



引用格式: 常健超, 陈生煜, 林吴白羽, 等. 酢浆草属 12 种植物核型分析[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 0502-0510. [CHANG J C, CHEN S Y, LIN-WU B Y, et al. Karyotype analysis of twelve species of *Oxalis*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(3): 0502-0510.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20230581

酢浆草属 12 种植物核型分析

常健超^{1,2}, 陈生煜^{1,2}, 林吴白羽^{1,2}, 唐小云^{1,2}, 翟俊文^{1,2}, 吴沙沙^{1,2*}

(1 福建农林大学 风景园林与艺术学院, 福州 350002; 2 福建省观赏植物种植资源创新与应用工程技术研究中心, 福州 350002)

摘要 【目的】为了从细胞学角度明确酢浆草属(*Oxalis*) 12 种植物核型特征与亲缘关系, 探究酢浆草属植物染色体的多样性, 进一步为酢浆草种质资源鉴定与杂交育种亲本选择提供参考。【方法】应用根尖压片法对酢浆草属 12 个物种植物有丝分裂中期的染色体形态、数目及其核型进行观察分析。【结果】(1) 7 个物种的染色体数目为首次报道, 5 种已报道物种中, 兔耳酢浆草(*O. fabaeifolia*) 和黄花酢浆草(*O. pes-caprae*) 染色体数目与前人报道一致, 其余 3 种, 与先前报道存在差异, 其中 $2n=26$ 为酢浆草属植物中鲜见报道的染色体数目, 共发现 7 种染色体基数, 其中 $x=13$ 鲜见报道, 倍性范围从 $2x\sim 6x$; 实际染色体大小范围为 $0.27\sim 2.23\ \mu\text{m}$, 着丝点位置为中部着丝点区(m) 和亚中部着丝点区(sm), 核型类型共 4 种, 核型不对称系数范围为 $56.31\%\sim 65.40\%$ 。(2) 12 种酢浆草属植物中兔耳酢浆草最为进化, 扁平酢浆草(*O. compressa*) 最为原始。(3) 根据染色体核型相似性可将酢浆草属 12 种植物划分为 4 组。【结论】酢浆草属 12 个物种具有广泛的核型多样性, 核型分类结果与前人形态学分类不完全一致。

关键词 酢浆草属; 细胞学; 核型; 染色体进化; 亲缘关系

中图分类号 Q943; Q343.2⁺2 **文献标志码** A

Karyotype analysis of twelve species of *Oxalis*

CHANG Jianchao^{1,2}, CHEN Shengyu^{1,2}, LIN-WU Baiyu^{1,2},
TANG Xiaoyun^{1,2}, ZHAI Junwen^{1,2}, WU Shasha^{1,2*}

(1 College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 Fujian Ornamental Plant Germplasm Resources Innovation & Engineering Application Research Center, Fuzhou 350002, China)

Abstract [Objective] This study aims to identify the karyotypic characteristics and genetic relationships of 12 species of *Oxalis* from a cytologic view, in order to provide a reference for exploring chromosome diversity of *Oxalis*, identifying germplasm resources of *Oxalis*, and selecting parents for cross-breeding. [Methods] The chromosome morphology, number, and karyotype of 12 species of *Oxalis* plants were observed and analyzed by the root-tip compression method. [Results] (1) Chromosome numbers were reported for the first time for 7 species. Of the 5 reported species, *O. fabaeifolia* and *O. pes-caprae* had chromosome numbers consistent with previous reports, while the remaining 3 differed from previous reports, of which $2n=26$ was the rarely reported chromosome number in the genus *Oxalis*. A total of 7 chromo-

收稿日期: 2023-09-14; 修改稿收到日期: 2023-10-25

基金项目: 福建农林大学 2021 年度乡村振兴服务团队项目(11899170151)

作者简介: 常健超(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事园林植物与应用研究。E-mail: cjchao2022@126.com

* 通信作者: 吴沙沙, 副教授, 博士生导师, 主要从事园林植物资源与应用研究。E-mail: shashawu1984@126.com

some bases were found, of which $x=13$ was rarely reported, and ploidy ranged from $2x$ to $6x$. Actual chromosome sizes ranged from $0.27\ \mu\text{m}$ to $2.23\ \mu\text{m}$. The location of the attachment point was the meta-centric (m) and submetacentric (sm) chromosomes. There were 4 karyotype types and the karyotype asymmetry coefficients ranged from 56.31% to 65.40%. (2) *O. fabaeifolia* was the most evolved while *O. compressa* was the most primitive. (3) According to the similarity of chromosomal karyotypes, the 12 species of *Oxalis* can be divided into 4 groups. [Conclusion] The 12 species of *Oxalis* have extensive karyotypic diversity. Karyotypic classification is not in complete agreement with the morphological classifications of previous reports.

Key words *Oxalis*; cytology; karyotype; chromosome evolution; relationship

酢浆草属 *Oxalis* 隶属于酢浆草科 Oxalidaceae, 为 1 年生或多年生植物, 全世界约有 800 种, 主要分布在非洲和南美洲, 其中南美洲地区酢浆草属物种生活型差异巨大^[1-3]。中国最初仅有 5 种, 3 亚种, 1 变种, 后续又陆续发现 3 个新种^[4-6]。酢浆草属其下包含 4 个亚属: *Monoxalis* 亚属, *Trifidus* 亚属, *Thamnoxyis* 亚属和 *Oxalis* 亚属^[7]。该属植物开发潜力巨大, 具有抗旱能力强、栽培繁殖容易、叶形多样、花色丰富、观赏性强等优点, 适合家庭盆栽种植, 用作园林中花坛、花径造景等, 应用形式多样。其中, 紫叶酢浆草 (*O. triangularis* ‘Urpurea’) 和红花酢浆草 (*O. corymbosa*) 在 20 世纪 90 年代初已在中国园林绿化方面广泛应用, 但其他观赏型品种应用较少。在分类上, 由于其分布广泛、高度的形态学变异和表型可塑性, 导致酢浆草属种质资源分类混乱, 亚属和组之间的关系不清楚, 各物种间亲缘关系不明, 影响酢浆草属植物育种进展。酢浆草属植物在 2007—2008 年开始大量引入中国, 目前国内有 500 余个种和品种。引入的来源主要是日本的园艺爱好者和美国的 Telos 出售, 但在引种过程中由于缺乏专门的植物分类学知识, 出现大量同名异物, 同物异名的现象。由于这些种质的亲缘关系和遗传背景复杂且不明, 造成新品种选育的工作难度高且工作量大, 选育效率低。染色体是所有真核细胞细胞核内遗传物质的主要载体^[8], 其数目和形态特征对于鉴定系统发育过程中物种间的亲缘关系具有重要意义^[9-10]。前人对酢浆草属植物细胞学研究主要集中在对其染色体数目方面, 结果表明, 在细胞学上, 南非种和南美种存在较明显差异^[11]。南美洲酢浆草在 *Oxalis* 亚属和 *Thamnoxyis* 亚属中共具 6 种不同染色体基数 $x=5, 6, 7, 8, 9$ 和 11 的二倍体和多倍体。形态上相关的种类具有相同的染色体基数, 染色体基数对推断酢浆草属植物物种间

系统发育关系具有较大作用, 有研究认为 $x=7$ 为该属原始的染色体基数, 但存在争议。也有学者研究认为 $x=6$ 更有可能是该属植物的近始型性状, 其他染色体基数是染色体进化过程中出现的^[11-12]。De Azkue 和 Martínez^[13-14] 对酢浆草属 20 个灌木型植物进行核型分析, 将其分成 6 组, 认为应将酢浆薯 (*O. tuberosa*) 群系归到 Herrerea 组。截至 20 世纪 90 年代, 有关酢浆草属细胞学的研究表明该属植物染色体基数范围广, 多种倍性的存在导致酢浆草属分类上的困难。

21 世纪初, 有研究对三角紫叶酢浆草 (*O. triangularis*)^[15] 核型进行分析, 其染色体数为 $2n=4x=28$, 为异源四倍体。对日本的关节酢浆草 (*O. articulata*), 红花酢浆草以及酢浆草变种 (*O. corniculata* var. *corniculata*) 的 3 种变型 (*O. corniculata* var. *corniculata* f. *corniculata*, *O. corniculata* var. *corniculata* f. *rubrifolia* 和 *O. corniculata* var. *corniculata* f. *tropaeoloides*)^[16] 的研究结果表明, 关节酢浆草有 $2n=14$ 条染色体, 红花酢浆草有 $2n=28$ 条染色体, 3 种变型通常有 $2n=48$ 条染色体, 但在 *O. corniculata* var. *corniculata* f. *corniculata* 中发现 1 个 $2n=47$ 条染色体的个体。有研究发现形态极为相似的 Corniculatae 组和 Ripariae 组^[17] 在细胞学上存在差异, Corniculatae 组包含 $x=5$, 大染色体和高 DNA 含量的二倍体物种; Ripariae 组内为 $x=6$, 小染色体和低 DNA 含量的二倍体和多倍体物种。而后又有研究对 7 种酢浆草属植物^[18] 进行核型分析, 其中 5 种酢浆草属植物染色体基数 $x=7$, 黄瓜子酢浆草 (*O. flava*) 基数为 $x=11$, 白花小树酢浆草 (*O. anomala*) 基数为 $x=8$, 7 种酢浆草种质根据臂比值都为 m 型染色体, 但个体之间染色体平均相对长度具有明显的差异性。细胞学分析认为 Articulatae 组需要重新修订, *O.*

linarantha 应该放到其他组^[19]。由于高度的形态变异和表型可塑性,造成使用的形态特征不清晰,导致该属建立组间关系十分困难。有研究发现酢浆草属植物染色体数目与 Lourteig 的分类之间没有显著关系,同一亚属的物种在染色体数上不一定呈现一致性^[7]。这些研究一定程度上揭示酢浆草属植物的种间亲缘关系,明确部分物种的染色体数目和倍性,但对其核型特征和进化研究较少。因此,为了从细胞学角度对常见的酢浆草属 12 个物种进行鉴定和亲缘关系分析,拟探究酢浆草属植物染色体进化的多样性,探讨酢浆草属 12 种植物之间的亲缘关系,为酢浆草种质资源鉴定和杂交育种亲本选择提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

根据董钠等^[20]建立的酢浆草属植物观赏性评价体系,筛选出观赏性高、适应性强的酢浆草属 12 个植物,包括 11 种和 1 个变种(表 1)。

表 1 试验材料信息
Table 1 Test material information

编号 Number	种 Species	组 Section
1	扁平酢浆草 <i>O. compressa</i>	Cernuae
2	果香酢浆草 <i>O. massonorum</i>	—
3	构巢酢浆草 <i>O. nidulans</i>	Sagittatae
4	兔耳酢浆草 <i>O. fabaeifolia</i>	Crassulae
5	大花酢浆草 <i>O. bowiei</i>	Cernuae
6	吉氏酢浆草 <i>O. zeekoevleyensis</i>	Oppositae
7	双色冰淇淋酢浆草 <i>O. versicolor</i>	Angustate
8	藤双色冰淇淋酢浆草 <i>O. tenuifolia</i>	Angustate
9	一片心酢浆草 <i>O. simplex</i>	Campannlatae
10	黄花酢浆草 <i>O. pes-caprae</i>	Cernuae
11	皱瓣酢浆草 <i>O. crispiflora</i>	—
12	细叶粉爪酢浆草 <i>O. polyphylla</i> var. <i>heptaphylla</i>	Angustatae

1.2 试验方法

将解除休眠(种球的一边或两边萌动开始生长)的鳞茎种植在装有 4~5 cm 厚、经高温消毒的蛭石作为基质的育苗穴盘中,托盘中加水,充分浸湿蛭石。待根萌发至 0.5~2.0 cm 长时,分别在其生长

季(2020,2022 年 9—12 月)上午 8:00—11:00,下午 14:00—16:00 每种分别剪取 10 根。

用 0.002 mol/L 8-羟基喹啉与 0.1%秋水仙碱(1:1)混合液对根尖预处理 2 h,而后用蒸馏水冲洗 3 次,卡诺氏固定液(冰乙酸:无水乙醇=1:3,V/V)固定 12 h。固定后,将材料用蒸馏水冲洗 3~4 次。前期实验发现果香酢浆草(*O. massonorum*)根尖较硬,60 min 酸解后,细胞并未被解离;黄花酢浆草(*O. pes-caprae*)根尖较软,酸解 10 min 细胞能够解离,但染色体凝缩在一起,酸解 20 min,根尖过于软化,细胞分裂溃散,无法继续操作。解离方法用 1 mol/L HCl,60 °C 水浴 5 min,蒸馏水清洗 5 次,转入 2%纤维素酶于 37 °C 水浴处理 10 min,能得到较为分散且清晰的分裂相。解离后进行 10 min 低渗(蒸馏水)处理,将根尖置于载玻片中央,滴入 2 滴改良卡宝品红溶液,染色 30~60 min,压片。制片后在 Nikon Ni-U 显微镜的 100 倍油镜下观察,用 NIS-Elements 进行拍照。

1.3 数据处理

选取分散且浓缩均匀的细胞分裂中期图,用 Adobe Photoshop 2020 进行同源染色体配对;用 Image-Pro Plus 测量染色体实际长度;用 Excel 2018 对相关数据进行分析并制作染色体核型模式图;用 SPSS 23.0 对数据进行聚类分析。

核型分析参照李懋学和陈瑞阳^[21]的标准,染色体大小根据 Lima-De-Faria^[22]的“染色体场”理论,把染色体大小划分为 4 种。核型分类依照 Stebbins^[23]的标准进行计算,核型不对称系数按照 Arano^[24]的计算方法,染色体相对长度系数采用 Kuo 等^[25]的方法进行计算分类,进化指数采用常规编序、赋值法^[26-27]对最长染色体与最短染色体比、平均臂比、核不对称系数进行赋值计算(表 2)。

表 2 染色体核型参数编码赋值
Table 2 Code assignment of chromosome karyotype parameters

最长/最短 L/S	平均臂比 Average arm ratio	核型不对称系数 Asymmetrical karyotype coefficient/%	赋值 Assignment
<1.00	<1.70	<58.00	0
1.01~1.50	1.71~1.90	58.01~60.00	1
1.51~2.00	1.91~2.10	60.01~62.00	2
>2.01	2.10~2.30	>62.01	3

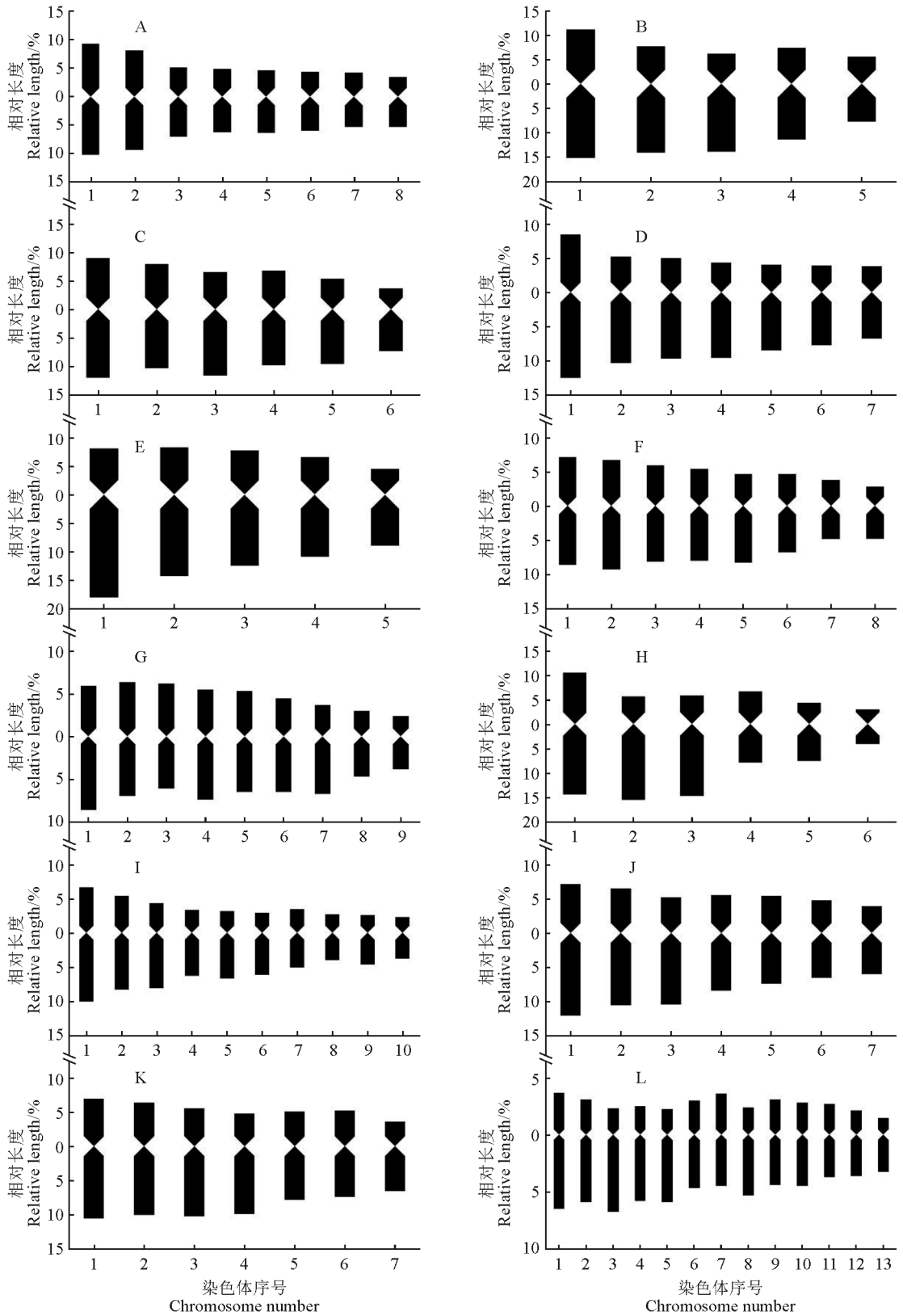


图2 酢浆草属 12 种植物核型模式图

Fig. 2 Karyotype ideograms of 12 species of *Oxalis*

2.2 酢浆草属 12 种植物核型特征

酢浆草属 12 种植物在平均臂比、核型不对称系数、最长染色体与最短染色体比值、臂比>2 的染色体比例、核型类型、核型公式等指标均存在明显差异(表 3)。其染色体大小范围为 0.27~2.23 μm,为

微小染色体(<1 μm)和小染色体(<4 μm);着丝点均为中部着丝点区(m)和亚中部着丝点区(sm);核型类型共 4 种;核型不对称系数范围为 56.31%~65.40%;兔耳酢浆草平均臂比值最大,扁平酢浆草(*O. compressa*)的平均臂比值最小。

表 3 酢浆草属 12 种植物核型特征
Table 3 Karyotype characteristics of 12 *Oxalis* species

种 Species	平均臂 比值 Average arm ratio	核型不对 称系数 Asymmetrical karyotype coefficient /%	最长染色体/ 最短染色体 Ratios of chromosome length (L/S)	臂比大于 2 的染色体 所占百分比 Chromosomes of arm ratio>2/%	核型类型 Karyotypes	进化 指数 Evolution index	核型公式 Karyotype formula
扁平酢浆草 <i>O. compressa</i>	1.33	56.31	2.24	0	1B	3	2n=2x=16=16m
果香酢浆草 <i>O. massonorum</i>	1.68	62.15	1.98	20	2A	5	2n=2x=10=6m+4sm
构巢酢浆草 <i>O. nidulans</i>	1.61	60.74	1.90	16	2A	5	2n=2x=12=6m+6sm
兔耳酢浆草 <i>O. fabae folia</i>	1.94	65.40	1.98	57	3A	7	2n=4x=28=4m+24sm
大花酢浆草 <i>O. bowiei</i>	1.84	64.78	1.94	20	2A	6	2n=6x=30=12m+18sm
吉氏酢浆草 <i>O. zeekoevleyensis</i>	1.45	58.75	2.07	0	1B	4	2n=2x=16=14m+2sm
双色冰淇淋酢浆草 <i>O. versicolor</i>	1.41	57.42	2.33	0	1B	3	2n=2x=18=16m+2sm
藤双色冰淇淋酢浆草 <i>O. tenui folia</i>	1.83	64.14	3.55	33	2B	7	2n=2x=12=6m+6sm
一片心酢浆草 <i>O. simplex</i>	1.75	62.95	2.77	20	2B	7	2n=2x=20=10m+10sm
黄花酢浆草 <i>O. pes-caprae</i>	1.60	61.61	1.94	14	2A	4	2n=5x=35=30m+5sm
皱瓣酢浆草 <i>O. crispiflora</i>	1.70	62.69	1.74	38.46	2A	5	2n=4x=28=16m+12sm
细叶粉爪酢浆草 <i>O. polyphylla</i> var. <i>heptaphylla</i>	1.90	64.86	2.16	14	2B	7	2n=2x=26=12m+14sm

2.3 核型进化趋势

以核型不对称系数为纵坐标,平均臂比值为横坐标作二维进化趋势图(图 3)。兔耳酢浆草在图 3 中的最右上角,其次是细叶粉爪(*O. polyphylla* var. *heptaphylla*),扁平酢浆草在图 3 中的最左下端,其次是双色冰淇淋酢浆草(*O. versicolor*)、吉氏酢浆草(*O. zeekoevleyensis*),其他品种介于中间。

根据酢浆草属植物染色体的 3 个重要性状,采用分支系统学的常规编序和赋值方法,求出能反映品种发育程度的进化指数,因而得出酢浆草属 12 种植物进化水平,从小到大依次为扁平酢浆草=双色冰淇淋酢浆草(进化指数为 3)<吉氏酢浆草=黄花酢浆草(进化指数为 4)<果香酢浆草=构巢酢浆草=皱瓣酢浆草(进化指数为 5)<大花酢浆草(进化

指数为 6)<兔耳酢浆草=藤双色冰淇淋酢浆草=一片心酢浆草=细叶粉爪酢浆草(表 3)。

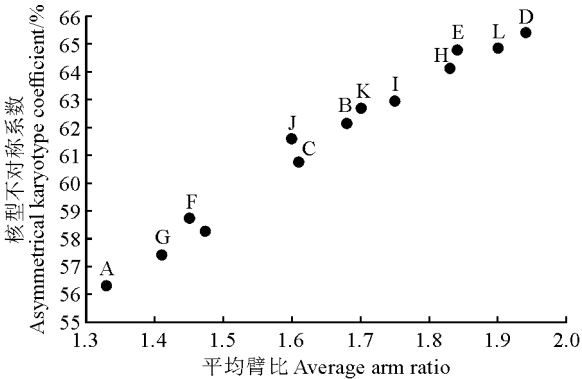


图 3 酢浆草属 12 种植物染色体核型进化趋势
Fig. 3 Evolution trend of karyotypes
of 12 species of *Oxalis*

2.4 核型聚类分析

根据染色体臂比>2 的染色体所占百分比、最长染色体与最短染色体比值、核型不对称系数、平均臂比、基本染色体数,对 12 个酢浆草属植物染色体形态进行聚类分析,当遗传距离为 6 时,12 个酢浆

草属植物划分为 4 组 5 类(图 4)。I 组共 4 个酢浆草属植物;II 组共 6 个物种,又可分为 a、b 两类:a 类为黄花酢浆草、皱瓣酢浆草、兔耳酢浆草,b 类为扁平酢浆草、吉氏酢浆草、双色冰淇淋酢浆草;III 组仅有一片心酢浆草,IV 组仅有细叶粉爪酢浆草。

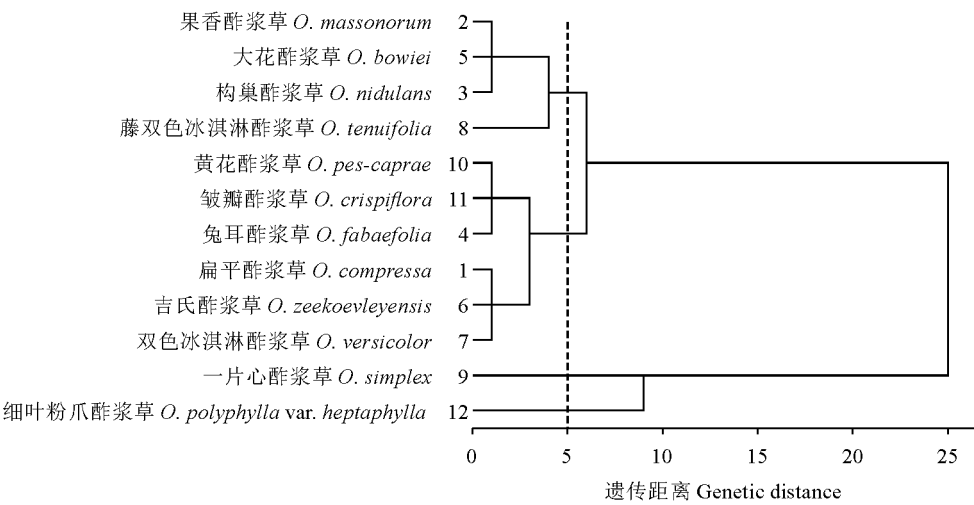


图 4 酢浆草属 12 种植物染色体形态聚类结果
Fig. 4 Clustering analysis of karyotypes of 12 species of *Oxalis*

3 讨 论

3.1 染色体数及核型特征分析

染色体数目已被广泛用于描述一个生物体或一个谱系最基本的基因组属性,是几乎所有科和大多数植物属最为人所知的细胞分类学数据^[28-29]。酢浆草属在染色体数目上具有高度的属内变异,在该属内染色体数目变化很大。本研究中 2n=26 为酢浆草属鲜见报道的染色体数目。Moura 等^[7]对报道过的酢浆草属 112 种植物染色体数目进行整理,除本研究中发现的 9 种外,还存在 2n=14、21、22、32、36、40、42、44、64 和 72。兔耳酢浆草和黄花酢浆草与前人研究结果^[11]一致,大花酢浆草、双色冰淇淋酢浆草和藤双色冰淇淋酢浆草与先前报道^[7]存在差异。先前报道中双色冰淇淋酢浆草 2 次记录在染色体数目和基本染色体数目上的分歧可能对错误鉴定的材料进行研究造成的^[11]。除此之外,细叶粉爪酢浆草同种内另一变种 *Oxalis polyphylla* var. *pentaphylla*, 2n=6x=30^[11],这与本研究中细叶粉爪酢浆草染色体基数存在差异。同一物种内具 2 种或多种不同的染色体数目,表明该物种内存在多倍系或具有种内杂交的可能。前人研究发现,南非酢浆草物种染色体小且各物种染色体之间区别不明显,但南美酢浆草物种染色体大小差异明显^[11]。De

Azkue^[12]对南美酢浆草的研究发现 *Oxalis* 亚属植物染色体大小为 1~3 μm, *Thamnoxyis* 亚属染色体大小为 1~11 μm;对灌木型酢浆草的研究发现其染色体形态多样性主要是由于 DNA 含量变化和多余 DNA 在染色体中不均匀分布所致^[14]。本试验中酢浆草属 12 种植物为微小染色体和小染色体,该结果与前人研究一致。

基本染色体数目在推断酢浆草属物种间系统发育关系中有重要作用^[12]。在观测的酢浆草属 12 种植物中,染色体基数范围广泛,其中 x=13 鲜见报道。前人研究发现酢浆草属染色体基数范围广泛,迄今为止,从细胞学数据来看存在 x=5、6、7、8、9 和 11,其中 x=7 最常出现^[7]。该属原始染色体基数尚不确定,x=6 可被认为是该属近始型性状^[11-12]。而后 Vaio 等^[17]对形态极为相似的 2 个组(*Corniculatae* 和 *Ripariae*)进行细胞遗传学研究,用最大似然法估计 x=6 为祖先染色体基数。本结果表明,x=7 是最常见的基数,x=6 次之,还需对更多物种进行广泛的细胞学和系统学研究才能明确该属物种染色体的演化规律和模式。

全基因组复制(WGD)可以引起即时的物种形成,并与谱系中物种形成和多样化的增加有关,被认为是植物进化的主要动力^[30]。多倍体在南非酢浆草中常见,为南非酢浆草物种提供更大的适应性和

变异性,而在南美种酢浆草中二倍体最常见,多倍体较少。本研究中黄花酢浆草仅有五倍体,而在其原生栖息地,黄花酢浆草的个体表现出二倍体($2n=2x=14$)、四倍体($2n=4x=28$)和五倍体($2n=5x=35$)3 种不同的倍性,且倍性水平的不同伴随着花柱类型的差异^[31-32]。在酢浆草属植物中,存在多种倍性的同一物种,在不同倍性间形态上几乎无差异,在开普植物区发现具 7 种不同的倍性的钝叶酢浆草(*O. obtusa*),其不同倍性水平植株的表型^[33]相似。在对酢浆草属植物 *gigas* 效应的研究中,不同倍性水平芙蓉酢浆草(*O. purpurea*)在器官水平上只有 2 个性状存在显著差异^[34]。从本研究的 12 种酢浆草中发现 4 种不同染色体倍性,二倍体占多数,反映了酢浆草属内倍性多样,与前人观点一致。酢浆草植物染色体基数范围广,倍性和核型特征多样可能与环境因素有关。牛牧歌等^[35]对流苏树山东不同居群的染色体核型研究,认为不同居群间的核型差异可能是有海拔、年降水量等生态因子综合作用的结果。有研究认为酢浆草属植物倍性水平分布的总体格局相当复杂,降水参数是与细胞类型分布最为相关的气候变量^[33]。

3.2 染色体进化

染色体随着生物体的进化而不断进化,不同真核生物的核型可能有很大差异。核型研究有助于确定种间和种内的细胞遗传变异和进化,理解染色体数量、DNA 数量和生物体间的关系^[36]。本研究 12 个酢浆草属植物的染色体均为中部着丝点区(m)和亚中部着丝点区(sm)。核型类型共 4 种,分别为 1B、2A、2B、3A,核型不对称系数范围为 56.31%~65.40%。先前研究认为,酢浆草属植物具有多样的核型变化,具小染色体物种多为对称核型由中部着丝点区(m)与亚中部着丝点区(sm)组成,而具大染色体物种多为不对称核型,染色体由亚端部着丝点

区(st)和端部着丝点区(t)组成^[12,17]。Stebbins^[23]遵循核型对称性与不对称性原理,认为被子植物中核型进化趋势是由对称向不对称发展的。广义铃兰族的核型进化研究中发现,铃兰族的染色体核型不对称性遵循这一趋势^[37]。根据该原理,本研究 12 个酢浆草属植物中,最为进化的是兔耳酢浆草,最为原始的是扁平酢浆草。

3.3 亲缘关系分析

聚类分析结果显示当遗传距离为 6 时,12 个酢浆草属植物划分为 4 组。本研究发现,核型分类中在形态上相似的物种并未聚为一类的现象,核型分类结果与前人形态学分类结果不完全一致。II 组共 6 个物种中扁平酢浆草与黄花酢浆草为同一亚组,同亚组的双色冰淇淋酢浆草、藤双色冰淇淋酢浆草以及细叶粉爪酢浆草未聚为一类。前人在对酢浆草属的研究中同样发现,酢浆草属植物染色体数目和形态学分类之间没有明显关系,同一亚属的物种在染色体数目上不存在必然的一致性^[7]。

4 结 论

研究在 12 个物种中观察到广泛的核型多样性,其中 $2n=26$ 为酢浆草属植物中鲜见报道的染色体数目;研究共发现 7 种染色体基数,最多的为 $x=7$,其中 $x=13$ 鲜见报道;倍性范围为 $2x\sim6x$ 。12 个酢浆草属植物,实际染色体大小范围为 $0.27\sim2.23\mu\text{m}$,为微小染色体和小染色体;着丝点位置为中部着丝点区(m)和亚中部着丝点区(sm);核型类型共 4 种,核型不对称系数范围为 56.31%~65.40%。最为进化的是兔耳酢浆草,最为原始的是扁平酢浆草。根据染色体核型相似性可将 12 个酢浆草属植物划分为 4 组,本研究核型分类结果与前人形态学分类不一致。

参考文献:

[1] KNUTH R. Oxalidaceae[M]//ENGLER A. Das Pflanzenreich. IV 130, Leipzig, 1930: 481.
[2] LOURTEIG A. *Oxalis* L. subgénero *Thamnoxys* (Endl.) Reiche emend[J]. *Lourteig Bradea*, 1994, 7: 1-199.
[3] MACBRIDE J F. Oxalidaceae: Flora of Peni. Fkld Musm of natural history[J]. *Botonual Series*, 1949, 13: 54-601.
[4] 沈显生, 孙灏. 中国酢浆草属一新种[J]. 云南植物研究, 2003, 25(1): 39-40.

SHEN X S, SUN H. A new species of *Oxalis* (Oxalidaceae) from China[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2003, 25(1): 39-40.
[5] DENG T, ZHANG D G, LIU Z W, et al. *Oxalis wulingensis* (Oxalidaceae), an unusual new species from central China [J]. *Systematic Botany*, 2013, 38(1): 154-161.
[6] TIAN Y, YANG F, LIU X L, et al. *Oxalis shibeishanensis* (Oxalidaceae), a new species from Yunnan, Southwest China [J]. *Taiwania*, 2020, 65(3): 360-363.
[7] MOURA A I, OLIVEIRA Y R, DA SILVA P H, et al. Karyo-

type inconsistencies in the taxonomy of the genus *Oxalis* (Oxalidaceae)[J]. *Iheringia, Série Botânica*, 2020, 75: e2020003.

[8] MAYROSE I, LYSAK M A. The evolution of chromosome numbers: Mechanistic models and experimental approaches [J]. *Genome Biology and Evolution*, 2021, 13(2): evaa220.

[9] 刘庆昌. 遗传学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2015: 14.

[10] 王亚男, 刘玉萍, 刘雪利, 等. 沙鞭不同居群染色体数目及核型分析[J]. 西北植物学报, 2021, 41(9): 1489-1499.

WANG Y N, LIU Y P, LIU X L, *et al.* Chromosome number and karyotype analysis from different populations of *Psammochloa villosa* (Poaceae)[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(9): 1489-1499.

[11] MARKS G E. Chromosome numbers in the genus *Oxalis* [J]. *New Phytologist*, 1956, 55(1): 120-129.

[12] DE AZKUE D. Chromosome diversity of South American *Oxalis* (Oxalidaceae)[J]. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2000, 132(2): 143-152.

[13] DE AZKUE D, MARTÍNEZ A. Chromosome number of the *Oxalis tuberosa* alliance (Oxalidaceae)[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 1990, 169(1): 25-29.

[14] DE AZKUE D, MARTÍNEZ A. DNA content and chromosome evolution in the shrubby *Oxalis*[J]. *Genome*, 1988, 30(1): 52-57.

[15] 肖建忠, 张成合, 尚爱芹等. 三角紫叶酢浆草的染色体数目鉴定及核型分析[C]//中国园艺学会. 中国园艺学会第六届青年学术讨论会论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004: 3.

[16] SATO K, ENOMOTO R, KUMAGAI D, *et al.* Chromosome numbers of three species of *Oxalis* (Oxalidaceae) in Japan[J]. *Journal of Japanese Botany*, 2008, 83(4): 239-245.

[17] VAIO M, GARDNER A, EMSHWILLER E, *et al.* Molecular phylogeny and chromosome evolution among the creeping herbaceous *Oxalis* species of sections *Corniculatae* and *Ripariae* (Oxalidaceae)[J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2013, 68(2): 199-211.

[18] 左欠欠. 酢浆草遗传多样性分析和 7 种酢浆草的核型分析[D]. 佛山: 佛山科学技术院, 2020.

[19] VAIO M, GARDNER A, SPERANZA P, *et al.* Phylogenetic and cytogenetic relationships among species of *Oxalis* section *Articulatae* (Oxalidaceae) [J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2016, 302(9): 1253-1265.

[20] 董钠, 李成儒, 陈蕾, 等. 酢浆草属植物观赏性评价体系的建立与应用[J]. 热带作物学报, 2020, 41(9): 1770-1778.

DONG N, LI C R, CHEN L, *et al.* Establishment and application of ornamental evaluation system for *Oxalis* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(9): 1770-1778.

[21] 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): 297-302.

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): 297-302.

[22] LIMA-DE-FARIA A. Classification of genes, rearrangements and chromosomes according to the chromosome field[J]. *Hereditas*, 1980, 93(1): 1-46.

[23] STEBBINS G L. Chromosomal evolution in higher plants [M]. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1971.

[24] ARANO H. Cytological studies in subfamily Carduoideae (Compositae) of Japan[J]. *Botanical Magazine, Tokyo*, 1963, 76: 32-39.

[25] KUO S R, WANG T T, HUANG T C. Karyotype analysis of some formosan gymnosperms[J]. *Taiwania*, 1972, 17(1): 66-80.

[26] WILEY E O. *Phylogenetics*: The theory and practice of phylogenetic systematics[M]. New York: Wiley, 1981.

[27] 徐克学. 数量分类学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

[28] 杨纯瑜, 王徽勤. 中国植物细胞分类学的回顾与展望[J]. 植物学通报, 1985, 20(6): 1-6.

YANG C Y, WANG H Q. Review and prospect of China plant cytotaxonomy[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1985, 20(6): 1-6.

[29] GUERRA M. Chromosome numbers in plant cytotaxonomy: Concepts and implications[J]. *Cytogenetic and Genome Research*, 2008, 120(3/4): 339-350.

[30] ALIX K, GERARD P R, SCHWARZACHER T, *et al.* Poly-ploidy and interspecific hybridization: Partners for adaptation, speciation and evolution in plants[J]. *Annals of Botany*, 2017, 120(2): 183-194.

[31] KREJČÍKOVÁ J, SUDOVÁ R, OBERLANDER K C, *et al.* Cyto geography of *Oxalis pes-caprae* in its native range: Where are the pentaploids? [J]. *Biological Invasions*, 2013, 15(6): 1189-1194.

[32] CASTRO S, LOUREIRO J, SANTOS C, *et al.* Distribution of flower morphs, ploidy level and sexual reproduction of the invasive weed *Oxalis pes-caprae* in the western area of the Mediterranean region[J]. *Annals of Botany*, 2007, 99(3): 507-517.

[33] KREJČÍKOVÁ J, SUDOVÁ R, LUČANOVÁ M, *et al.* High ploidy diversity and distinct patterns of cytotype distribution in a widespread species of *Oxalis* in the Greater Cape Floristic Region [J]. *Annals of Botany*, 2013, 111(4): 641-649.

[34] BECKER F W, OBERLANDER K C, TRÁVNÍČEK P, *et al.* Inconsistent expression of the gigas effect in polyploid *Oxalis*[J]. *American Journal of Botany*, 2022, 109(10): 1607-1621.

[35] 牛牧歌, 郑芹, 李际红, 等. 流苏树山东不同居群的染色体核型分析[J]. 西北植物学报, 2023, 43(4): 582-591.

NIU M G, ZHENG Q, LI J H, *et al.* Chromosome karyotype analysis of five *Chionanthus retusus* populations in Shandong Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(4): 582-591.

[36] DE RESENDE K F M. Karyotype evolution: Concepts and applications[M]// Chromosome structure and aberrations. New Delhi: Springer, 2017: 181-200.

[37] 张籍元, 张成, 孟然, 等. 天门冬科广义铃兰族的染色体数目与核型进化研究[J]. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1315-1332.

ZHANG J Y, ZHANG C, MENG R, *et al.* Chromosome numbers and karyotype evolution of Convallarieae s. l. (Asparagaceae)[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(8): 1315-1332.