

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2020.60723

徐波, 陈光富, 李志敏. 青藏高原 4 种无心菜属植物的细胞学研究[J]. 植物科学学报, 2020, 38(6): 723~729

Xu B, Chen GF, Li ZM. Cytological study on four species of *Arenaria* from the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Plant Science Journal, 2020, 38(6): 723~729

青藏高原 4 种无心菜属植物的细胞学研究

徐波¹, 陈光富^{2*}, 李志敏^{3*}(1. 西南林业大学林学院, 昆明 650224; 2. 丽江师范高等专科学校应用技术学院, 云南丽江 674199;
3. 云南师范大学生命科学学院, 昆明 650500)

摘要: 以四川康定和稻城两个居群的无心菜属 (*Arenaria*) 雪灵芝亚属 (*A. subgen. Eremogoneastrum*) 的雪灵芝 (*A. brevipetala* Y. W. Tsui et L. H. Zhou)、西藏八宿业拉山和安久拉山两个居群的八宿雪灵芝 (*A. baxoiensis* L. H. Zhou)、西藏当雄和工布江达两个居群的瘦叶雪灵芝 (*A. ischnophylla* Williams) 以及西藏拉萨居群的藓状雪灵芝 (*A. bryophylla* Fernald) 为研究材料, 采用植物根尖常规压片法, 对它们的细胞分类学特征进行研究。结果显示: 7 个居群中, 4 种植物的染色体数目均为 $2n=22$, 为二倍体, 核型公式为 $2n=2x=22=22\text{m}$, 核型不对称性属于 Stebbins's-1A 型, AI 值在 1.75 ~ 0.32 范围内变化。结合无心菜属已有细胞学资料, 推断雪灵芝亚属核型特征原始, 染色体数目及倍性稳定。本研究中 4 种植物的染色体数目和核型资料均为首次报道, 补充了青藏高原无心菜属的细胞学资料。

关键词: 无心菜属; 雪灵芝亚属; 细胞学; 青藏高原

中图分类号: Q942

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2020)06-0723-07

Cytological study on four species of *Arenaria* from Qinghai-Tibet Plateau

Xu Bo¹, Chen Guang-Fu^{2*}, Li Zhi-Min^{3*}

(1. Forestry College, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Applied Technology College, Lijiang Normal College, Lijiang, Yunnan 674199, China; 3. School of Life Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: To determine the cytotaxonomic characteristics of *Arenaria* in China, *A. subgen. Eremogoneastrum* *A. brevipetala* Y. W. Tsui et L. H. Zhou (two populations from Kangding and Daocheng in Sichuan), *A. baxoiensis* L. H. Zhou (two populations from Yela and Anjula mountains, Baxoi, Tibet), *A. ischnophylla* Williams (two populations from Damxung and Gongbo'gyamda in Tibet), and *A. bryophylla* Fernald (Lhasa, Tibet) were studied. Root tips were used in combination with KaryoType 2.0 analysis for karyotype research. Results showed that the chromosome number in all seven populations of the four species was $2n = 22$, i.e., diploid evolution. The karyotype formula was $2n = 2x = 22 = 22\text{m}$ and karyotype asymmetry belonged to Stebbins's-1A type, with an AI value in the range of 1.75 – 0.32. Thus, combined with existing cytological data for *Arenaria*, the karyotype of *A. subgen. Eremogoneastrum* is primitive, and its chromosome number (ploidy) is stable. The chromosome number and

收稿日期: 2020-03-23, 退修日期: 2020-04-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960046, 31460047); 丽江师范高等专科学校实习实训基地建设项目(XJ03201801)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (31460047, 31960046) and Lijiang Normal College Internship Training Base Construction Project (XJ03201801).

作者简介: 徐波(1983-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为高山植物多样性及分类(E-mail: alpine_flora@163.com)。

* 通讯作者(Authors for correspondence. E-mail: chgf178@163.com; lizhimin_vip@163.com)。

karyotype data of the four studied species are reported here for the first time. These results will supplement current cytological information for *Arenaria* in the Qinghai-Tibet Plateau and provide insight into the taxonomy, phylogeny, and floristic geography of *Arenaria* and Caryophyllaceae.

Key words: *Arenaria*; *Arenaria* subgen. *Eremogoneastrum*; Cytology; Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原(Qinghai-Tibet Plateau)是中国最大、保存较为完好的高原山区^[1];复杂多变的气候环境、垂直高差显著的高山峡谷和优厚的水系资源等为该区植物多样性及其分布提供了先决条件^[2]。青藏高原地区拥有丰富的植物物种,尤其是高原东南部的东喜马拉雅和横断山脉地区,不仅是全球生物多样性的热点地区^[3]。同时,青藏高原的植物为适应高原严酷的气候条件,经过长期自然选择、进化,形成许多特殊的形态构造和对极端环境多样的适应机制,导致植物区系分化强烈,表现在新属、种等的不断发现及突出的替代等现象;从而成为研究植物区系发生、起源和进化的关键地区^[4]。细胞学相关研究在探讨植物区系起源和演化、系统发育及进化、生命之树等方面具有重要的理论意义^[5]。

中国约有石竹科(Caryophyllaceae)无心菜属(*Arenaria*)105种,隶属6亚属,主要分布于西南至西北的高山、亚高山地区;中国是无心菜属的分布和分化中心^[6,7]。其中,雪灵芝亚属(*A. subgen. Eremogoneastrum*)有17种1变种,主要分布于帕米尔、昆仑-西藏地区和唐古特地区,为多年生密丛生或垫状草本,是高山冰缘带垫状植物的典型代表^[6,7]。目前无心菜属在地理分布、新分类群及分子系统学方面均有研究报道^[7-13]。分子系统学研究表明,石竹科几个大属,包括雪灵芝亚属所属的无心菜属均不是单系属,物种分类较为混

乱^[11-13],急需寻找新的分类学证据。此外,中国产无心菜属植物的细胞学研究还存在较大空白,仅见青藏雪灵芝(*A. roborowskii* Maxim.)一种的核型报道($2n = 2x = 22$ m)^[14]。

本文对无心菜属雪灵芝亚属的4个物种7个居群,包括:雪灵芝(*A. brevipetala* Y. W. Tsui et L. H. Zhou)2个居群、八宿雪灵芝(*A. baxoiensis* L. H. Zhou)2个居群、瘦叶雪灵芝(*A. ischnophylla* Williams)2个居群以及藓状雪灵芝(*A. bryophylla* Fernald)1个居群的染色体数目和核型特征首次进行研究,以期为该属植物的分类学及系统发育等研究提供细胞遗传学资料。

1 材料和方法

实验材料均采自青藏高原地区高山冰缘带(表1)。凭证标本保存于中国科学院昆明植物研究所标本馆(KUN),细胞学实验结果凭证保存于云南师范大学生命科学学院植物学教研室。

采用植物根尖常规压片法开展实验,主要步骤包括取材、预处理、固定、解离、染色、镜检和核型态分析等步骤^[15]。(1)取材:选取颗粒饱满的种子种植于无菌无毒的MS琼脂培养基中,并放置于25℃恒温箱中培养,待根尖长至0.5~1.0 cm时,根据预实验中的取材时间夹取整粒种子置于干净的EP管中。(2)预处理:常温下用0.002 mol/L的8-羟基喹啉暗处理4~6 h。(3)固定:用卡诺

表1 材料采集信息
Table 1 Samples and their locality information

编号 Number	分类群 Taxon	采集地 Locality	生境 Habitat	经纬度 Position	海拔 Altitude (m)	凭证标本 Voucher (KUN)
1	雪灵芝 <i>Arenaria brevipetala</i>	四川康定折多山	高山砾石草甸	30°8'51.24"N, 100°36'15.98"E	4583	MS17-613
2	雪灵芝 <i>A. brevipetala</i>	四川稻城无名山	高山砾石草甸	29°9'46.42"N, 100°5'20.42"E	4665	MS17-639
3	八宿雪灵芝 <i>A. baxoiensis</i>	西藏八宿业拉山	高山草甸	30°10'8.49"N, 97°17'44.22"E	4556	Tsui-430
4	八宿雪灵芝 <i>A. baxoiensis</i>	西藏八宿安久拉山	高山灌丛草地	29°38'59.71"N, 96°42'20.66"E	4470	Tsui-441
5	瘦叶雪灵芝 <i>A. ischnophylla</i>	西藏当雄恰拉山	高山砾石草甸	30°6'42.69"N, 91°16'7.97"E	4849	Tsui-497
6	瘦叶雪灵芝 <i>A. ischnophylla</i>	西藏工布江达米拉山	高山砾石草甸	29°49'40.36"N, 92°20'36.68"E	5017	Tsui-640
7	藓状雪灵芝 <i>A. bryophylla</i>	西藏拉萨雪格拉山	高山流石滩	29°53'55.86"N, 90°7'56.12"E	5463	Tsui-513

氏固定液(冰乙酸:无水乙醇=1:3)于4℃冰箱中处理2~20 h。(4)解离:用1 mol/L盐酸于60℃水浴锅解离5~10 min。(5)染色:加入卡宝品红,避光染液染色4~24 h。(6)镜检:常规压片,并进行镜检观察、拍照。(7)核型分析:核型分析主要按照李懋学和陈瑞阳^[16]的标准并利用KaryoType 2.0软件^[17]进行测量分析,参照Tanaka^[18]标准划分判断间期核和前期染色体形态,着丝粒位置确定参考Levan等^[19]的方法,核型不对称性相关指数进行计算^[20~22]。

2 结果与分析

本研究依据核型分析标准^[16],对无心菜属4种植物选取60个以上有丝分裂中期的细胞进行计数统计,确定7个居群的染色体数目均为 $2n=22$ 。通过对染色体形态最佳的5个以上细胞进行核型分析(图版I),发现该属4种植物的细胞间期核为散铺型(diffuse type),有丝分裂前期染色体属于中间型(interstitial type)。染色体长度范围为2.06~5.65 μm,最长与最短染色体的比值在1.17~1.79之间,染色体平均长度为3.35~2.61 μm,着丝粒指数值(Cl)在30.30~46.12之间,核型不对称系数值(AI)在1.75~0.32之间,Arano核型不对称指数值(As. K%)范围为55.92%~56.99%(表2)。

雪灵芝两居群的核型公式均为 $2n=2x=22=22 m, 1A$,染色体基数 $x=11$,二倍体。采自四川省康定县折多山居群染色体长度范围为3.75~

2.66 μm,最长与最短染色体的比值为1.70,不对称系数AI=0.47,核型不对称性为Stebbins's-1A;四川省稻城县无名山居群染色体长度范围为4.11~2.14 μm,最长与最短染色体的比值为1.35,不对称系数AI=1.46,核型不对称性为Stebbins's-1A型。

八宿雪灵芝两居群核型公式为 $2n=2x=22=22 m, 1A$,染色体基数 $x=11$,二倍体。采自西藏自治区八宿县业拉山居群染色体长度范围为3.13~2.34 μm,最长与最短染色体的比值为1.79,不对称系数AI=0.47,核型不对称性为Stebbins's-1A;采自西藏自治区八宿县安久拉山居群染色体长度范围为5.65~2.17 μm,最长与最短染色体的比值为1.31,不对称系数AI=1.75,核型不对称性为Stebbins's-1A型。

瘦叶雪灵芝两居群核型公式为 $2n=2x=22=22 m, 1A$,染色体基数 $x=11$,二倍体。采自西藏自治区当雄县恰拉山居群染色体长度范围为3.90~2.06 μm,最长与最短染色体的比值为1.34,不对称系数AI=1.67,核型不对称性为Stebbins's-1A;采自西藏自治区工布江达县米拉山居群染色体长度范围为3.10~2.17 μm,最长与最短染色体的比值为1.17,不对称系数AI=0.32,核型不对称性为Stebbins's-1A型。

薛状雪灵芝采自西藏自治区拉萨市雪格拉山,核型公式为 $2n=2x=22=22 m, 1A$,染色体基数 $x=11$,为二倍体。染色体长度范围为3.4~2.33 μm,最长与最短染色体的比值为1.77,不对

表2 无心菜属4种植物核型参数与染色体数据
Table 2 Karyotype parameters and chromosomal data of four *Arenaria* species in this study

编号 Number	分类群 Taxon	染色体长度范围 Range LC-SC (μm)	臂比值 Ratio	长臂 L (μm)	短臂 S (μm)	染色体总长 平均长度 CL (μm)	平均着丝粒 指数 CI	核型不对称 系数 As. K%	不对称 指数 AI
1	雪灵芝	3.75~2.66	1.70	2.06±0.44	1.21±0.16	3.20±0.32	46.00±0.02	53.95	0.47
2	雪灵芝	4.11~2.14	1.35	1.69±0.28	1.27±0.25	2.96±0.49	42.94±3.98	56.99	1.46
3	八宿雪灵芝	3.13~2.34	1.79	1.81±0.15	1.01±0.19	2.76±0.24	30.30±0.28	55.43	0.47
4	八宿雪灵芝	5.65~2.17	1.31	1.89±0.42	1.46±0.29	3.35±0.66	43.68±3.89	56.34	1.75
5	瘦叶雪灵芝	3.90~2.06	1.34	1.62±0.33	1.23±0.19	2.84±0.45	43.42±4.57	56.68	1.67
6	瘦叶雪灵芝	3.10~2.17	1.17	1.41±0.16	1.20±0.13	2.61±0.28	46.12±1.34	53.92	0.32
7	薛状雪灵芝	3.40~2.33	1.77	1.79±0.18	1.01±0.15	2.88±0.32	31.61±0.17	55.19	0.54

注:LC-SC为最长-最短染色体;L为长臂的平均长度;S为短臂的平均长度;CL为染色体总长的平均长度;CI为平均着丝点指数;As. K%为核型不对称性系数;AI为不对称指数。

Notes: LC-SC. Longest chromosome length-shortest chromosome length; L. Long arm length; S. Short arm length; CL. Mean length of chromosome; CI. Mean centromeric index; As. K%. Index of karyotypic asymmetry; AI. Asymmetry index.

称系数 $AI = 0.54$, 核型不对称性为 Stebbins's-1A 型。

3 讨论

无心菜属全世界约有 300 余种^[6], 依据已有细胞学资料, 该属体细胞染色体数目多样, 包括 $2n = 14, 16, 20, 22, 24, 30, 34, 36, 40$ ^[23, 24], 存在明显的非整倍性变化, 同时可以推断该属染色体基数包括 $x = 7, 8, 10, 11, 15, 17$ 等。本研究中的雪灵芝亚属植物染色体数目均为 $2n = 22$, 数目仍在已有报道的范畴, 可以确定 4 种植物均为二倍体, 染色体基数 $x = 11$; 核型公式为 $2n = 2x = 22$ 。此外, 4 种雪灵芝亚属植物与已报道的该亚属植物青藏雪灵芝的核型结果一致^[14], 并表现出低倍性(二倍体)及核型对称性稳定(Stebbins's-1A 型、AI 值低)的特征, 参照“核型对称——原始, 核型不对称——更进化”的原理^[20, 22], 推测雪灵芝亚属植物染色体较为原始。另外, 根据最新的分子系统学证据, 雪灵芝亚属与老牛筋亚属(*A. subgen. Eremogone*)亲缘关系最近, 归并且独立成老牛筋属 *Eremogone*^[11, 12]。从染色体角度讲, 老牛筋亚属已收录的 20 个物种中大部分染色体数为 $2n = 22$ (<http://ccdb.tau.ac.il>), 与本研究揭示的雪灵芝亚属 4 种植物染色体数目一致, 为二者归并且独立成属提供细胞学证据。当然, 要进一步弄清青藏高原雪灵芝亚属乃至无心菜属的细胞学特征, 探讨种间、亚属间、属间亲缘关系和系统演化, 还需增加采样范围, 对更多类群进行系统的细胞学研究和分子生物学研究。

王汉屏^[25]通过对石竹科女娄菜属(*Melandrium*)、蝇子草属(*Silene*)、麦仙翁属(*Agrostemma*)、剪秋罗属(*Lychnis*)、狗筋蔓属(*Cucubalus*)等属的细胞学资料统计, 推断以上属主要维持在二倍体水平上进化。对蝇子草属、繁缕属(*Stellaria*)的研究结果也显示其染色体倍性变化以二倍体为主^[26-28]。本研究涉及的 4 种无心菜属雪灵芝亚属植物均为二倍体, 结合无心菜属已有的细胞学证据^[23, 24], 认为雪灵芝亚属与上述石竹科其它植物一致, 同样是在二倍体水平上进化。要弄清石竹科植物倍性的多样化, 还需对不同属、亚属等分类单元下更多类群开展细胞学研究和统计分析。

多倍化是被子植物物种形成的重要途径, 也是为适应较高海拔、较高纬度或者极端气候等逆境胁迫环境的产物^[20, 29]。因此, 染色体数目多倍化现象与物种进化、生态适应间的相关性一直是生物进化研究的热点选题, 特别是在植物区系组成年轻、生境胁迫明显、物种多样性和特有性程度高的青藏高原(横断山)地区广受关注。通过对青藏高原分布的火绒草属(*Leontopodium*)^[30]、香青属(*Anaphalis*)^[31]等植物进行细胞学研究, 证实这些类群多倍化现象明显; 但橐吾属(*Ligularia*)^[32]、蝇子草属^[26, 27]、蓝钟花属(*Cyananthus*)^[33]等多倍化趋势不显著。为进一步探明多倍化与极端生境间的相关性, 王家坚等^[34]对青藏高原与横断山地区染色体资料进行系统分析, 统计结果表明新多倍化在该区仅占 23%, 而低基数的二倍体比例达 43.3%; 推测二倍体水平上的染色体结构和核型进化是青藏高原地区物种分化的一个重要机制。本研究中的实验材料均采自青藏高原, 海拔在 4556 ~ 5463 m 环境极端严酷的高山冰缘带, 均为二倍体。周立华^[7]认为中国横断山脉到青藏高原是无心菜属的次生分化中心, 主要是由于第四纪冰期时青藏高原地区存在多个“冰期避难所”, 为无心菜属植物的二倍体祖先提供庇护, 这些类群在冰期时得以存活并在冰期后繁衍发展。近期, 青藏高原石竹科垫状植物的分子系统及生物地理学研究表明, 雪灵芝亚属起源于渐新世晚期 2.72 Ma, 为青藏高原就地起源; 该亚属内分化始于更新世 1.85 Ma^[13]。结合本研究揭示的雪灵芝亚属植物染色体在二倍体水平上的进化机制, 我们认为第四纪冰期气候波动是促进该亚属以同倍化方式辐射演化的主要驱动力, 而多倍化并未参与到亚属内的物种形成过程。青藏高原地质历史复杂, 为适应高寒极端环境, 该地区植物染色体进化机制多样; 需更深入开展该地区相关类群的核型研究, 为青藏高原植物区系地理、物种形成与分化提供细胞学证据。

致谢: 孙文光、吕先飞、刘塬、杨圣艳等在实验工作上给予帮助; 叶法志、邓成志、王洪斌、王俊伟、张煜坤、马祥光等协助采集部分种子材料, 在此一并感谢。

参考文献:

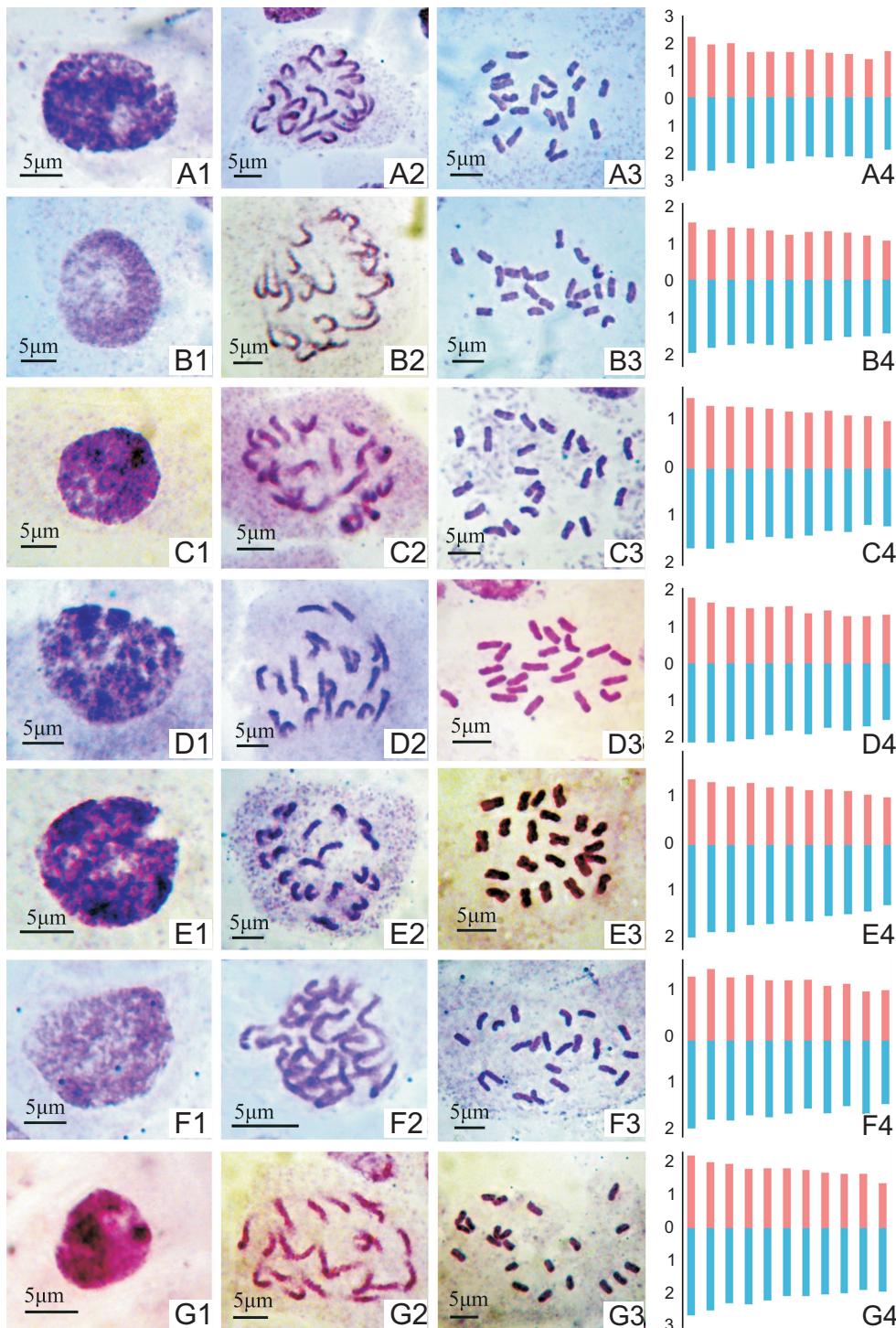
- [1] 张镱锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研

- 究, 2002, 21(1): 1–8.
- Zhang YL, Li BY, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China [J]. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1–8.
- [2] 吴征镒, 王荷生. 中国自然地理·植物地理(上册) [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [3] Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GABD, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities [J]. *Nature*, 2000, 403(6772): 853–858.
- [4] Wen J, Zhang JQ, Nie ZL, Zhong Y, Sun H. Evolutionary diversifications of plants on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Front Genet*, 2014, 5: 4.
- [5] 孙文光, 孙航, 李志敏. 染色体数据的挖掘及其在植物多样性进化研究中的利用 [J]. *植物科学学报*, 2019, 37(2): 260–269.
- Sun WG, Sun H, Li ZM. Chromosome date mining and its application in plant diversity research [J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(2): 260–269.
- [6] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第26卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 159–195.
- [7] 周立华. 论无心菜属的地理分布 [J]. *植物分类学报*, 1996, 34(3): 229–241.
- Zhou LH. On the geographical distribution of *Arenaria* L. [J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1996, 34(3): 229–241.
- [8] Li AR, Ban Q. *Arenaria dawuensis*, a new species of the Caryophyllaceae from Sichuan, China [J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 2003, 41(4): 390–392.
- [9] 沈泽昊, 赵子恩. 湖北无心菜属(石竹科)一新种——神农架无心菜 [J]. *植物分类学报*, 2005, 43(1): 73–75.
- Shen ZH, Zhao ZE. *Arenaria shennongjiaensis*, a new species of the Caryophyllaceae from Hubei, China [J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 2005, 43(1): 73–75.
- [10] 姚纲. 石竹科齿瓣无心菜属2新组合名称 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(1): 11–12.
- Yao G. Two new combinations in *Odontostemma* (Caryophyllaceae) [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2017, 25(1): 11–12.
- [11] Donoghue MJ, Greenberg AK. Molecular systematics and character evolution in Caryophyllaceae [J]. *Taxon*, 2011, 60(6): 1637–1652.
- [12] Harbaugh DT, Nepokroeff M, Rabeler RK, McNeill J, Zimmer EA, Wagner WL. A new lineage-based tribal classification of the family Caryophyllaceae [J]. *Int J Plant Sci*, 2010, 171(2): 185–198.
- [13] Xu B, Luo D, Li ZM, Sun H. Evolutionary radiations of cushion plants on the Qinghai-Tibet Plateau: insights from molecular phylogenetic analysis of two subgenera of *Arenaria* and *Thylacospermum* (Caryophyllaceae) [J]. *Taxon*, 2019, 68(5): 1003–1020.
- [14] 罗元霞, 岳学坤, 孙航, 李志敏. 横断山脉地区青藏雪灵芝核形态学 [J]. *云南植物研究*, 2008, 30(6): 662–664.
- Luo YX, Yue XK, Sun H, Li ZM. Cytological studies on *Arenaria roborowskii* (Caryophyllaceae) from Hengduan Mountains [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2008, 30(6): 662–664.
- [15] 刘永安, 冯海生, 陈志国, 畅喜云, 刘瑞娟, 等. 物染色体核型分析常用方法概述 [J]. *贵州农业科学*, 2006, 34(1): 98–102.
- Liu YA, Feng HS, Chen ZG, Chang XY, Liu RJ, et al. Common methods of karyotype analysis in plant [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006, 34(1): 98–102.
- [16] 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 MX, Chen RY. A suggestion on the standardization of karyotype analysis in plants [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1985, 3(4): 297–302.
- [17] Altinordu F, Peruzzi L, Yu Y, He XJ. A tool for the analysis of chromosomes: KaryoType [J]. *Taxon*, 2016, 65(3): 586–592.
- [18] Tanaka R. Types of resting nuclei in Orchidaceae [J]. *Bot Mag-Tokyo*, 1971, 84: 118–122.
- [19] Levan A, Fredga K, Sandberg AA. Nomenclature for centromeric position on chromosomes [J]. *Hereditas*, 1964, 52(2): 201–220.
- [20] Stebbins GL. Chromosomal Evolution in Higher Plants [M]. London: Edward Arnold Ltd, 1971.
- [21] Arano H. Cytological studies in subfamily Carduoideae (Compositae) of Japan XI [J]. *Bot Mag*, 1963, 76: 32.
- [22] Paszko B. A critical review and a new proposal of karyotype asymmetry indices [J]. *Plant Syst Evol*, 2006, 258: 39–48.
- [23] Fadaei F, Sheidai M, Asadi M. Cytological study the genus *Arenaria* L. (Caryophyllaceae) [J]. *Caryologia*, 2010, 63(2): 149–156.
- [24] Siddique MAA, Jeelani SM. Cyto-genetic diversity with special reference to medicinal plants of the Kashmir Himalaya—a review [J]. *Caryologia*, 2015, 68(4): 365–380.
- [25] 王汉屏. 石竹科植物的细胞分类学研究(一) [J]. *陕西教育学院学报*, 2004(1): 87–91.
- Wang HP. The cytotoxicity studies of Caryophyllaceae plants (1) [J]. *Journal of Shaanxi Institute of Education*, 2004(1): 87–91.
- [26] Luo D, Liu D, Xu B, Nie ZL, Sun H, Li ZM. A karyological study of six species of *Silene* L. (Caryophyllaceae) from

- the Hengduan Mountains, SW China [J]. *Caryologia*, 2011, 64(1): 10–13.
- [27] 底远哲, 胡伸萌, 王海霞, 孙文光, 李志敏. 青藏高原3种蝇子草属植物的核型研究[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(4): 1074–1079.
- Di YZ, Hu SM, Wang HX, Sun WG, Li ZM. Karyotypes of three *Silene* L. (Caryophyllaceae) species from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(4): 1074–1079.
- [28] 杨慧娴, 孙文光, 欧晓昆, 李志敏. 中国西南地区6种植物的核型研究及其系统学意义[J]. 西北植物学报, 2019, 39(4): 630–637.
- Yang HX, Sun WG, Ou XK, Li ZM. Karyotype analysis and systematic significance of six species in Southwest China [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 39(4): 630–637.
- [29] Löve A, Löve D. Origin and evolution of the arctic and alpine floras [M]//Ives JD, Barry RG, eds. Arctic and Alpine Environment. London: Methuen Co Ltd, 1974.
- [30] 王广艳, 孟盈, 聂泽龙, 杨永平. 青藏高原东南缘五种火绒草属植物的核型[J]. 植物分类与资源学报, 2013, 35(3): 355–360.
- Wang GY, Meng Y, Nie ZL, Yang YP. Karyotypes of five *Leontopodium* species from the Southeastern Qinghai-Tibet Plateau, Southwest China [J]. *Plant Diversity and Resources*, 2013, 35(3): 355–360.
- [31] Meng Y, Yang YP, Sun H, Deng T, Nie ZL. Chromosome numbers, karyotypes, and polyploidy evolution of *Anaphalis* species (Asteraceae: Gnaphalieae) from the Hengduan Mountains, SW China [J]. *Caryologia*, 2014, 67(3): 238–249.
- [32] Liu JQ. Uniformity of karyotypes in *Ligularia* (Asteraceae: Senecioneae), a highly diversified genus of the eastern Qinghai-Tibet Plateau highlands and adjacent areas [J]. *Bot J Linn Soc*, 2004, 144(3): 329–342.
- [33] Chen GF, Sun WG, Hong DY, Zhou Z, Niu Y, et al. Systematic significance of cytology in *Cyananthus* (Campanulaceae) endemic to the Sino-Himalayan region [J]. *J Syst Evol*, 2014, 52(3): 260–270.
- [34] 王家坚, 彭智邦, 孙航, 聂泽龙, 孟盈. 青藏高原与横断山被子植物区系演化的细胞地理学特征[J]. 生物多样性, 2017, 25(2): 218–225.
- Wang JJ, Peng ZB, Sun H, Nie ZL, Meng Y. Cytogeographic patterns of angiosperms flora of the Qinghai-Tibet Plateau and Hengduan Mountains [J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(2): 218–225.

徐波等: 图版 I

Xu Bo et al.: Plate I



无心菜属4种植物的核型分析。A1~G1: 间期核; A2~G2: 有丝分裂前期的染色体; A3~G3: 中期染色体; A4~G4: 核型模式图。A1~A4: 雪灵芝(四川康定居群); B1~B4: 雪灵芝(四川稻城居群); C1~C4: 八宿雪灵芝(西藏八宿业拉山居群); D1~D4: 八宿雪灵芝(西藏八宿安久拉山居群); E1~E4: 瘦叶雪灵芝(西藏当雄居群); F1~F4: 瘦叶雪灵芝(西藏工布江达居群); G1~G4: 薜状雪灵芝(西藏拉萨居群)。

Cytological analysis of four *Arenaria* species. A1–G1: Mitotic interphase nuclei; A2–G2: Pre-chromosome; A3–G3: Metaphase chromosome; A4–G4: Karyotype diagram. A1–A4: *Arenaria brevipetala* (Kangding population, Sichuan); B1–B4: *A. brevipetala* (Daocheng population, Sichuan); C1–C4: *A. baxoiensis* (Yela Mountains population, Baxoi, Tibet); D1–D4: *A. baxoiensis* (Anjula Mountains population, Baxoi, Tibet); E1 – E4: *A. ischnophylla* (Damxung population, Tibet); F1 – F4: *A. ischnophylla* (Gongbo'gyamda population, Tibet); G1–G4: *A. bryophylla* (Lhasa population, Tibet).