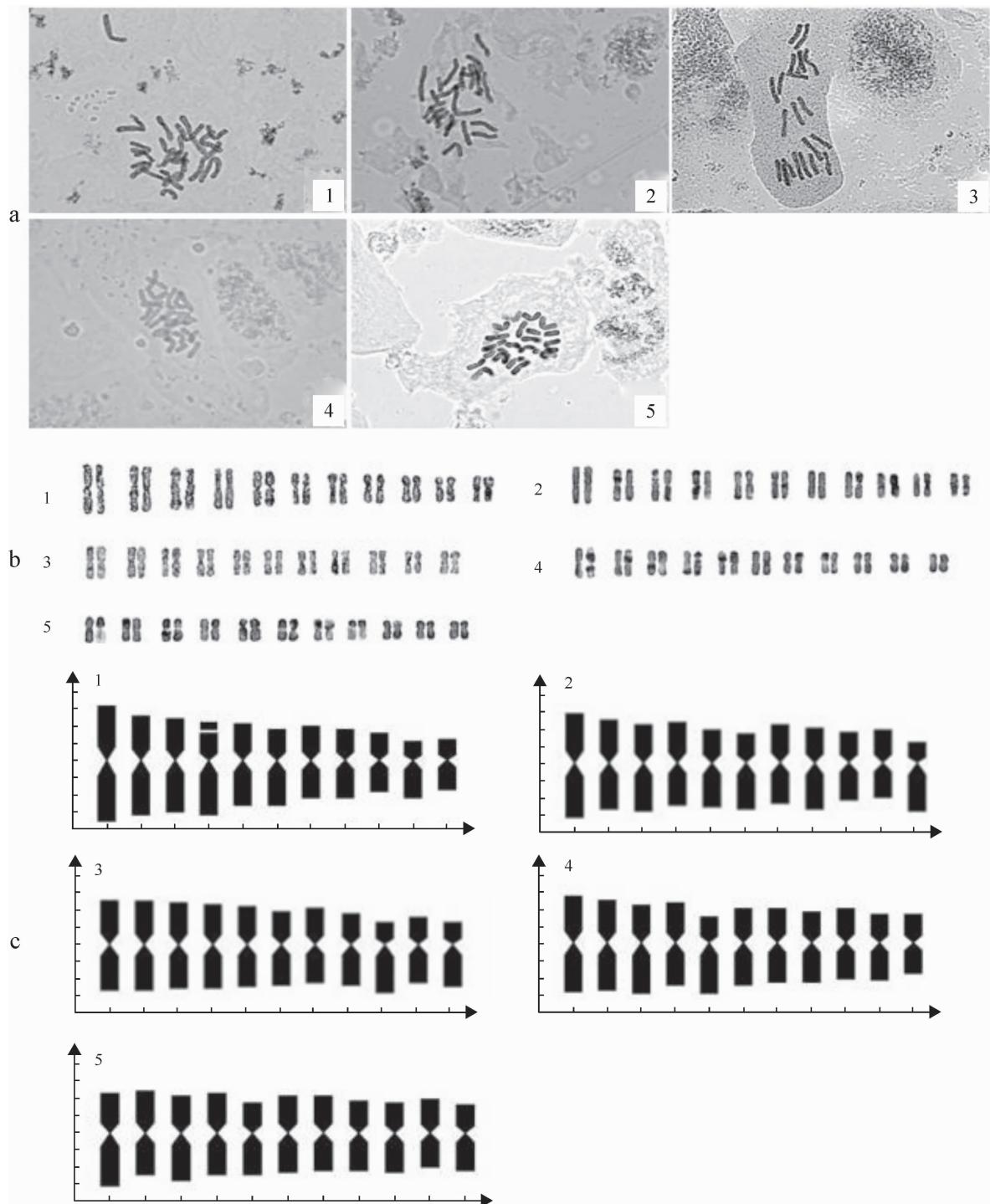


图1 四川5种杉科植物的染色体形态(a,100×)、核型(b)及核型模式(c)

1. 杉木;2. 柳杉;3. 日本柳杉;4. 池杉;5. 落羽杉

Fig. 1 Chromosome (a,100×),karyotype (b),and karyotype mode (c) of five Taxodiaceae species in Sichuan

1. *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook;2. *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr;

3. *Cryptomeria japonica* (Linn. f.) D. Don;4. *Taxodium ascendens* Brongn.;5. *Taxodium distichum* (Linn.) Rich

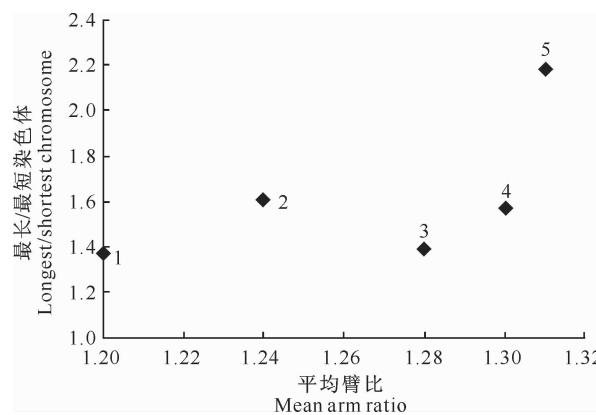


图 2 四川 5 种杉科植物的核型不对称性程度散布图

1. 落羽杉; 2. 池杉; 3. 日本柳杉; 4. 柳杉; 5. 杉木

Fig. 2 Karyotype asymmetry degrees of five Taxodiaceae species in Sichuan

1. *Taxodium distichum* (Linn.) Rich; 2. *Taxodium ascendens* Brongn.; 3. *Cryptomeria japonica* (Linn. f.) D. Don; 4. *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr.; 5. *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook

### 3 讨论与结论

#### 3.1 5 种杉科植物的核型

本研究中, 杉科 5 种植物染色体数目均为 22 条, 核型公式与已报道研究结果<sup>[14-18]</sup>基本一致, 但着丝点位置、随体位置及有无、B 染色体、非整倍性变异等现象存在差异, 这表明植物的核型在种间具有丰富的多样性<sup>[24]</sup>。本试验结果表明, 仅杉木 4 号染色体上具随体, 其余 4 种植物所有染色体上均无随体; 池杉( $2n=2x=22m$ )与落羽杉( $2n=2x=22m$ )所有染色体的着丝点均位于染色体中部; 5 种杉科植物均为二倍体且没有 B 染色体, 这与前人的部分研究结果<sup>[8,25-26]</sup>一致, 但也存在差异<sup>[13-15,18,27-28]</sup>。随体是由染色体不等臂间发生倒位或不等相互异位造成的, 一定程度上反映了物种的进化程度<sup>[29-30]</sup>。供试 5 种杉科植物染色体相对较稳定, 总体进化程度相对较原始, 虽然进化速度相对缓慢, 但内部细微变异一直存在, 这与 Groth 等<sup>[31]</sup>的观点一致。有关染色体着丝点位置确定的研究结果表明: 当染色体形态各异, 且其出现折叠或扭曲时, 人工分析可能会影响分析结果<sup>[32]</sup>, 本试验采用 AI 细胞遗传工作系统分析染色体具有可靠性。B 染色体是正常染色体之外的 1 条染色体, 是发生结构变异的证据, 在不同生境条件下, 植物为适应环境易发生染色体结构和倍性变异, 而 B 染色体多出现于克服了不利环境的影响且生长在高海拔条件下的植物中<sup>[29]</sup>, 这表明同一

物种经过不同环境驯化后会形成不同程度的进化和变异。因此, 对不同生境同一物种的核型分析可以增加遗传多样性几率, 为分类学提供更广泛的依据。本试验不足之处在于没有分析不同种源地该科所有植物, 后续研究可以选取多个材料, 以对比不同生境中植物发生不定向变异的程度。

#### 3.2 5 种杉科植物的进化趋势及亲缘关系

植物核型进化的基本趋势是由对称向不对称发展, 系统演化上处于比较古老或原始的植物, 大多具有较对称的核型, 而不对称的核型则主要见于衍生的、特化的以及比较进化的植物类群中<sup>[22]</sup>。染色体特征是细胞分类学的重要指标, 种属间、种内及品种间染色体特征常出现不同程度分化<sup>[33]</sup>, 在此水平上检测种间遗传变异程度以及推断亲缘进化关系具有一定的科学依据。本试验中, 平均臂比值由大到小顺序为杉木>柳杉>日本柳杉>池杉>落羽杉; 最长/最短染色体平均值由大到小顺序为杉木>池杉>柳杉>日本柳杉>落羽杉。核型不对称系数值由大到小顺序为杉木(55.57%)>柳杉(55.21%)>日本柳杉(54.78%)>池杉(54.52%)>落羽杉(54.24%), 杉木核型不对称程度最高, 相对最为进化; 落羽杉的核型不对称程度最低, 相对最为原始; 柳杉与日本柳杉的进化程度相近, 柳杉较日本柳杉进化程度高, 且两者明显比池杉进化程度高。此结果与于永福<sup>[34]</sup>的研究结果存在差异, 虽然其并未给出不同属间植株具体进化顺序, 但对杉科各属间的进化顺序排列为杉木属>落羽杉属>柳杉属。

#### [参考文献]

- [1] 于永福. 杉科(Taxodiaceae)植物的系统发育、分类和地理分布 [D]. 北京: 中国科学院植物所, 1993.
- [2] Yu Y F. Phylogeny, systematic taxonomy and geographical distribution of Taxodiaceae [D]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 1993. (in Chinese)
- [3] 郑万钧, 傅立国. 中国植物志: 第 7 卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 280-281.
- [4] Zheng W J, Fu L G. Floral of China, Vol. 7 [M]. Beijing: Science Press, 1978: 280-281. (in Chinese)
- [5] Hida M. The systematic position of *Metasequoia* [J]. Botanical Magazyne, 1962, 75: 316-323.
- [6] Price R A, Lowenstein J M. An immunological comparison of the Sciadopityaceae, Taxodiaceae and Cupressaceae [J]. Systematic Botany, 1989, 14(2): 141-149.
- [7] Juno K, Yoshihiko T, Hiroshi Y, et al. Phylogenetic relationships in Taxodiaceae and Cupressaceae sensu stricto based on *matK* gene, *chlL* gene, *trnL-trnF* IGS region, and *trnL* intron sequences [J]. American Journal of Botany, 2000, 87 (10):

- 1480-1488.
- [6] Keiya I, Tim B, Susumu S. Hybrid origin of *Athrotaxis laxifolia* (Taxodiaceae) confirmed by random amplified polymorphic DNA analysis [J]. Australian Journal of Botany, 2000, 48(6): 753-757.
- [7] Ma J S, Kerry B C. A review of the typification of *Metasquoia glyptostroboides* (Taxodiaceae) [J]. Taxon, 2005, 54(2): 475-476.
- [8] 李林初. 杉科的细胞分类学和系统演化研究 [J]. 云南植物研究, 1989, 11(2): 113-131.  
Li L C. Studies on the cytobotany and systematic evolution of Taxodiaceae [J]. Acta Botanica Yunnanica, 1989, 11(2): 113-131. (in Chinese)
- [9] 马清温. 杉科(Taxodiaceae)植物的表皮结构及其气孔参数分析 [D]. 北京:北京林业大学, 2005.  
Ma Q W. Leaf epidermal structure and stomatal parameters of the genus *Taxodium* (Taxodiaceae) [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [10] Uehara K, Sahashi N. Pollen wall development in *cryptomeria japonica* (Taxodiaceae) [J]. Grana, 2000, 39(6): 267-274.
- [11] Min Y C, Shuo Y, Liu M, et al. Isolation and characterization of polymorphic microsatellite markers in *Metasequoia glyptostroboides* (Taxodiaceae) [J]. Conservation Genetics Resources, 2010, 2(1): 19-23.
- [12] Mitsue F, Norihiro F, Yuzuru M, et al. Ancestral MADS box genes in Sugi, *Cryptomeria japonica* D. Don (Taxodiaceae), homologous to the B function genes in angiosperms [J]. Plant and cell physiology, 2011, 42(6): 566-571.
- [13] 徐进. 杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)分子细胞遗传学研究 [D]. 南京:南京林业大学, 2006.  
Xu J. Molecular cytogenetic study on Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2006. (in Chinese)
- [14] Toda Y. On the karyotype of *Cryptomeria japonica* D. Don: V. *Cryptomeria japonica* D. Don in Kyushu (1) [J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1980, 62(7): 264-269.
- [15] 黄少甫,徐炳声. 池杉染色体核型的分析 [J]. 广西植物, 1984, 4(4): 281-284.  
Huang S F, Xu B S. Karyotype analysis of *Taxodium ascendens* brongn [J]. Guihaia, 1984, 4(4): 281-284. (in Chinese)
- [16] 李林初,徐炳声. 柳杉染色体核型的研究 [J]. 林业科学, 1984, 20(3): 323-326.  
Li L C, Xu B S. A study on the karyotype analysis of *Cryptomaria Fortunei* Hooibrenk [J]. Science Silvae Sinicae, 1984, 20(3): 323-326. (in Chinese)
- [17] 韩一凡,杨自湘,佟永昌,等. 杉木地理种源核型的研究 [J]. 林业科学, 1984, 20(2): 113-121.  
Han Y F, Yang Z X, Tong Y C, et al. Studies on the karyotype of geographical provenance of *Cunninghamia Lanceolata* [J]. Science Silvae Sinicae, 1984, 20(2): 113-121. (in Chinese)
- [18] 李林初. 落羽杉属植物的核型及细胞地理学研究 [J]. 植物分类学报, 1989, 26(5): 371-377.
- Li L C. The studies on the karyotypes and cytogeography of *Taxodium Rich* (Taxodiaceae) [J]. Journal of Systematics and Evolution, 1989, 26(5): 371-377. (in Chinese)
- [19] 同素丽,安玉麟,孙瑞芬,等. 染色体核型分析及染色体显微分离技术研究进展 [J]. 生物技术通报, 2008(4): 70-74.  
Yan S L, An Y L, Sun R F, et al. Research progress of karyotype analysis and chromosome micro-dissection technology [J]. Biotechnology Bulletin, 2008(4): 70-74. (in Chinese)
- [20] 李懋学,陈瑞阳. 关于植物核型分析的标准化问题 [J]. 武汉植物学研究, 1985, 3(4): 297-298.  
Li M X, Chen R Y. A suggestion on the standardization of karyotype analysis in plants [J]. Journal of WuHan Botanical Research, 1985, 3(4): 297-298. (in Chinese)
- [21] Levan A, Fredga K, Sandberg A A. Nomenclature for centromeric position on chromosomes [J]. Hereditas, 1964, 52(2): 201-220.
- [22] Stebbins G L. Chromosomal evolution in higher plants [M]. London: Edward Arnold Ltd, 1971: 85-104.
- [23] Kuo S R, Wang T T, Huang T C. Karyotype analysis of some Formosan gymnosperms [J]. Taiwania, International Journal of Life Sciences, 1972, 17(1): 66-80.
- [24] 王一峰,高素芳,巩红冬,等. 青藏高原东缘高寒草甸风毛菊属4个优势种的核型研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(1): 199-203.  
Wang Y F, Gao S F, Gong H D, et al. On karyotypes of four species of *Saussurea* DC. in the east of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2007, 35(1): 199-203. (in Chinese)
- [25] 李林初. 池杉的染色体 [J]. 自然杂志, 1988, 11(1): 72-73.  
Li L C. Chromosome of *Taxodium ascendens* Brongn [J]. Chinese Journal of Nature, 1988, 11(1): 72-73. (in Chinese)
- [26] Schlarbaum S E, Johnson L C, Tsuchiya T. Chromosome studies of *Metasequoia glyptostroboides* and *Taxodium distichum* [J]. Botanical Gazette, 1983, 144(4): 559-565.
- [27] 淑香香,施季森,刘晓健. 两种预处理方法对杉木核型的影响 [J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2001, 25(1): 23-26.  
Fu X X, Shi J S, Liu X J. A study on karyotype of Chinese fir with improved methods of preparing metaphase chromosomes spread [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science, 2001, 25(1): 23-26. (in Chinese)
- [28] 陈维新,叶志云. 广西杉木两类型染色体核型初步研究 [J]. 广西植物, 1985, 5(4): 373-376.  
Chen W X, Ye Z Y. Preliminary study on karyotypes of cultivars of *Cunninghamia Lanceolata* from Guangxi [J]. Guihaia, 1985, 5(4): 373-376. (in Chinese)
- [29] 万娟,周颂东,高云东,等. 豹子花属及百合属13种25居群的核型研究 [J]. 植物分类与资源学报, 2011, 33(5): 477-494.  
Wan J, Zhou S D, Gao Y D, et al. Karyotypes of twenty-five populations of thirteen species in *Nomocharis* and *Lilium* [J]. Plant Diversity and Resources, 2011, 33(5): 477-494. (in Chinese)

- 的萌芽更新规律 [J]. 林业科学, 2005, 41(6): 72-77.
- Li J W, Nie S Q, An B H. Stump sprouting of the main broad-leaved tree species of secondary forest in eastern area of northeast China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(6): 72-77. (in Chinese)
- [20] Lockhart B R, Chambers J L. Cherrybark oak stump sprout survival and development five years following plantation thinning in the lower Mississippi alluvial valley, USA [J]. New Forests, 2007, 33: 183-192.
- [21] Johansson T. Sprouting ability and biomass production of downy and silver birch stumps of different diameters [J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32: 944-951.
- [22] 李景文, 刘世英, 王清海, 等. 三江平原低山丘陵区水曲柳无性更新研究 [J]. 植物研究, 2000, 20(2): 215-220.
- Li J W, Liu S Y, Wang Q H, et al. Study of *Fraxinus mandshurica* asexual regeneration in the hills area of Sanjiang plain [J]. Bulletin of Botanical Research, 2000, 20(2): 215-220. (in Chinese)
- [23] Khan M L, Tripathi R S. Tree regeneration in a disturbed subtropical wet hill forest of north-east India: Effect of stump diameter and height on sprouting of four tree species [J]. Forest Ecology and Management, 1986, 17: 199-209.
- [24] Randall C K, Duryea M L, Vince S W, et al. Factors influencing stump sprouting by pondcypress (*Taxodium distichum* var. *nutans* (Ait.) Sweet) [J]. New Forests, 2005, 29: 245-260.
- [25] Rong L, Wenhui Z, Jingfeng H, et al. Survival and development of Liaodong oak stump sprouts in the Huanglong Mountains of China six years after three partial harvests [J]. New Forests, 2013, 44(1): 1-12.
- [26] Xue Y Q, Zhang W H, Zhou J Y, et al. Effects of stump diameter, stump height, and cutting season on *Quercus variabilis* stump sprouting [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2013, 28(3): 223-231.
- [27] Schneider H. Effect of trunk girdling on phloem of trunk of sweet orange trees on sour orange rootstocks [J]. Hilgardia, 1954, 22: 593-601.
- [28] 王文杰, 胡英, 王慧梅, 等. 环剥对红松(*Pinus koraiensis*)韧皮部和木质部碳水化合物的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3472-3481.
- Wang W J, Hu Y, Wang H M, et al. Effects of girdling on carbohydrates in the xylem wood and phloem bark of Korean pine (*Pinus koraiensis*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3472-3481. (in Chinese)
- [29] Greene D W, Lord W J. Effect of dormant pruning, summer pruning, scoring and growth regulators on growth, yield and fruit quality of delicious and cortland apple trees [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1983, 108: 590-595.
- [30] 李保国, 王永蕙. 增施氮肥和环剥对枣树光合速率的影响 [J]. 河北农业大学学报, 1991, 14(3): 33-37.
- Li B G, Wang Y H. Effects of some cultural methods on photosynthesis of Chinese jujube [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1991, 14(3): 33-37. (in Chinese)
- [31] Clark D B, Clark D A. The impact of physical damage on canopy tree regeneration in tropical rainforest [J]. Journal of Ecology, 1991, 79: 447-457.

(上接第 69 页)

- [30] 史倩倩, 王雁, 周琳, 等. 中原牡丹传统品种的核型及进化关系 [J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(11): 23-27, 37.
- Shi Q Q, Wang Y, Zhou L, et al. Karyotypes of twenty-one traditional cultivars of *Paeonia suffruticosa* and their evolutionary relationship [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(11): 23-27, 37. (in Chinese)
- [31] Groth E, Tandre K, Enqstrom P, et al. Agamous subfamily MADS-box genes and the evolution of seed cone morphology in Cupressaceae and Taxodiaceae [J]. Evolution & Development, 2011, 13(2): 159-170.
- [32] 张凯丽, 刘辉. 一种确定染色体图像着丝点位置的方法 [J]. 昆明理工大学学报, 2001, 26(3): 110-113.
- Zhang K L, Liu H. A method of obtaining the centromere index in chromosome images [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2001, 26(3): 110-113. (in Chinese)
- [33] 卫尊征, 殷选红, 熊敏, 等. 3个彩色马蹄莲引进品种的核型分析 [J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(4): 650-654.
- Wei Z Z, Yin X H, Xiong M, et al. Karyotype analysis of three *Zantedeschia* hybrid cultivars [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(4): 650-654. (in Chinese)
- [34] 于永福. 杉科植物的分类学研究 [J]. 植物研究, 1994, 14(4): 369-381.
- Yu Y F. Taxonomic studies on the family Taxodiaceae [J]. Bulletin of Botanical Research, 1994, 14(4): 369-381. (in Chinese)