

基于叶绿体基因组变异位点的百合属(百合科)植物资源遗传多样性的分子鉴定新方法

刘美辰¹, 刘一心², 左云娟^{3,4*}, 靳晓白⁵, 杨志荣⁶, 索志立^{7*}

¹北京市食品检验研究院(北京市食品安全监控和风险评估中心), 北京

²西北农林科技大学风景园林艺术学院, 陕西 咸阳

³中国科学院东南亚生物多样性研究中心, 云南 西双版纳

⁴中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心, 云南 西双版纳

⁵国家植物园, 北京

⁶中国科学院植物研究所国家植物标本馆, 北京

⁷中国科学院植物研究所系统与进化植物学国家重点实验室, 北京

收稿日期: 2024年4月15日; 录用日期: 2024年7月22日; 发布日期: 2024年7月30日

摘 要

精准鉴定遗传多样性是植物资源利用和深入开展科学研究的基础。我们利用百合属7个种的叶绿体基因组序列中的物种特有的995个核苷酸变异位点作为分子性状编制分子鉴定检索表, 供试样得到成功鉴定。物种特有变异位点的数量和核苷酸构成存在种间差异。紫斑百合*Lilium nepalense* (791)的特有变异位点的数量最多, 随后依次为台湾百合*L. Formosanum* (80)、竹叶百合*L. Hansonii* (47)、条叶百合*L. callosum* (28)、垂花百合*L. Cernuum* (21)、野百合*L. brownii* (19)和卷丹*L. Lancifolium* (9)。紫斑百合的特有变异位点中, A (27.05%)或T (32.24%)的比例明显高于C (19.97%)或G (20.73%)。台湾百合的特有变异位点中, A (26.25%)或T (31.25%)的比例也是多于C (22.50%)或G (20.00%)。竹叶百合的特有变异位点中, A的比例(42.55%)最高, 是C (8.51%)的比例的5倍, 是G (14.89%)的比例的2.8倍以上; T的比例(34.04%)是C (8.51%)的比例的4倍, 是G (14.89%)的比例的2.2倍以上。条叶百合的特有变异位点中, A的比例(17.86%)低于T (25.00%)、C (28.57%)或G (28.57%)。垂花百合的特有变异位点中, T的比例(47.62%)为A (19.05%)、C (19.05%)或G (14.29%)的2倍以上。野百合的特有变异位点中, A的比例(47.62%)最高, 是C (5.26%)的比例的约9倍, G (15.79%)或T (31.57%)的比例分别是C的比例的约3倍和6倍。卷丹的特有变异位点中, C的比例(44.44%)为G的比例(11.11%)的约4倍。结果显示, 叶绿体基因组的单核苷酸变异位点信息, 可用于百合属植物资源遗传多样性的分子鉴定。调查了中国过去120多年来百合属植物标本的收集现状, 讨论了存在的问题与对策。本研究对于百合属植物的分类修订、种质资源的保护和利用具有重要价值。

关键词

百合科, 百合属, 植物资源, 叶绿体基因组, 核苷酸变异位点, 分子鉴定

*通讯作者。

A Novel Method for Molecular Identification of Genetic Diversity of Plant Resources in *Lilium* L. (Liliaceae) Based on Taxon-Specific Variable Nucleotide Characters from Whole Chloroplast Genome Sequences

Meichen Liu¹, Yixin Liu², Yunjuan Zuo^{3,4*}, Xiaobai Jin⁵, Zhirong Yang⁶, Zhili Suo^{7*}

¹Beijing Institute of Food Inspection and Research, Beijing Municipal Center for Food Safety Monitoring and Risk Assessment, Beijing

²College of Landscape Architecture and Art, Northwest A & F University, Xianyang Shaanxi

³Southeast Asia Biodiversity Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna Yunnan

⁴Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna Yunnan

⁵China National Botanical Garden, Beijing

⁶National Herbarium (PE), Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing

⁷State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Received: Apr. 15th, 2024; accepted: Jul. 22nd, 2024; published: Jul. 30th, 2024

Abstract

Accurate identification of genetic diversity is essential for utilization of plant resources and further scientific researches. In this paper, 995 taxon-specific variable nucleotide characters in the complete chloroplast genome of 7 species from the genus *Lilium* L. were used as molecular traits to identify the genetic resources of this plant genus and to compile a molecular classification key for the first time. There are differences in aspects of amount and base composition of variable nucleotide characters among the species. The amount of taxon-specific variable nucleotide characters in *Lilium nepalense* (791) is the highest, followed by *L. formosanum* (80), *L. hansonii* (47), *L. callosum* (28), *L. cernuum* (21), *L. brownii* (19) and *L. lancifolium* (9). The proportion of **A** (27.05%) or **T** (32.24%) is higher than that of **C** (19.97%) or **G** (20.73%) in *Lilium nepalense*. The proportion of **A** (26.25%) or **T** (31.25%) is also higher than that of **C** (22.50%) or **G** (20.00%) in *L. formosanum*. In *L. hansonii*, the highest proportion of **A** (42.55%) is 5 times that of **C** (8.51%) and above 2.8 times that of **G** (14.89%); the proportion of **T** (34.04%) is 4 times that of **C**, and more than 2.2 times that of **G**. The proportion of **A** (17.86%) is lower than that of **T** (25.00%), **C** (28.57%) or **G** (28.57%) in *L. callosum*. The proportion of **T** (47.62%) is more than 2 times that of **A** (19.05%), **C** (19.05%) or **G** (14.29%) in *L. cernuum*. The highest proportion of **A** (47.62%) is 9 times the lowest value of **C** (5.26%), and the proportion of **G** (15.79%) or **T** (31.57%) is about 3 times or 6 times that of **C** in *L. brownii*. The proportion of **C** (44.44%) is about 4 times that of **G** (11.11%) in *L. lancifolium*. Our results indicated that taxon-specific variable nucleotide characters from the chloroplast genomes could be used for distinguishing different species successfully in the genus *Lilium*. The status of *Lilium* plant specimens collected in the past over 120 years in China is investigated and problems and possible strategies are discussed. This study is valuable for taxonomic revision, conservation and utilization of *Lilium* plant germplasm resources.

Keywords

Liliaceae, *Lilium* L., Plant Resources, Complete Chloroplast Genome, Variable Nucleotide Character, Molecular Identification

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

百合属(*Lilium* L.)植物(百合科 Liliaceae)是具有多年生地下鳞茎(球根)的单子叶草本植物,主要分布在北半球的温带地区。根据表型特征(即种子、叶片、叶柄、珠芽、鳞茎、鳞片数目和质地、花被、花药的着生方式、蜜腺、茎、柱头和茎生根、果实的形状等)进行分类,全球约有 134 种/亚种/变种[1] [2] [3]。食用的栽培百合品种,肉质鳞片的味道不苦,是蔬菜中的佳品,例如,兰州百合 *L. davidii* var. *willmottiae* (E.H. Wilson) Raffill。名菜名吃有西芹百合、百合花煎鸡蛋、百合鸡片、百合粥等。美洲的印第安人挖取地下的百合鳞茎充饥。百合的花朵和鳞茎也用于酿酒或提取天然色素。花蕾可阴干剪碎泡茶,清香味美。百合的鳞片和花也是常用的中药材,例如,百合 *L. brownii* F. E. Brown var. *viridulum* Baker、卷丹 *L. lancifolium* Thunb.、山丹 *L. pumilum* Redouté。“百合”的词意是指鳞茎由多数鳞片叠合而成,常用不同颜色的百合来表现纯洁、高贵、吉祥、祝福等寓意,许多民间传说、诗词歌赋、美术工艺品取材于百合。百合的花色艳丽、花姿独特,观赏价值高,是全球畅销的鲜切花。鳞片也可制成有机百合干、百合粉,具有很高的商业价值和开发前景。百合是药食同源和观赏兼用的植物,作为名药和蔬菜种植已有约 3800 年的历史[4]-[13]。

在实际中,同名异物和同物异名导致资源名称混乱使用,制约着相关科研和产业发展。百合属植物资源多样性一直是研究的热点。随着新技术的出现,百合属植物的鉴定研究经历了形态学、细胞学、孢粉学、化学成分、RAPD、PCR-RFLP、AP-PCR、SSCP、SSR 标记、DNA 条形码技术等阶段,但是,都存在稳定性差、通用性不佳、信息量有限的问题[4]-[31]。近年,叶绿体全基因组序列数据提供的遗传变异位点稳定,信息量较大,实验成本较低、方法较简单,已广泛应用于植物的物种鉴定和系统发育研究[4]-[31]。为促进百合属植物的资源保护、可持续利用和相关产业发展,本文报道在分子水平上鉴定百合属植物资源遗传多样性的一种新方法。

2. 材料与方法

选取 14 份样品代表百合属的 7 个种。供试样品名称及其叶绿体基因组的序列号见表 1 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>)。每个种取样 2 个体。利用 MAFFT v7.055b 软件[32] (<http://mafft.cbrc.jp/alignment/software>)获得比对序列矩阵。比对后的序列矩阵的长度为 154,418 个核苷酸,由左向右,左端(5'-端)起的第 1 个核苷酸字母的位置编号为 1,最右端的核苷酸字母的位置编号为 154,418。用 MEGA 7.0 [33]和 DnaSP v6 软件[34] (<http://www.ub.edu/dnasp/>)检测核苷酸变异位点(见图 1,表 2)。仅保留种间存在差异且种内个体间一致的变异位点代表物种的特有核苷酸变异位点,作为分子分类性状,利用本团队研发的方法[16]-[31],编制百合属供试样品的分子分类检索表(见图 1)。百合科的大百合 *Cardiocrinum cordatum* Makino (大百合属 *Cardiocrinum* (Endl.) Lindl.)和假百合 *Notholirion bulbuliferum* (Lingelsh.) Stearn (假百合属 *Notholirion* Wall. ex Voigt & Boiss.)为外类群(见表 1 和图 2),用 MEGA 7.0 软件的 Tamura 3-parameter model 参数模型推断系统发生关系(见图 2)。

1a. Type A₁₂₉T₃₂₅G₇₂₄A₁₁₀₈A₁₁₇₅T₁₃₂₉T₁₃₄₁C₁₄₅₇T₁₅₃₈A₁₆₉₆C₁₇₀₀A₁₇₁₆A₁₇₂₀T₁₈₈₄G₁₈₉₁G₂₀₁₅T₂₂₄₀C₂₂₅₅
G₂₃₄₀C₂₄₅₆C₂₄₇₂G₂₆₀₄G₂₈₉₂C₃₀₃₂T₃₂₆₅A₃₃₃₂G₃₅₅₇T₃₆₆₀C₃₇₁₀A₃₈₀₄C₃₈₃₆C₃₈₉₈A₄₁₃₉T₄₁₆₁A₄₄₃₇C₄₇₁₇A₄₇₄₁G₄₇₈₁
G₄₇₉₉A₄₈₁₀T₄₈₉₅G₅₀₁₈G₅₀₂₈C₅₁₇₃C₅₂₁₃G₅₃₁₄C₅₃₁₈C₅₅₆₇T₅₅₈₁T₅₅₈₄A₅₅₈₅C₅₈₅₆C₆₀₆₈G₆₁₄₇A₆₂₀₈T₆₃₆₆C₆₃₆₈T₆₄₆₀
C₆₇₈₃G₆₉₁₂G₇₁₁₇A₇₄₈₂T₇₅₈₄G₇₆₉₁C₇₇₅₅G₇₈₉₄C₇₈₉₅A₇₉₀₀A₇₉₀₂C₇₉₄₁T₈₁₅₅T₈₁₅₇T₈₁₆₆T₈₁₇₆T₈₁₈₈G₈₂₀₂A₈₂₁₅A₈₂₁₆
C₈₂₇₀T₈₃₈₈T₈₃₈₉C₈₃₉₀T₈₃₉₉A₈₈₅₆A₈₉₅₆T₉₁₁₅G₉₁₁₈A₉₄₅₄T₉₅₈₁A₉₆₀₃G₉₆₁₁T₉₈₄₄G₁₀₀₀₁G₁₀₂₄₇G₁₀₃₇₃C₁₀₉₀₄C₁₁₀₂₄
T₁₁₅₂₈A₁₁₈₂₃T₁₁₉₄₅C₁₁₉₉₄T₁₂₀₂₆T₁₂₄₂₀A₁₂₄₂₂C₁₂₄₄₄G₁₂₆₆₂A₁₂₇₄₆C₁₂₇₄₈G₁₂₇₇₉G₁₂₈₆₂A₁₂₉₁₉A₁₃₂₇₆T₁₃₅₁₈A₁₃₅₃₇
C₁₃₆₈₃T₁₃₈₀₇A₁₃₉₅₂C₁₄₂₁₄A₁₄₂₉₄G₁₄₃₅₆G₁₄₄₇₀A₁₄₅₁₄C₁₄₅₈₂T₁₄₈₃₉T₁₄₉₄₇T₁₅₂₂₃G₁₅₂₂₉T₁₅₄₉₅C₁₅₇₂₃C₁₅₇₈₆C₁₆₁₅₈
C₁₆₁₆₆A₁₆₃₀₈G₁₆₅₁₁C₁₆₅₈₃T₁₆₅₉₄C₁₆₆₅₁A₁₆₈₄₃A₁₇₁₀₄G₁₇₁₄₀T₁₇₁₄₁G₁₇₁₈₅T₁₇₂₄₂A₁₇₃₅₈G₁₇₃₉₂G₁₇₆₀₆G₁₇₆₇₂C₁₇₉₃₇
G₁₈₂₀₅C₁₈₃₇₃T₁₈₄₆₉C₁₈₅₀₅C₁₈₅₆₂T₁₈₆₆₀C₁₈₇₁₈T₁₈₉₅₁G₁₈₉₅₂A₁₈₉₅₇T₁₉₀₆₃A₁₉₄₈₀G₁₉₆₇₆G₂₀₃₈₀G₂₀₄₇₉T₂₀₅₂₂T₂₀₈₈₄
T₂₁₀₇₃G₂₁₂₇₃A₂₁₃₉₀T₂₁₄₅₇T₂₁₅₅₃G₂₁₆₇₉T₂₁₉₇₅A₂₂₀₇₅T₂₂₇₄₈T₂₂₇₈₃T₂₂₈₃₁T₂₃₀₉₄C₂₃₁₃₀C₂₃₁₈₃G₂₃₂₈₀A₂₃₅₈₆A₂₃₆₁₀
T₂₃₇₀₁T₂₄₅₄₃C₂₄₆₂₉A₂₄₇₆₀A₂₄₇₉₃T₂₅₅₁₄A₂₅₅₃₈G₂₅₅₉₂T₂₅₉₄₃A₂₆₅₆₃T₂₆₆₁₈C₂₆₆₉₃C₂₆₆₉₈T₂₆₈₃₇C₂₇₀₃₂C₂₇₂₀₁A₂₇₃₁₉
A₂₇₃₈₆A₂₇₅₃₃T₂₇₅₃₆A₂₇₅₄₄G₂₇₈₇₄T₂₇₈₇₆T₂₇₈₈₃T₂₈₄₂₁G₂₈₇₁₁A₂₈₇₄₅G₂₈₇₇₉T₂₈₉₀₅T₂₈₉₀₆A₂₉₁₁₂A₂₉₁₆₀G₂₉₂₇₁G₂₉₃₂₀
A₂₉₄₂₅C₂₉₈₈₂A₃₀₀₁₆A₃₀₀₃₂T₃₀₀₈₁G₃₀₄₆₁A₃₀₅₃₄C₃₀₅₃₇T₃₀₅₃₈A₃₀₇₀₅T₃₀₇₆₈A₃₀₇₇₈G₃₀₈₀₃A₃₀₉₃₄G₃₀₉₄₉C₃₁₀₄₀T₃₁₀₄₇
T₃₁₀₄₉G₃₁₁₁₁G₃₁₁₇₆G₃₁₃₁₃A₃₁₃₇₂A₃₁₄₅₉G₃₁₄₆₄T₃₁₅₇₂T₃₁₆₅₁T₃₁₉₄₄G₃₂₀₀₈A₃₂₀₀₉T₃₂₀₁₄C₃₂₀₁₅A₃₂₁₇₇T₃₂₃₅₆T₃₃₀₀₁
A₃₃₄₅₅A₃₃₉₁₄C₃₄₁₀₉G₃₄₄₃₃C₃₄₅₆₅T₃₄₆₂₉T₃₄₇₈₅C₃₅₁₉₃G₃₅₂₀₁C₃₅₂₅₃G₃₅₂₅₄A₃₅₂₅₅A₃₅₂₅₆G₃₅₆₈₄A₃₅₆₈₅C₃₅₈₅₆G₃₅₈₇₉
C₃₅₈₈₁T₃₅₉₆₉A₃₆₁₃₈T₃₆₂₂₂A₃₆₃₁₈C₃₆₃₄₅A₃₆₆₀₁C₃₆₉₄₆A₃₈₈₀₇T₃₈₉₆₀G₃₉₃₈₃G₃₉₃₈₉A₄₀₀₀₆G₄₀₂₅₉C₄₀₂₆₈A₄₀₂₈₉A₄₀₅₅₁
C₄₀₉₉₃G₄₁₃₆₃A₄₁₄₉₁G₄₁₇₈₅T₄₁₈₀₁T₄₂₂₄₂C₄₂₅₇₅T₄₂₈₈₇C₄₃₂₆₄C₄₃₂₆₅G₄₃₂₈₄T₄₃₃₅₄T₄₃₄₇₈G₄₃₇₅₉T₄₃₈₀₀A₄₃₈₅₇T₄₃₈₆₅
A₄₃₈₇₄T₄₃₈₈₈C₄₄₀₂₂T₄₄₂₇₉A₄₄₃₇₈T₄₄₃₈₀C₄₄₃₈₂G₄₄₆₇₁T₄₄₈₄₂T₄₄₈₇₅G₄₅₁₀₇G₄₅₂₂₄A₄₅₅₃₈T₄₅₅₅₁T₄₅₅₅₅T₄₅₆₂₄T₄₅₈₁₄
A₄₅₈₂₁A₄₅₈₂₂G₄₅₈₂₃A₄₅₈₂₅T₄₅₈₂₆T₄₅₈₂₇T₄₅₈₈₀T₄₅₉₀₂A₄₆₂₂₁C₄₆₅₂₈G₄₆₅₄₅A₄₆₅₅₈C₄₆₆₆₇T₄₆₉₀₀C₄₇₁₈₃C₄₇₂₂₇A₄₇₃₀₈
G₄₇₃₆₃G₄₇₄₉₂T₄₇₅₁₆G₄₇₅₉₅A₄₇₆₁₄A₄₇₆₄₅G₄₇₇₀₄G₄₇₇₂₈A₄₇₇₃₆G₄₇₈₉₀G₄₇₉₇₈A₄₈₁₇₂T₄₈₁₇₉G₄₈₅₈₂T₄₈₆₆₁T₄₈₆₇₅T₄₈₇₂₈
G₄₈₈₇₂T₄₉₁₇₂A₄₉₆₁₀C₄₉₇₀₆T₄₉₈₇₆A₅₀₂₆₅A₅₀₄₁₀A₅₀₄₈₇T₅₀₅₃₃A₅₁₀₂₈A₅₁₄₅₈T₅₁₄₇₈C₅₁₄₈₇T₅₁₅₂₂G₅₂₂₉₀A₅₃₂₅₀C₅₃₃₀₉
G₅₃₃₆₇A₅₃₃₉₆T₅₃₅₂₃G₅₃₈₆₀C₅₃₉₀₇A₅₄₅₁₆G₅₄₆₅₄T₅₄₈₂₃T₅₄₉₆₄C₅₅₁₉₁A₅₅₃₁₇A₅₅₆₁₆C₅₅₆₁₇C₅₅₆₄₉T₅₅₈₃₅G₅₅₉₄₇T₅₆₁₁₁
G₅₆₂₂₉T₅₆₄₄₃A₅₆₅₈₅G₅₆₆₁₂A₅₆₆₁₃T₅₆₆₂₄C₅₆₇₁₂A₅₆₇₂₄G₅₆₇₆₇T₅₇₀₇₈A₅₇₅₇₅T₅₇₆₀₄A₅₈₁₇₇A₅₈₁₈₀G₅₈₃₆₀A₅₈₄₃₁C₅₈₆₀₈
A₅₈₈₀₂C₅₉₂₇₅G₅₉₄₀₃T₅₉₄₅₇A₅₉₅₀₇C₅₉₅₅₁T₅₉₇₅₃A₅₉₇₅₆G₅₉₇₅₇T₅₉₇₅₈C₅₉₇₅₉T₆₀₁₄₄T₆₀₃₃₂C₆₀₅₇₆T₆₀₈₃₀T₆₀₈₃₁T₆₁₀₁₆
T₆₁₁₃₉A₆₁₃₂₀G₆₁₇₅₈C₆₁₉₂₀G₆₁₉₇₁C₆₂₀₇₆A₆₂₃₇₈T₆₂₃₈₀A₆₂₃₈₁T₆₂₃₈₃T₆₂₃₈₄T₆₂₃₈₅C₆₂₃₈₈C₆₂₃₉₀T₆₂₄₅₇A₆₂₆₁₄A₆₂₇₆₆
C₆₃₇₀₄T₆₃₇₄₀T₆₃₇₄₉G₆₃₇₇₁C₆₃₇₉₃T₆₃₈₂₃C₆₃₈₂₅A₆₃₉₉₅T₆₄₂₄₅G₆₄₂₇₇T₆₄₄₁₂T₆₄₄₂₃A₆₄₄₉₅A₆₄₅₂₃A₆₄₅₆₁T₆₄₅₆₂C₆₄₅₉₄
T₆₄₆₂₀T₆₅₀₉₁G₆₅₂₅₆G₆₅₃₃₆A₆₅₄₅₈T₆₅₅₄₆A₆₅₇₇₂G₆₅₈₂₃A₆₅₈₇₃G₆₅₈₈₉C₆₅₉₈₃C₆₆₀₂₄A₆₆₁₆₈G₆₆₂₅₁G₆₆₂₇₄G₆₆₂₉₅T₆₆₃₄₀
G₆₆₃₉₃A₆₆₆₂₁T₆₆₇₅₉G₆₆₇₈₅A₆₆₈₅₉T₆₆₈₆₀T₆₇₁₃₀A₆₇₄₄₇A₆₇₅₉₄C₆₇₆₇₀T₆₇₆₇₁T₆₇₇₇₉A₆₇₈₇₀A₆₇₈₉₃T₆₇₉₃₈A₆₈₄₅₄A₆₉₀₃₈
C₆₉₁₉₀T₆₉₈₆₇C₇₀₃₁₅T₇₀₃₂₄T₇₀₃₃₂T₇₀₃₅₂A₇₀₃₆₆C₇₀₆₅₉C₇₀₇₀₇A₇₀₈₂₃G₇₀₉₀₂G₇₁₃₃₅A₇₁₈₀₇C₇₁₉₅₂C₇₂₁₁₁T₇₂₃₆₆A₇₃₀₅₁

A73062A73329A73502G73840G73916C73946G74374T74617C74866C75307T75797A75916A76059T76129A76139A76148A76276
 C76377G76534A76759C76890T77009C77021G77066T77085C77114A77189A77197G77201G77270A77342T77666A77843C78086
 A78452T78756A78908T78941C79052G79251T79264G79328C79356C79851T79879A79885C79940A79964A80163T80422A80545
 T81146T81211T81243C81519T81663T81733A81796A82059A82140G82263C82266G82416A82547G82904C82969C83272A83279
 T83361G83407A83690G84188T84641C87316C88820C89355T90105T93341C94446G95735G96346G96384T97549T98973A99458
 C99631A100361C102178A107412T107415C107416T107417T107419A107420C107422T107423C107426C107427A107429G107430
 G107432A107433T107434A107437T107706T107715T108689G110063T110064A110171G110237C110249T110252T110256G110279
 T110404T110429T110515T110581T110856G111326G111373A111434A111689T111691C111890T112211A112309A112394T112443
 T112459C112473G112531G112613G112651T112672T112712G112748G113105A113155T113159A113286G113423C113482G113554
 C113576T113612T113651A113958T114355T114530G114583G115304C115319T115429C115584A115920T115976A116176G116376
 A116539A116807T117170C117561T117717T117888T117975C118063T118417T118723T118965T119534T119547C119557T119912
 A119946G120191A120242G120342A120502T120667A120749T120890C121118T121148C121274T121298T121373T121467C121483
 A121649T121700T121791C122056T122538G122604G122739A122794C122929T122954G123037C123071T123072A123091C123247
 T123249T123253T123385A123433A123521T123713G123744T123896A124219G124676T124677C124705C124780A124936T124992
 T125120G125138A125200G125352T125409T125581T125822A125846T126067T126191T126385C126531A126683A126792A126793
 T126820C126825C127087A127297C127353A127364A127414A127442C127463T127614T127647G127652G127792T127805A129250
 A130224A130233T130502A130505T130506C130507C130509T130510G130512G130513A130516G130517T130519A130520A130522
 G130523A130524T130527G135761T137578G138308T138481A138966A140390C141555C141593C142204G143493A144598A147834
 G148584G149119G150623A153298C153751T154249 紫斑百合 *Lilium nepalense*

1b. Type G129G325A724G1108G1175A1329C1341T1457A1538T1696A1700T1716T1720A1884A1891A2015G2240G2255
 A2340T2456A2472A2604A2892T3032C3265G3332T3557C3660A3710G3804T3836G3898C4139A4161G4437G4717T4741A4781
 A4799C4810A4895A5018T5028T5173A5213A5314A5318T5567C5581A5584T5585A5856T6068T6147C6208A6366A6368C6460
 T6783A6912T7117C7482C7584A7691T7755A7894G7895G7900T7902T7941C8155C8157C8166C8176C8188A8202T8215T8216
 A8270A8388A8389A8390A8399G8856G8956C9115A9118T9454A9581T9603A9611C9844A10001A10247A10373T10904A11024
 G11528G11823A11945A11994A12026A12420T12422T12444A12662G12746A12748T12779A12862G12919G13276G13518G13537
 T13683A13807G13952A14214G14294A14356A14470G14514G14582A14839A14947C15223A15229C15495T15723A15786T16158
 A16166G16308C16511T16583C16594T16651G16843G17104A17140A17141A17185C17242G17358A17392C17606C17672T17937
 A18205G18373C18469T18505A18562C18660A18718C18951A18952G18957C19063G19480A19676A20380A20479C20522C20884
 C21073A21273G21390C21457C21553A21679C21975G22075A22748C22783G22831G23094A23130T23183A23280G23586G23610

C23701 C24543 T24629 T24760 G24793 C25514 G25538 A25592 C25943 G26563 G26618 T26693 T26698 A26837 T27032 T27201 T27319
G27386 G27533 G27536 G27544 T27874 G27876 C27883 C28421 C28711 G28745 A28779 A28905 A28906 G29112 G29160 T29271 T29320
G29425 T29882 G30016 G30032 C30081 A30461 G30534 A30537 C30538 C30705 A30768 G30778 A30803 T30934 A30949 T31040 G31047
C31049 T31111 T31176 A31313 G31372 G31459 T31464 C31572 C31651 C31944 A32008 G32009 G32014 A32015 C32177 C32356 C33001
G33455 G33914 T34109 A34433 A34565 C34629 G34785 G35193 A35201 T35253 C35254 T35255 C35256 T35684 C35685 T35856 A35879
T35881 C35969 C36138 C36222 G36318 T36345 G36601 T36946 G38807 C38960 A39383 A39389 G40006 T40259 T40268 G40289 G40551
T40993 A41363 C41491 A41785 A41801 C42242 T42575 C42887 A43264 A43265 C43284 G43354 C43478 A43759 A43800 G43857 C43865
G43874 C43888 T44022 G44279 T44378 C44380 T44382 A44671 G44842 C44875 A45107 A45224 C45538 A45551 A45555 G45624 C45814
T45821 T45822 A45823 G45825 A45826 A45827 C45880 G45902 G46221 T46528 A46545 G46558 G46667 C46900 A47183 T47227 G47308
A47363 T47492 C47516 C47595 C47614 G47645 T47704 A47728 G47736 A47890 A47978 G48172 C48179 A48582 C48661 C48675 C48728
C48872 C49172 G49610 T49706 C49876 T50265 G50410 C50487 A50533 C51028 G51458 C51478 T51487 C51522 T52290 G53250 T53309
A53367 G53396 G53523 T53860 T53907 G54516 A54654 G54823 G54964 T55191 C55317 T55616 A55617 A55649 C55835 T55947 C56111
A56229 G56443 C56585 T56612 C56613 G56624 T56712 G56724 A56767 C57078 C57575 C57604 T58177 T58180 T58360 G58431 T58608
C58802 T59275 A59403 G59457 G59507 T59551 A59753 G59756 T59757 C59758 T59759 C60144 C60332 T60576 C60830 C60831 C61016
G61139 G61320 A61758 T61920 A61971 T62076 G62378 G62380 T62381 A62383 A62384 A62385 A62388 T62390 C62457 G62614 G62766
A63704 C63740 C63749 A63771 T63793 G63823 A63825 G63995 G64245 T64277 C64412 C64423 C64495 G64523 T64561 A64562 T64594
C64620 C65091 A65256 A65336 G65458 C65546 T65772 A65823 T65873 A65889 A65983 T66024 G66168 A66251 T66274 A66295 C66340
T66393 G66621 C66759 C66785 C66859 G66860 C67130 G67447 C67594 A67670 G67671 C67779 C67870 C67893 C67938 C68454 C69038
T69190 C69867 T70315 A70324 A70332 C70352 T70366 T70659 G70707 C70823 T70902 A71335 G71807 T71952 T72111 C72366 G73051
G73062 G73329 G73502 A73840 A73916 T73946 T74374 G74617 T74866 A75307 C75797 G75916 G76059 G76129 C76139 G76148 C76276
T76377 T76534 G76759 T76890 A77009 A77021 T77066 C77085 T77114 G77189 G77197 A77201 A77270 G77342 G77666 G77843 T78086
G78452 C78756 G78908 C78941 T79052 A79251 C79264 A79328 T79356 A79851 A79879 T79885 T79940 G79964 C80163 G80422 G80545
G81146 C81211 C81243 T81519 G81663 C81733 G81796 C82059 G82140 A82263 T82266 A82416 G82547 A82904 T82969 A83272 C83279
A83361 T83407 G83690 A84188 C84641 A87316 T88820 T89355 C90105 C93341 T94446 A95735 A96346 A96384 C97549 C98973 G99458
A99631 G100361 G102178 T107412 A107415 T107416 C107417 C107419 T107420 G107422 G107423 A107426 G107427 T107429 A107430
A107432 G107433 A107434 T107437 G107706 C107715 C108689 A110063 A110064 T110171 C110237 A110249 G110252 C110256 A110279
C110404 C110429 C110515 C110581 G110856 A111326 A111373 G111434 G111689 C111691 T111890 C112211 G112309 C112394 A112443
A112459 A112473 T112531 T112613 T112651 A112672 C112712 A112748 A113105 T113155 A113159 G113286 T113423 T113482 A113554
A113576 C113612 C113651 G113958 C114355 A114530 T114583 T115304 A115319 G115429 T115584 G115920 C115976 G116176 A116376

G₁₁₆₅₃₉G₁₁₆₈₀₇C₁₁₇₁₇₀T₁₁₇₅₆₁C₁₁₇₇₁₇C₁₁₇₈₈₈C₁₁₇₉₇₅T₁₁₈₀₆₃C₁₁₈₄₁₇C₁₁₈₇₂₃C₁₁₈₉₆₅C₁₁₉₅₃₄C₁₁₉₅₄₇G₁₁₉₅₅₇C₁₁₉₉₁₂
 G₁₁₉₉₄₆T₁₂₀₁₉₁T₁₂₀₂₄₂A₁₂₀₃₄₂G₁₂₀₅₀₂C₁₂₀₆₆₇G₁₂₀₇₄₉C₁₂₀₈₉₀T₁₂₁₁₁₈C₁₂₁₁₄₈T₁₂₁₂₇₄C₁₂₁₂₉₈C₁₂₁₃₇₃G₁₂₁₄₆₇T₁₂₁₄₈₃
 C₁₂₁₆₄₉C₁₂₁₇₀₀C₁₂₁₇₉₁A₁₂₂₀₅₆C₁₂₂₅₃₈A₁₂₂₆₀₄T₁₂₂₇₃₉T₁₂₂₇₉₄T₁₂₂₉₂₉C₁₂₂₉₅₄A₁₂₃₀₃₇A₁₂₃₀₇₁C₁₂₃₀₇₂T₁₂₃₀₉₁A₁₂₃₂₄₇
 A₁₂₃₂₄₉A₁₂₃₂₅₃G₁₂₃₃₈₅C₁₂₃₄₃₃G₁₂₃₅₂₁G₁₂₃₇₁₃T₁₂₃₇₄₄C₁₂₃₈₉₆G₁₂₄₂₁₉T₁₂₄₆₇₆A₁₂₄₆₇₇A₁₂₄₇₀₅T₁₂₄₇₈₀G₁₂₄₉₃₆C₁₂₄₉₉₂
 G₁₂₅₁₂₀A₁₂₅₁₃₈C₁₂₅₂₀₀T₁₂₅₃₅₂C₁₂₅₄₀₉G₁₂₅₅₈₁G₁₂₅₈₂₂C₁₂₅₈₄₆C₁₂₆₀₆₇C₁₂₆₁₉₁C₁₂₆₃₈₅T₁₂₆₅₃₁G₁₂₆₆₈₃C₁₂₆₇₉₂G₁₂₆₇₉₃
 G₁₂₆₈₂₀T₁₂₆₈₂₅T₁₂₇₀₈₇T₁₂₇₂₉₇T₁₂₇₃₅₃C₁₂₇₃₆₄G₁₂₇₄₁₄C₁₂₇₄₄₂T₁₂₇₄₆₃C₁₂₇₆₁₄C₁₂₇₆₄₇A₁₂₇₆₅₂T₁₂₇₇₉₂C₁₂₇₈₀₅G₁₂₉₂₅₀
 G₁₃₀₂₂₄C₁₃₀₂₃₃A₁₃₀₅₀₂T₁₃₀₅₀₅C₁₃₀₅₀₆T₁₃₀₅₀₇T₁₃₀₅₀₉A₁₃₀₅₁₀C₁₃₀₅₁₂T₁₃₀₅₁₃C₁₃₀₅₁₆C₁₃₀₅₁₇A₁₃₀₅₁₉G₁₃₀₅₂₀G₁₃₀₅₂₂
 A₁₃₀₅₂₃T₁₃₀₅₂₄A₁₃₀₅₂₇C₁₃₅₇₆₁C₁₃₇₅₇₈T₁₃₈₃₀₈C₁₃₈₄₈₁G₁₃₈₉₆₆G₁₄₀₃₉₀T₁₄₁₅₅₅T₁₄₁₅₉₃T₁₄₂₂₀₄A₁₄₃₄₉₃G₁₄₄₅₉₈G₁₄₇₈₃₄
 A₁₄₈₅₈₄A₁₄₉₁₁₉T₁₅₀₆₂₃G₁₅₃₂₉₈T₁₅₃₇₅₁C₁₅₄₂₄₉ 紫斑百合之外的 6 个种

The six species other than *L. nepalense*

2a. Type T₂₃₄₉C₃₁₁₇G₅₆₀₈T₅₆₆₇T₅₇₅₅T₇₃₁₇C₈₀₇₂T₈₆₆₁A₉₆₄₇G₁₂₃₀₂A₁₂₃₉₁T₁₄₀₈₈T₁₄₈₄₈C₁₅₃₂₆A₁₆₅₇₀C₁₈₅₀₂
 C₁₈₆₈₄T₁₈₆₉₄T₂₂₅₇₉T₂₈₁₂₅A₂₈₇₆₉C₄₂₂₄₃A₄₃₇₅₈C₄₃₈₇₉G₄₇₂₁₅G₄₉₉₆₈G₅₈₆₂₅A₆₀₅₂₄G₆₀₆₄₇A₆₁₃₄₁G₆₂₆₈₀T₆₅₄₇₆A₆₅₅₅₃
 C₆₅₆₈₈C₆₆₅₃₁T₆₈₂₁₀T₆₈₃₃₀C₆₉₀₃₂C₇₀₀₁₀T₇₀₃₆₈T₇₁₆₉₁G₇₂₈₇₆T₇₃₄₁₃A₇₃₄₂₄A₇₄₁₆₄T₇₄₇₀₂T₇₅₃₁₆T₇₆₉₆₄G₇₈₆₈₃T₇₉₀₆₀
 G₇₉₈₈₆G₈₀₆₂₄G₈₂₆₄₀A₈₇₂₆₇T₈₈₃₃₇A₁₁₂₂₄₉C₁₁₂₉₀₅C₁₁₂₉₅₃C₁₁₃₁₆₀A₁₁₃₁₆₁A₁₁₃₁₆₂T₁₁₃₁₆₃A₁₁₃₄₃₁T₁₁₄₃₅₉C₁₁₄₃₆₀
 A₁₁₄₃₆₁G₁₁₄₆₇₃C₁₁₈₆₃₃A₁₁₉₃₅₆G₁₂₃₀₀₅A₁₂₃₄₇₇C₁₂₃₉₂₅A₁₂₄₁₅₂A₁₂₄₈₁₃G₁₂₆₄₃₅C₁₂₆₆₅₈T₁₂₆₈₉₈G₁₂₇₁₆₀A₁₄₉₆₀₂T₁₅₀₆₇₂
 台湾百合 *Lilium formosanum*

2b. Type G₂₃₄₉A₃₁₁₇A₅₆₀₈C₅₆₆₇A₅₇₅₅C₇₃₁₇A₈₀₇₂C₈₆₆₁C₉₆₄₇T₁₂₃₀₂G₁₂₃₉₁C₁₄₀₈₈C₁₄₈₄₈A₁₅₃₂₆G₁₆₅₇₀T₁₈₅₀₂
 T₁₈₆₈₄C₁₈₆₉₄C₂₂₅₇₉C₂₈₁₂₅G₂₈₇₆₉A₄₂₂₄₃T₄₃₇₅₈A₄₃₈₇₉T₄₇₂₁₅T₄₉₉₆₈A₅₈₆₂₅T₆₀₅₂₄A₆₀₆₄₇G₆₁₃₄₁A₆₂₆₈₀G₆₅₄₇₆T₆₅₅₅₃
 A₆₅₆₈₈A₆₆₅₃₁C₆₈₂₁₀C₆₈₃₃₀A₆₉₀₃₂T₇₀₀₁₀A₇₀₃₆₈C₇₁₆₉₁T₇₂₈₇₆C₇₃₄₁₃T₇₃₄₂₄G₇₄₁₆₄G₇₄₇₀₂G₇₅₃₁₆C₇₆₉₆₄T₇₈₆₈₃C₇₉₀₆₀
 T₇₉₈₈₆A₈₀₆₂₄T₈₂₆₄₀G₈₇₂₆₇C₈₈₃₃₇T₁₁₂₂₄₉T₁₁₂₉₀₅A₁₁₂₉₅₃A₁₁₃₁₆₀T₁₁₃₁₆₁T₁₁₃₁₆₂G₁₁₃₁₆₃G₁₁₃₄₃₁G₁₁₄₃₅₉A₁₁₄₃₆₀T₁₁₄₃₆₁
 T₁₁₄₆₇₃A₁₁₈₆₃₃G₁₁₉₃₅₆T₁₂₃₀₀₅T₁₂₃₄₇₇A₁₂₃₉₂₅G₁₂₄₁₅₂T₁₂₄₈₁₃A₁₂₆₄₃₅T₁₂₆₆₅₈C₁₂₆₈₉₈T₁₂₇₁₆₀G₁₄₉₆₀₂C₁₅₀₆₇₂
 台湾百合之外的 6 个种 The six species other than *L. formosanum*

3a. Type A₃₈₅₀A₁₇₇₇₃G₂₅₆₂₂A₂₈₃₃₇G₃₂₁₁₁A₃₄₂₀₅A₄₇₃₁₁A₆₉₂₂₆A₆₉₈₆₀A₈₃₄₁₈T₉₂₂₈₅T₁₁₂₄₄₅T₁₁₂₉₅₁C₁₁₄₃₈₁G₁₁₇₆₈₃
 T₁₁₈₀₄₆T₁₂₄₉₉₈T₁₂₇₄₀₈A₁₄₅₆₅₄ 野百合 *Lilium brownii*

3b. Type C₃₈₅₀G₁₇₇₇₃T₂₅₆₂₂G₂₈₃₃₇A₃₂₁₁₁G₃₄₂₀₅T₄₇₃₁₁G₆₉₂₂₆T₆₉₈₆₀G₈₃₄₁₈C₉₂₂₈₅A₁₁₂₄₄₅C₁₁₂₉₅₁A₁₁₄₃₈₁A₁₁₇₆₈₃
 C₁₁₈₀₄₆C₁₂₄₉₉₈C₁₂₇₄₀₈G₁₄₅₆₅₄ 野百合之外的 6 个种 The six species other than *L. brownii*

4a. Type A₁₃₇₃T₂₂₄₅T₃₃₉₈A₃₄₉₇G₄₀₆₁C₈₆₅₀A₁₂₁₀₆T₁₆₀₇₆A₁₈₂₃₄A₂₀₅₇₆T₂₄₄₁₃A₂₇₆₄₁G₃₅₇₀₁A₃₈₂₄₅A₄₀₃₂₅T₄₇₅₅₂
 A₄₈₄₆₄A₅₁₃₆₁G₅₅₅₃₄T₅₉₅₃₇T₅₉₈₀₉T₆₂₂₇₅T₆₄₁₉₁T₆₅₇₀₁A₆₉₃₇₈G₆₉₇₆₇G₇₀₇₆₄A₇₆₆₀₀T₇₈₁₄₆T₈₀₁₅₂A₈₀₅₅₆A₈₀₅₅₇C₈₁₁₈₆

T₁₁₁₈₄₅C₁₁₄₈₈₂A₁₁₄₈₉₂C₁₁₆₅₉₃T₁₁₇₉₁₈T₁₁₈₇₅₇T₁₂₃₀₁₅A₁₂₃₀₉₀A₁₂₃₂₃₄G₁₂₃₂₃₆G₁₂₃₂₉₃A₁₂₃₃₂₁A₁₂₃₅₀₂A₁₂₆₂₃₇

..... 竹叶百合 *Lilium hansonii*

4b. Type T₁₃₇₃A₂₂₄₅G₃₃₉₈G₃₄₉₇A₄₀₆₁T₈₆₅₀G₁₂₁₀₆A₁₆₀₇₆G₁₈₂₃₄G₂₀₅₇₆C₂₄₄₁₃G₂₇₆₄₁A₃₅₇₀₁G₃₈₂₄₅G₄₀₃₂₅G₄₇₅₅₂

T₄₈₄₆₄C₅₁₃₆₁T₅₅₅₃₄G₅₉₅₃₇C₅₉₈₀₉G₆₂₂₇₅A₆₄₁₉₁C₆₅₇₀₁T₆₉₃₇₈C₆₉₇₆₇T₇₀₇₆₄G₇₆₆₀₀C₇₈₁₄₆C₈₀₁₅₂T₈₀₅₅₆T₈₀₅₅₇A₈₁₁₈₆

C₁₁₁₈₄₅T₁₁₄₈₈₂C₁₁₄₈₉₂A₁₁₆₅₉₃C₁₁₇₉₁₈C₁₁₈₇₅₇C₁₂₃₀₁₅T₁₂₃₀₉₀T₁₂₃₂₃₄T₁₂₃₂₃₆T₁₂₃₂₉₃T₁₂₃₃₂₁G₁₂₃₅₀₂G₁₂₆₂₃₇

..... 竹叶百合之外的 6 个种 The six species other than *L. hansonii*

5a. Type G₆₉₁₁G₁₄₅₀₀A₁₄₅₄₈T₁₅₂₉₈T₁₆₁₃₄T₂₈₆₆₄A₃₁₂₂₈G₃₅₁₇₁T₄₃₁₆₆C₅₆₃₇₂T₆₅₇₆₈A₆₆₆₁₃A₆₈₄₆₇T₇₂₉₈₁T₇₇₁₇₄

C₈₁₂₂₇T₁₁₁₁₂₅C₁₂₀₃₂₈T₁₂₂₃₉₇T₁₂₃₄₀₁C₁₂₆₀₃₀ 垂花百合 *Lilium cernuum*

5b. Type T₆₉₁₁T₁₄₅₀₀G₁₄₅₄₈C₁₅₂₉₈C₁₆₁₃₄C₂₈₆₆₄C₃₁₂₂₈T₃₅₁₇₁C₄₃₁₆₆A₅₆₃₇₂A₆₅₇₆₈T₆₆₆₁₃G₆₈₄₆₇C₇₂₉₈₁G₇₇₁₇₄

A₈₁₂₂₇C₁₁₁₁₂₅T₁₂₀₃₂₈C₁₂₂₃₉₇C₁₂₃₄₀₁A₁₂₆₀₃₀ 垂花百合之外的 6 个种

The six species other than *L. cernuum*

6a. Type C₁₃₆₂₈A₁₆₀₅₈G₁₈₄₆₇C₆₇₀₀₀C₁₁₃₂₄₉T₁₁₄₉₀₁C₁₂₁₆₃₅T₁₂₃₂₂₂A₁₂₆₄₇₀ 卷丹 *Lilium lancifolium*

6b. Type A₁₃₆₂₈T₁₆₀₅₈T₁₈₄₆₇A₆₇₀₀₀A₁₁₃₂₄₉C₁₁₄₉₀₁T₁₂₁₆₃₅C₁₂₃₂₂₂G₁₂₆₄₇₀ 卷丹之外的 6 个种

The six species other than *L. lancifolium*

7a. Type G₃₁₆₅A₄₁₈₉G₆₁₈₁G₆₇₇₁G₉₆₈₅C₁₀₄₉₃T₂₀₇₁₆C₂₁₆₈₄T₃₀₃₃₇A₃₀₃₃₈C₄₈₂₉₆T₅₉₃₂₂G₆₂₆₀₇T₆₉₄₇₈A₇₆₉₉₄

A₇₉₄₀₅T₈₂₀₇₇T₈₂₄₀₄C₉₂₈₁₈G₁₀₇₆₈₆C₁₁₀₆₉₀C₁₁₁₇₀₄G₁₁₁₇₂₁C₁₁₄₈₁₁A₁₂₄₇₉₈T₁₂₇₀₇₄C₁₃₀₂₅₃G₁₄₅₁₂₁

..... 条叶百合 *Lilium callosum*

7b. Type A₃₁₆₅G₄₁₈₉T₆₁₈₁T₆₇₇₁A₉₆₈₅T₁₀₄₉₃C₂₀₇₁₆T₂₁₆₈₄A₃₀₃₃₇T₃₀₃₃₈A₄₈₂₉₆C₅₉₃₂₂T₆₂₆₀₇C₆₉₄₇₈C₇₆₉₉₄

G₇₉₄₀₅C₈₂₀₇₇C₈₂₄₀₄A₉₂₈₁₈T₁₀₇₆₈₆G₁₁₀₆₉₀G₁₁₁₇₀₄T₁₁₁₇₂₁T₁₁₄₈₁₁G₁₂₄₇₉₈C₁₂₇₀₇₄A₁₃₀₂₅₃T₁₄₅₁₂₁

..... 条叶百合之外的 6 个种 The six species other than *L. callosum*

Figure 1. Molecular taxonomic key to seven species of the genus *Lilium* L. (Liliaceae) based on the species-specific variable nucleotide characters from the complete chloroplast genome

图 1. 基于叶绿体基因组的物种特有核苷酸变异位点的百合属 7 个种的分子分类检索表

3. 结果

百合属供试样品的质体基因组的长度为 152,553 (MT261161.1, *Lilium cernuum*)~152,677 (KY748296.1, *Lilium brownii*)个核苷酸。在比对序列中,共检测到 1583 个核苷酸变异位点,占质体基因组序列全长的约 1.04%。其中,各物种的特有核苷酸变异位点数目合计为 995 个核苷酸,占变异位点总数的 62.86%。紫斑百合 *L. nepalense* 的特有变异位点的数量(791)最多,依次为台湾百合 *L. formosanum* (80)、竹叶百合 *L. hansonii* (47)、条叶百合 *L. callosum* (28)、垂花百合 *L. cernuum* (21)、野百合 *L. brownie* (19)和卷丹

Table 1. Samples and Genbank accession numbers of chloroplast genome sequences used in this study
表 1. 供试样品及叶绿体基因组序列号

	拉丁学名	中文名称	序列号
1	<i>Lilium callosum</i> Siebold et Zucc.	条叶百合	MT261160.1
2	<i>Lilium callosum</i> Siebold et Zucc.	条叶百合	KY940846.1
3	<i>Lilium lancifolium</i> Thunb.	卷丹	KY748297.1
4	<i>Lilium lancifolium</i> Thunb.	卷丹	KY940844.1
5	<i>Lilium cernuum</i> Kom.	垂花百合	MT261161.1
6	<i>Lilium cernuum</i> Kom.	垂花百合	KX354692.1
7	<i>Lilium hansonii</i> Leichtlin ex D.D.T. Moore	竹叶百合	MW900174.1
8	<i>Lilium hansonii</i> Leichtlin ex D.D.T. Moore	竹叶百合	KM103364.1
9	<i>Lilium brownii</i> F. E. Br. ex Mieliez	野百合	MK493294.1
10	<i>Lilium brownii</i> F. E. Br. ex Mieliez	野百合	KY748296.1
11	<i>Lilium formosanum</i> Wallace	台湾百合	MT261162.1
12	<i>Lilium formosanum</i> Wallace	台湾百合	MK753243.1
13	<i>Lilium nepalense</i> D. Don	紫斑百合	MW853784.1
14	<i>Lilium nepalense</i> D. Don	紫斑百合	MW136391.1
15	<i>Cardiocrinum cordatum</i> Makino	大百合*	MT261152.1
16	<i>Cardiocrinum cordatum</i> Makino	大百合*	KX575837.1
17	<i>Notholirion bulbuliferum</i> (Lingelsh.) Stearn	假百合*	MN509268.1

注：*外类群。

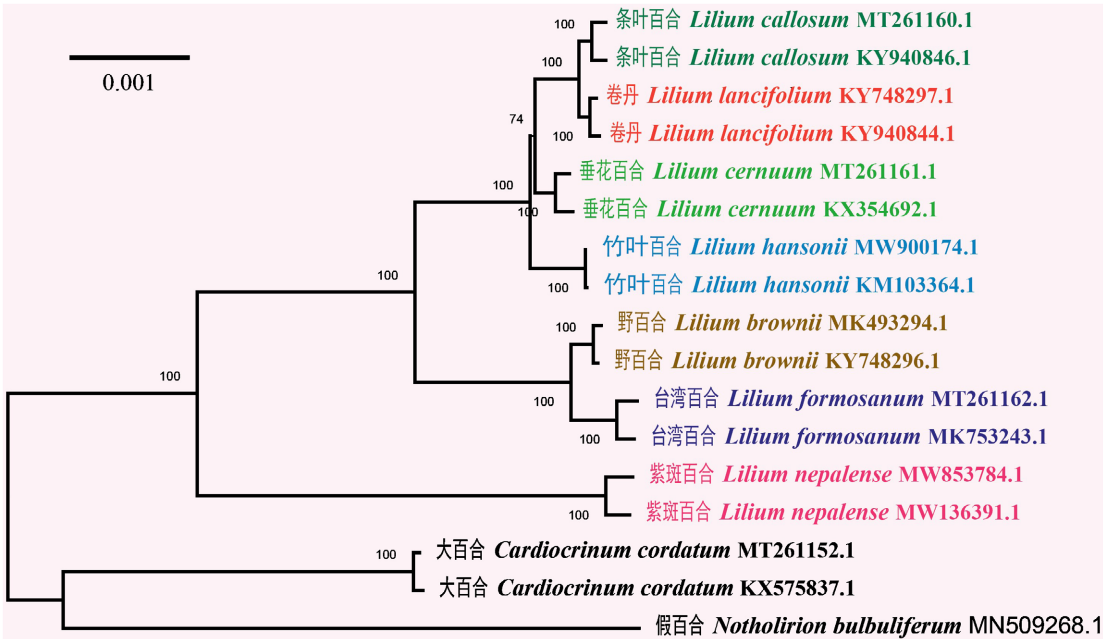


Figure 2. Phylogenetic tree of the seven *Lilium* species based on complete chloroplast genome sequences using the neighbour-joining method with the Tamura 3-parameter model. The numbers near the branches are bootstrap support values (%) of 1000 replications
图 2. 基于叶绿体基因组序列的百合属 7 个种的系统发生关系。分支图中的数字为 1000 次重复抽样的自展支持率

L. lancifolium (9)。紫斑百合的特有变异位点中, **A** (27.05%)或 **T** (32.24%)的比例明显高于 **C** (19.97%)或 **G** (20.73%)。台湾百合的特有变异位点中, **A** (26.25%)或 **T** (31.25%)的比例也是多于 **C** (22.50%)或 **G** (20.00%)。竹叶百合的特有变异位点中, **A** 的比例(42.55%)最高, 是 **C** (8.51%)的比例的 5 倍, 是 **G** (14.89%)的比例的 2.8 倍以上; **T** 的比例(34.04%)是 **C** (8.51%)的比例的 4 倍, 是 **G** (14.89%)的比例的 2.2 倍以上。条叶百合的特有变异位点中, **A** 的比例(17.86%)低于 **T** (25.00%)、**C** (28.57%)或 **G** (28.57%)。垂花百合的特有变异位点中, **T** 的比例(47.62%)为 **A** (19.05%)、**C** (19.05%)或 **G** (14.29%)的 2 倍以上。野百合的特有变异位点中, **A** 的比例(47.62%)最高, 是 **C** (5.26%)的比例的约 9 倍, **G** (15.79%)或 **T** (31.57%)的比例分别是 **C** 的比例的约 3 倍和 6 倍。卷丹的特有变异位点中, **C** 的比例(44.44%)为 **G** 的比例(11.11%)的约 4 倍(见表 2)。特有变异位点的数量和核苷酸构成存在种间差异。利用特有核苷酸变异位点, 编制分子分类检索表, 供试样品得到精准鉴定(见图 1 和图 2)。供试样品的系统发生关系树状图中, 紫斑百合位于较基部的位置(见图 2)。

Table 2. Base composition of variable nucleotide sites for classification of the seven species from the genus *Lilium* L. of the Liliaceae

表 2. 百合属植物 7 种的具有分类价值的核苷酸变异位点数目及碱基构成

*	A (%)**	T (%)**	C (%)**	G (%)**	Total*** 合计(%)
1a	214 (27.05)	255 (32.24)	158 (19.97)	164 (20.73)	791 (79.50/49.97)
1b	208 (26.30)	183 (23.14)	208 (26.30)	192 (24.27)	791 (79.50/49.97)
2a	21 (26.25)	25 (31.25)	18 (22.50)	16 (20.00)	80 (8.04/5.05)
2b	21 (26.25)	25 (31.25)	18 (22.50)	16 (20.00)	80 (8.04/5.05)
3a	9 (47.37)	6 (31.58)	1 (5.26)	3 (15.79)	19 (1.91/1.20)
3b	4 (21.05)	3 (15.79)	6 (31.58)	6 (31.58)	19 (1.91/1.20)
4a	20 (42.55)	16 (34.04)	4 (8.51)	7 (14.89)	47 (4.72/2.97)
4b	7 (14.89)	14 (29.79)	12 (25.53)	14 (29.79)	47 (4.72/2.97)
5a	4 (19.05)	10 (47.62)	4 (19.05)	3 (14.29)	21 (2.11/1.33)
5b	4 (19.05)	5 (23.81)	9 (42.86)	3 (14.29)	21 (2.11/1.33)
6a	2 (22.22)	2 (22.22)	4 (44.44)	1 (11.11)	9 (0.90/0.57)
6b	3 (33.33)	3 (33.33)	2 (22.22)	1 (11.11)	9 (0.90/0.57)
7a	5 (17.86)	7 (25.00)	8 (28.57)	8 (28.57)	28 (2.81/1.77)
7b	6 (21.43)	10 (35.71)	7 (25.00)	5 (17.86)	28 (2.81/1.77)
合计					995/1583

注: *该列的序号与检索表内的序号对应; 1a. 紫斑百合 *Lilium nepalense*, 2a.台湾百合 *Lilium formosanum*, 3a. 野百合 *Lilium brownii*, 4a. 竹叶百合 *Lilium hansonii*, 5a. 垂花百合 *Lilium cernuum*, 6a. 卷丹 *Lilium lancifolium*, 7a. 条叶百合 *Lilium callosum*; **核苷酸变异位点数(在 4 种碱基中的占比); ***此列括号中, 前一个数字是在物种特有变异位点总数(995 个)中所占的比例; 后一个数字是在全部核苷酸变异位点总数(1583 个)中所占的比例。

4. 讨论

中国数字植物标本库(<http://www.cvh.ac.cn/>)的数据显示, 百合属标本的采集记录最早是 1901 年, 经过 120 多年的积累, 来自国内外的百合属植物标本共计 11,333 份, 108 个种/亚种/变种/品种, 含形态特征图片和文字描述, 占百合属全球物种数量的约 80%。存在同物异名和同名异物现象, 例如, *Lilium*

sempervivoideum subsp. *amoenum* (E.H. Wilson ex Sealy) S. Yun Liang 是玫红百合 *Lilium amoenum* E.H. Wilson ex Sealy 的异名; *Lilium lowii* Baker 是滇百合(原变种)*Lilium bakerianum* var. *bakerianum* 的异名; *Lilium delavayi* Franch.是黄绿花滇百合(变种)*Lilium bakerianum* var. *delavayi* (Franch.) E.H. Wilson 的异名; *Lilium linceorum* H. Lév. & Vaniot 是紫红花滇百合(变种) *Lilium bakerianum* var. *rubrum* Stearn 的异名; *Lilium yunnanense* Franch.是无斑滇百合(变种) *Lilium bakerianum* var. *yunnanense* (Franch.) Sealy ex Woodcock & Stearn 的异名; *Lilium nanum* var. *brevistylum* S. Yun Liang 是短柱小百合 *Lilium brevistylum* (S. Yun Liang) S. Yun Liang 的异名; *Lilium australe* Elwes、*Lilium brownii* var. *australe* (Stapf) Stearn 是野百合 *Lilium brownii* F.E. Br. ex Mieliez 的异名; *Lilium wenshanense* L.J. Peng & F.X. Li 是野百合(原变种)*Lilium brownii* var. *brownii* 的异名; *Lilium aduncum* Elwes、*Lilium brownii* var. *colchesteri* Van Houtte ex Stapf、*Lilium brownii* var. *ferum* Stapf ex Elwes、*Lilium odorum* Planch.是百合 *Lilium brownii* var. *viridulum* Baker 的异名; *Lilium croceum* Chaix 是珠芽百合 *Lilium bulbiferum* L.的异名; *Lilium talanense* Hayata 是条叶百合(原变种)*Lilium callosum* var. *callosum* 的异名; *Lilium concolor* var. *luteum* Regel、*Lilium concolor* var. *sinicum* (Lindl. & J. Paxton) Hook. f.是渥丹 *Lilium concolor* Salisb.的异名; *Lilium concolor* var. *coridion* (Siebold & de Vriese) Baker 是渥丹(原变种)*Lilium concolor* var. *concolor* 的异名; *Lilium megalanthum* (F.T. Wang & Tang) Q.S. Sun 是大花百合(变种)*Lilium concolor* var. *megalanthum* F.T. Wang & Tang 的异名; *Lilium buschianum* G. Lodd.、*Lilium pulchellum* Fisch.是矮百合(变种)*Lilium concolor* var. *partheneion* (Siebold & de Vriese) Baker 的异名; *Lilium concolor* var. *buschianum* (Lodd.) Baker 是有斑百合(变种)*Lilium concolor* var. *pulchellum* (Fisch.) Baker 的异名; *Lilium sutchuenense* Franch.、*Lilium thayerae* E.H. Wilson 是川百合(原变种)*Lilium davidii* var. *davidii* 的异名; *Lilium willmottiae* E.H. Wilson 是兰州百合(变种)*Lilium davidii* var. *willmottiae* (E.H. Wilson) Raffill 的异名; *Lilium forrestii* W.W. Sm.、*Lilium duchartrei* var. *farreri* (Turrill) K. Krause 是宝兴百合 *Lilium duchartrei* Franch.的异名; *Lilium philippinense* var. *formosanum* (Wallace) E.H. Wilson 是台湾百合 *Lilium formosanum* A. Wallace 的异名; *Lilium makinoi* Koidz.是日本百合 *Lilium japonicum* Thunb. ex Houtt.的异名; *Lilium tigrinum* Ker Gawl.是卷丹 *Lilium lancifolium* Thunb.的异名; *Lilium maximowiczii* Regel、*Lilium leichtlinii* var. *tigrinum* (Regel) G. Nicholson、*Lilium pseudotigrinum* Carrière 是大花卷丹(变种)*Lilium leichtlinii* var. *maximowiczii* (Regel) Baker 的异名; *Lilium brownii* var. *leucanthum* Baker、*Lilium leucanthum* var. *chloraster* (Baker) E.H. Wilson、*Lilium leucanthum* var. *leiostylum* Stapf ex Elwes 是宜昌百合 *Lilium leucanthum* Baker 的异名; *Lilium huidongense* J.M. Xu、*Lilium ningnanense* J.M. Xu 是丽江百合 *Lilium lijiangense* L.J. Peng 的异名; *Lilium lophophorum* form *wardii* (Balf.f.) Sealy 是尖被百合 *Lilium lophophorum* Franch.的异名; *Lilium lophophorum* subsp. *linearifolium* Sealy 是线叶百合(变种)*Lilium lophophorum* var. *linearifolium* (Sealy) S. Yun Liang 的异名; *Lilium avenaceum* Fisch. ex Regel 是浙江百合 *Lilium medeoloides* A.Gray 的异名; *Lilium euxanthum* (W.W. Sm. & W.E. Evans) Sealy 是黄花小百合 *Lilium nanum* var. *flavidum* (Rendle) Sealy 的异名; *Lilium parvum* var. *luteum* Purdy 是沙斯特百合 *Lilium pardalinum* subsp. *shastense* (Eastw.) M.W. Skinner 的异名; *Lilium dahuricum* hort. ex Reuthe.、*Lilium dauricum* Ker Gawl.、*Lilium maculatum* subsp. *dauricum* (Ker Gawl.) H. Hara、*Lilium maculatum* var. *dauricum* (Ker Gawl.) Ohwi 是宾州百合 *Lilium pensylvanicum* Ker Gawl.的异名; *Lilium umbellatum* Pursh 是费城百合 *Lilium philadelphicum* L.的异名; *Lilium nepalense* var. *burmanicum* W.W. Sm.是紫喉百合(变种)*Lilium primulinum* var. *burmanicum* (W.W. Sm.) Stearn 的异名; *Lilium nepalense* var. *ochraceum* (Franch.) S. Yun Liang、*Lilium ochraceum* Franch.、*Lilium tenii* H. Lév.是川滇百合(变种)*Lilium primulinum* var. *ochraceum* (Franch.) Stearn 的异名; *Lilium linifolium* Hornem.、*Lilium tenuifolium* Fisch.是山丹 *Lilium pumilum* Redouté 的异名; *Lilium omeiense* Z.Y. Zhu 是通江百合 *Lilium sargentiae* E.H. Wilson 的异名; *Lilium saccatum* S. Yun Liang

Table 3. Specimens of *Lilium* in the Chinese Virtual Herbarium
表 3. 中国数字植物标本库馆藏的百合属植物标本

	种/亚种/变种/品种	中文名	标本份数
1	<i>Lilium</i> ‘Casa Blanca’	[卡萨布兰卡]百合 ([香水]百合)	1
2	<i>Lilium</i> ‘Connecticut King’	[康皇]百合	1
3	<i>Lilium longiflorum</i> var. <i>scabrum</i> Masam.	糙茎百合	2
4	<i>Lilium amabile</i> Palib.	秀丽百合	25
5	<i>Lilium amoenum</i> E.H. Wilson ex Sealy	玫红百合	38
6	<i>Lilium apertum</i> Franch.	开瓣百合	3
7	<i>Lilium auratum</i> Lindl.	天香百合	20
8	<i>Lilium bakerianum</i> Collett & Hemsl.	滇百合	174
9	<i>Lilium bakerianum</i> var. <i>bakerianum</i>	滇百合	1
10	<i>Lilium bakerianum</i> var. <i>delavayi</i> (Franch.) E.H. Wilson	黄绿花滇百合	124
11	<i>Lilium bakerianum</i> var. <i>rubrum</i> Stearn	紫红花滇百合	82
12	<i>Lilium bakerianum</i> var. <i>yunnanense</i> (Franch.) Sealy ex Woodcock & Stearn	无斑滇百合	41
13	<i>Lilium brevistylum</i> (S. Yun Liang) S. Yun Liang	短柱小百合	3
14	<i>Lilium brownii</i> F.E. Br. ex Mieliez	野百合	1375
15	<i>Lilium brownii</i> var. <i>brownii</i>	野百合	13
16	<i>Lilium brownii</i> var. <i>viridulum</i> Baker	百合	840
17	<i>Lilium bulbiferum</i> L.	珠芽百合	3
18	<i>Lilium callosum</i> Siebold & Zucc.	条叶百合	136
19	<i>Lilium callosum</i> var. <i>callosum</i>	条叶百合	2
20	<i>Lilium canadense</i> L.	加拿大百合	10
21	<i>Lilium carniolicum</i> Bernh. ex Mert. & W.D.J. Koch		1
22	<i>Lilium catesbaei</i> Walter	松树百合	5
23	<i>Lilium cernuum</i> Kom.	垂花百合	72
24	<i>Lilium columbianum</i> hort. ex Leichtlin	哥伦比亚百合	11
25	<i>Lilium concolor</i> Salisb.	渥丹	511
26	<i>Lilium concolor</i> var. <i>concolor</i>	渥丹	11
27	<i>Lilium concolor</i> var. <i>megalanthum</i> F.T.Wang & Tang	大花百合	39
28	<i>Lilium concolor</i> var. <i>partheneion</i> (Siebold & de Vriese) Baker	矮百合	14
29	<i>Lilium concolor</i> var. <i>pulchellum</i> (Fisch.) Baker	有斑百合	450
30	<i>Lilium davidii</i> Duch.	川百合	392
31	<i>Lilium cordatum</i> var. <i>glehnii</i> (F. Schmidt) Woodcock & Coutts		4
32	<i>Lilium davidii</i> var. <i>davidii</i>	川百合	5
33	<i>Lilium davidii</i> var. <i>willmottiae</i> (E.H. Wilson) Raffill	兰州百合	62

续表

34	<i>Lilium distichum</i> Nakai	东北百合	307
35	<i>Lilium duchartrei</i> Franch.	宝兴百合	423
36	<i>Lilium elegans</i> Thunb.	雅致百合	7
37	<i>Lilium esquamatum</i> var. <i>aureum</i>	金黄无鳞片百合	1
38	<i>Lilium eupetes</i> J.M.H. Shaw	树生百合	1
39	<i>Lilium fargesii</i> Franch.	绿花百合	85
40	<i>Lilium floridum</i> J.L. Ma & Yan Jun Li	凤凰百合	2
41	<i>Lilium formosanum</i> A. Wallace	台湾百合	23
42	<i>Lilium hansonii</i> Leichtlin ex D.D.T. Moore	竹叶百合	11
43	<i>Lilium henrici</i> Franch.	墨江百合	35
44	<i>Lilium henrici</i> var. <i>maculatum</i> (W.E. Evans) Woodcock & Stearn	斑块百合	4
45	<i>Lilium henryi</i> Baker	湖北百合	71
46	<i>Lilium jankae</i> A. Kern.	杨克百合	2
47	<i>Lilium japonicum</i> Thunb. ex Houtt.	日本百合	23
48	<i>Lilium kelleyanum</i> Lemmon	凯丽百合	2
49	<i>Lilium lancifolium</i> Thunb.	卷丹	669
50	<i>Lilium lankongense</i> Franch.	匍茎百合	145
51	<i>Lilium leichtlinii</i> Hook.f.	柠檬色百合	16
52	<i>Lilium leichtlinii</i> var. <i>maximowiczii</i> (Regel) Baker	大花卷丹	81
53	<i>Lilium leucanthum</i> Baker	宜昌百合	183
54	<i>Lilium leucanthum</i> var. <i>centifolium</i> (Stapf ex Elwes) Woodcock & Coutts	紫脊百合	9
55	<i>Lilium leucanthum</i> var. <i>leucanthum</i>	宜昌百合	1
56	<i>Lilium lijiangense</i> L.J. Peng	丽江百合	11
57	<i>Lilium linearifolium</i> S.S. Ying	线叶十字兰	2
58	<i>Lilium longiflorum</i> Thunb.	麝香百合	66
59	<i>Lilium lophophorum</i> Franch.	尖被百合	470
60	<i>Lilium lophophorum</i> var. <i>linearifolium</i> (Sealy) S. Yun Liang	线叶百合	5
61	<i>Lilium lophophorum</i> Franch. var. <i>lophophorum</i>	尖被百合	2
62	<i>Lilium maculatum</i> Thunb.	斑点百合	13
63	<i>Lilium maculatum</i> var. <i>bukosanense</i> (Honda) H. Hara		3
64	<i>Lilium maculatum</i> Thunb. var. <i>maculatum</i>	斑点百合	1
65	<i>Lilium maritimum</i> Kellogg	滨百合	1
66	<i>Lilium martagon</i> L.	欧洲百合	19
67	<i>Lilium martagon</i> var. <i>pilosiusculum</i> Freyn	新疆百合	56
68	<i>Lilium matangense</i> J.M. Xu	马塘百合	9

续表

69	<i>Lilium medeoloides</i> A. Gray	浙江百合	35
70	<i>Lilium medogense</i> S. Yun Liang	墨脱百合	4
71	<i>Lilium michauxii</i> Poir.	米氏百合	3
72	<i>Lilium monadelphum</i> M. Bieb.	单雄蕊百合	1
73	<i>Lilium nanum</i> Klotzsch	小百合	131
74	<i>Lilium nanum</i> var. <i>flavidum</i> (Rendle) Sealy	黄花小百合	23
75	<i>Lilium nepalense</i> D. Don	紫斑百合	67
76	<i>Lilium papilliferum</i> Franch.	乳头百合	40
77	<i>Lilium paradoxum</i> Stearn	藏百合	8
78	<i>Lilium pardalinum</i> Kellogg	豹纹百合	2
79	<i>Lilium pardalinum</i> subsp. <i>shastense</i> (Eastw.) M.W. Skinner	沙斯特百合	1
80	<i>Lilium parvum</i> Kellogg	小豹纹百合	2
81	<i>Lilium pensylvanicum</i> Ker Gawl.	宾州百合	325
82	<i>Lilium philadelphicum</i> L.	费城百合	7
83	<i>Lilium philippinense</i> Baker	菲律宾百合	1
84	<i>Lilium pinifolium</i> L.J. Peng	松叶百合	1
85	<i>Lilium primulinum</i> Baker	报春百合	4
86	<i>Lilium primulinum</i> var. <i>burmanicum</i> (W.W. Sm.) Stearn	紫喉百合	100
87	<i>Lilium primulinum</i> var. <i>ochraceum</i> (Franch.) Stearn	川滇百合	139
88	<i>Lilium puerense</i> Y.Y. Qian	普洱百合	3
89	<i>Lilium pumilum</i> Redouté	山丹	1968
90	<i>Lilium pumilum</i> var. <i>arachnoideum</i>		1
91	<i>Lilium regale</i> E.H. Wilson	岷江百合	40
92	<i>Lilium rockii</i> R.H. Miao	洛克百合	2
93	<i>Lilium rosthornii</i> Diels	南川百合	125
94	<i>Lilium rubellum</i> Baker	红花百合	4
95	<i>Lilium saluenense</i> (Balf.f.) S. Yun Liang	磬花百合	1
96	<i>Lilium sargentiae</i> E.H. Wilson	通江百合	253
97	<i>Lilium sempervivoideum</i> H. Lév.	蒜头百合	40
98	<i>Lilium souliei</i> (Franch.) Sealy	紫花百合	130
99	<i>Lilium speciosum</i> Thunb.	美丽百合	59
100	<i>Lilium speciosum</i> var. <i>gloriosoides</i> Baker	药百合	160
101	<i>Lilium stewartianum</i> Balf.f. & W.W. Sm.	单花百合	44
102	<i>Lilium sulphureum</i> Baker	淡黄花百合	90
103	<i>Lilium superbum</i> L.	头巾百合	4
104	<i>Lilium taliense</i> Franch.	大理百合	176

续表

105	<i>Lilium tsingtaoense</i> Gilg	青岛百合	55
106	<i>Lilium wardii</i> Stapf ex W.W. Sm.	卓巴百合	54
107	<i>Lilium washingtonianum</i> Kellogg	华盛顿百合	1
108	<i>Lilium yapingense</i> Y.D. Gao & X.J. He	亚坪百合	1
合计			11,333

是紫花百合 *Lilium souliei* (Franch.) Sealy 的异名; *Lilium speciosum* form *rubrum* (Lem.) Mast.是美丽百合 *Lilium speciosum* Thunb.的异名; *Lilium habaense* F.T. Wang & Tang、*Lilium xanthellum* F.T. Wang & Tang、*Lilium xanthellum* var. *luteum* S. Yun Liang 是单花百合 *Lilium stewartianum* Balf.f. & W.W. Sm.的异名; *Lilium myriophyllum* Franch.是淡黄花百合 *Lilium sulphureum* Baker 的异名; *Lilium jinfushanense* L. J. Peng & B.N. Wang 是大理百合 *Lilium taliense* Franch.的异名; *Lilium carneum* Nakai、*Lilium miquelianum* Makino 是青岛百合 *Lilium tsingtauense* Gilg 的异名; 有些名称实际上是百合科其它属的物种的异名, 例如, *Lilium cordifolium* Thunb. *Lilium cordatum* (Thunb.) Koidz & Airy Shaw 是大百合属的大百合 *Cardiocrinum cordatum* Makino 的异名; *Lilium giganteum* Wall.是大百合属的 *Cardiocrinum giganteum* (Wall.) Makino 的异名; *Lilium giganteum* var. *yunnanense* Leichtlin ex Elwes 是大百合属云南大百合 *Cardiocrinum giganteum* var. *yunnanense* (Elwes) Stearn 的异名; *Lilium cathayanum* E.H. Wilson 是大百合属的 *Cardiocrinum cathayanum* (E.H. Wilson) Stearn 的异名; *Lilium hyacinthinum* E.H. Wilson 是假百合属的假百合 *Notholirion bulbuliferum* (Lingelsh.) Stearn 的异名; *Lilium macrophyllum* (D. Don) Voss 是大叶假百合 *Notholirion macrophyllum* Boiss. 的异名。同名异物和同物异名造成了一定的混乱, 制约着物种鉴定研究和相关学科领域的发展。

53%以上的百合属植物标本的采集日期为 50 年以前, DNA 保存质量较差。少数物种的标本数量较多, 例如, 山丹 *L. pumilum* Redouté(1968 份)、野百合 *L. brownii* F.E. Br. ex Mieliez(1375 份)、百合(变种)*L. brownii* var. *viridulum* Baker(840 份)等。3 份(含)以上标本的物种有 81 种/亚种/变种。低于 3 份标本的物种有 27 种/亚种/变种/品种。现有的标本材料不足以支持全面研究百合属所有物种的分子鉴定和系统发生关系。在出现过的百合名称(181 个)中, 异名(73)占 40.33%。很多文献仅限于局部区域的百合属植物资源调查和研究, 存在物种鉴定不够准确或没有区分接受名和异名的问题。部分百合属植物的分类认识提升仅通过一个项目组很难彻底完成, 原因是某些关键技术被其他研究团队掌握, 但他们不一定熟悉资源, 因此, 各研究团队应该将供试样品的标本同时备份一套到国家植物标本馆, 以降低分类混乱现象造成的不良影响。净化处理后产生的符合标准的再生水及泥土可提高百合种植业的产量。对 21 国 40 个植物标本馆的 4500 份标本的取样调查结果显示, 50%以上的热带植物标本存在名称鉴定错误[35]。标本鉴定研究过程中, 名称需要更正的现象较为普遍。自 1753 年建立百合属, 已有 270 多年, 现阶段的工作重点应该是补全科属内物种的标本, 达到能够提供 DNA 提取服务的需求。公益性研究成果全球受益, 各国标本馆之间互赠标本、互通有无, 是降低采集成本、推动相关领域快速发展的捷径之一。植物鉴定研究与系统发生关系研究经常联动开展, 全球取样和多学科联合攻关是今后研究的大趋势[36]-[39]。分子检索表中的具有分类价值的单核苷酸变异位点的产生机制有待利用化学和量子科学领域的新技术深入研究。

5. 结论与展望

本研究首次报道基于质体基因组变异位点的百合属植物分子分类检索表方法, 与百合属植物的全球种类数量相比, 目前产业化可利用的百合资源的种类相对有限。有必要在百合属 130 余个物种范围内进一步筛选和培育更多优质食用、药用和观赏类型。本研究可为百合属植物资源的保护和利用提供技术基

础。本研究从叶绿体基因组大数据中提取有物种分类价值的关键特征数据, 在应用人工智能监测和管理全球植物资源多样性方面可达到节省算力、提高运算速度的目的。

感谢

本研究得到天津市人力资源和社会保障局、天津市人力资源建设服务中心、上海市人力资源和社会保障局、上海计算技术培训中心、安徽省人力资源和社会保障厅、中国科学技术大学、江西省人力资源和社会保障厅、井冈山大学、北京市人力资源和社会保障局、北京城市排水集团有限责任公司以及人力资源社会保障部国家专业技术人员知识更新工程项目的热情支持。感谢曾明华老师和王进华老师的热情指导。徐秀萍老师和田宏参与了有意义的讨论。本调查得到国家植物标本资源库(National Plant Specimen Resource Center)平台的支持。

基金项目

国家自然科学基金项目(No. 31770744)。

参考文献

- [1] Comber, H.F. (1949) A New Classification of the Genus *Lilium*. *Lily Yearbook*, Royal Horticultural Society, 13:86-105.
- [2] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志第 14 卷: 百合科[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
<http://www.cn-flora.ac.cn/>
- [3] Wu, Z.Y., Hong, D.Y. and Raven, P.H. (2000) Flora of China, Vol. 24, Liliaceae. Science Press, Beijing and Missouri Botanical Garden Press, St. Louis, 73-263. <https://www.iplant.cn/info/Liliaceae?t=foc>
- [4] Zhou, N, Miao, K., Liu, C.K., Jia, L.B., Hu, J.J., Huang, Y.J. and Ji, Y.H. (2024) Historical Biogeography and Evolutionary Diversification of *Lilium* (Liliaceae): New Insights from Plastome Phylogenomics. *Plant Diversity*, **46**, 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2023.07.009>
- [5] 刘一心, 杜运鹏, 崔凯峰, 田翠杰, Mohammad Sayyar Khan, 武小钢, 杨秀云, 张秀海. 基于 ITS 序列的百合属野生资源与栽培品种亲缘关系评价[J]. 分子植物育种, 2019, 17(11): 3761-3768.
<https://doi.org/10.13271/j.mpb.017.003761>
- [6] 刘一心. 基于叶绿体基因标记的栽培百合母系溯源及百合属(*Lilium*) DNA 条形码的开发[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西农业大学, 2019.
- [7] 毕戔. 百合属的比较叶绿体基因组学研究[D]: [硕士学位论文] 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [8] Kim, H.T., Lim, K.B. and Kim, J.S. (2019) New Insights on *Lilium* Phylogeny Based on a Comparative Phylogenomic Study Using Complete Plastome Sequences. *Plants*, **8**, Article 547. <https://doi.org/10.3390/plants8120547>
- [9] 杜方. 百合属的起源、分类及资源多样性[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(4): 68-79.
<https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2023.04.06>
- [10] 韩凤鸣. 百合营养系变异体的鉴定[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006.
- [11] 方洁, 潘俊杰, 程科军, 吕群丹. 百合分子生物学研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(12): 69-76.
https://www.xdnykj.com/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200311010&flag=1
- [12] 陈名红, 熊华斌, 李成云. 分子标记在百合属植物遗传多样性研究中的应用[J]. 生物技术通报, 2011(12): 65-69.
<https://doi.org/10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2011.12.025>
- [13] 王纯荣, 周雯雯, 颜贤仔. 食用百合研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008(36): 15833-15834, 15869.
<https://doi.org/10.13989/j.cnki.0517-6611.2008.36.101>
- [14] Lu, R.S., Yang, T., Chen, Y., Wang, S.Y., Cai, M.Q., Cameron, K.M., Li, P. and Fu, C.X. (2021) Comparative Plastome Genomics and Phylogenetic Analyses of Liliaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, **196**, 279-293.
<https://doi.org/10.1093/botlinnean/boaa109>
- [15] Li, J., Cai, J., Qin H.H., Price, M., Zhang, Z., Yu, Y., Xie, D.F., He, X.J., Zhou, S.D. and Gao, X.F. (2022) Phylogeny, Age, and Evolution of Tribe *Lilieae* (Liliaceae) Based on Whole Plastid Genomes. *Frontiers in Plant Science*, **12**, Article 699226. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699226>

- [16] Dong, W.P., Xu, C., Li, D.L., Jin, X.B., Li, R.L., Lu, Q. and Suo Z.L. (2016) Comparative Analysis of the Complete Chloroplast Genome Sequences in Psammophytic *Haloxylon* Species (Amaranthaceae). *PeerJ*, **4**, e2699. <https://doi.org/10.7717/peerj.2699>
- [17] Dong, W.P., Xu, C., Li, W.Q., Xie, X.M., Lu, Y.Z., Liu, Y.L., Jin, X.B. and Suo, Z.L. (2017) Phylogenetic Resolution in *Juglans* Based on Complete Chloroplast Genomes and Nuclear DNA Sequences. *Frontiers in Plant Science*, **8**, Article 1148. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01148>
- [18] Xu, C., Dong, W.P., Li, W.Y., Lu, Y.Z., Xie, X.M., Jin, X.B., Shi, J.P., He, K.H. and Suo, Z.L. (2017) Comparative Analysis of Six *Lagerstroemia* Complete Chloroplast Genomes. *Frontiers in Plant Science*, **8**, Article 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00015>
- [19] Li, W.Q., Liu, Y.L., Yang, Y., Xie, X.M., Lu, Y.Z., Yang, Z.R., Jin, X.B., Dong, W.P. and Suo, Z.L. (2018) Interspecific Chloroplast Genome Sequence Diversity and Genomic Resources in *Diospyros*. *BMC Plant Biology*, **18**, Article No. 210. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1421-3>
- [20] Dong, W.P., Xu, C., Liu, Y.L., Shi, J.P., Li, W.Y. and Suo, Z.L. (2021) Chloroplast Phylogenomics and Divergence Times of *Lagerstroemia* (Lythraceae). *BMC Genomics*, **22**, Article No. 434. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07769-x>
- [21] Guo, C., Liu, K.J., Li, E.Z., Chen, Y.F., He, J.Y., Li, W.Y., Dong, W.P. and Suo, Z.L. (2023) Maternal Donor and Genetic Variation of *Lagerstroemia indica* Cultivars. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article 3606. <https://doi.org/10.3390/ijms24043606>
- [22] Suo, Z.L., Zhang, C.H., Zheng, Y.Q., He, L.X., Jin, X.B., Hou, B.X. and Li, J.J. (2012) Revealing Genetic Diversity of Tree Peonies at Micro-Evolution Level with Hyper-Variable Chloroplast Markers and Floral Traits. *Plant Cell Reports*, **31**, 2199-2213. <https://doi.org/10.1007/s00299-012-1330-0>
- [23] Suo, Z.L., Chen, L.N., Pei, D., Jin, X.B. and Zhang, H.J. (2015) A New Nuclear DNA Marker from Ubiquitin Ligase Gene Region for Genetic Diversity Detection of Walnut Germplasm Resources. *Biotechnology Reports*, **5**, 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.11.003>
- [24] Suo, Z.L., Li, W.Y., Jin, X.B. and Zhang, H.J. (2016) A New Nuclear DNA Marker Revealing Both Microsatellite Variations and Single Nucleotide Polymorphic Loci: A Case Study on Classification of Cultivars in *Lagerstroemia indica* L. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, **8**, 266-271. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000296>
- [25] 索志立, 顾翠花, 左云娟, 杨志荣, 孙忠民, 杨强发, 靳晓白. 利用叶绿体基因组大单拷贝区的单核苷酸多态位点鉴定紫薇属和马尾藻属植物[J]. 植物学研究, 2022, 11(2): 218-228. <https://doi.org/10.12677/br.2022.112026>
- [26] 刘儒, 潘文婷, 李斌, 靳晓白, 李锐丽, 索志立. 利用叶绿体全基因组的单核苷酸多态位点对鹅掌楸和北美鹅掌楸的分子鉴定[J]. 农业科学, 2022, 12(11): 1098-1108. <https://doi.org/10.12677/hjas.2022.1211151>
- [27] 李斌, 左云娟, 刘艳磊, 杨志荣, 靳晓白, 潘伯荣, 常青, 索志立. 基于叶绿体基因组的单核苷酸多态位点的落叶松属(*Larix* Mill.)植物的分子鉴定新方法[J]. 植物学研究, 2023, 12(4): 227-239. <https://doi.org/10.12677/br.2023.124030>
- [28] 刘美辰, 左云娟, 刘艳磊, 杨志荣, 靳晓白, 索志立. 基于叶绿体全基因组核苷酸变异位点的大豆属(*Glycine* Willd.)植物的分子鉴定新方法[J]. 植物学研究, 2024, 13(2): 124-142. <https://doi.org/10.12677/BR.2024.132015>
- [29] 刘美辰, 张建农, 左云娟, 杨志荣, 靳晓白, 潘伯荣, 常青, 索志立. 基于叶绿体全基因组序列变异位点的葫芦科植物资源遗传多样性的分子鉴定新方法[J]. 植物学研究, 2024, 13(3): 1-26. <https://doi.org/10.12677/br.2024.133032>
- [30] 刘美辰, 左云娟, 靳晓白, 杨志荣, 索志立. 基于叶绿体基因组变异位点的兰属(兰科)植物资源遗传多样性的分子鉴定新方法. 计算生物学, 2024, 14(2): 13-28. <https://doi.org/10.12677/hjcb.2024.142002>
- [31] 刘美辰, 李斌, 左云娟, 靳晓白, 索志立. 基于质体基因组序列变异位点的松科油杉属和冷杉属植物资源遗传多样性的分子鉴定新方法. 植物学研究, 2024, 13(4): 434-445. <https://doi.org/10.12677/br.2024.134046>
- [32] Katoh, K. and Standley, D.M. (2013) MAFFT Multiple Sequence Alignment Software Version 7: Improvements in Performance and Usability. *Molecular Biology and Evolution*, **30**, 772-780. <https://doi.org/10.1093/molbev/mst010>
- [33] Kumar, S., Stecher, G. and Tamura, K. (2016) MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 7.0 for Bigger Datasets. *Molecular Biology and Evolution*, **33**, 1870-1874. <https://doi.org/10.1093/molbev/msw054>
- [34] Rozas, J., Ferrer-Mata, A., Sánchez-DelBarrio, J.C., Guirao-Rico, S., Librado P., Ramos-Onsins, S.E. and Sánchez-Gracia, A. (2017) DnaSP 6: DNA Sequence Polymorphism Analysis of Large Data Sets. *Molecular Biology and Evolution*, **34**, 3299-3302. <https://doi.org/10.1093/molbev/msx248>
- [35] Goodwin, Z.A., Harris, D.J., Filer, D., Wood, J.R.I. and Scotland, R.W. (2015) Wide Spread Mistaken Identity in Tropical Plant Collections. *Current Biology*, **25**, R1057-R1069. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.10.002>

- [36] 洪德元. 生物多样性事业需要科学、可操作的物种概念[J]. 生物多样性, 2016, 24(9): 979-999.
<https://doi.org/10.17520/biods.2016203>
- [37] 王文采, 等. 世界植物简志[M]. 北京: 北京出版集团北京出版社, 2021: 1-172.
- [38] 汤彦承. 释百合科(广义)分类的沿革及对我国今后研究的展望. 植物分类学报, 1995, 33(1): 1-26.
- [39] 朱旭, 李嘉奇. 全球协同落实《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》的挑战与出路: 基于 SFIC 模型的分析[J]. 生物多样性, 31(8): 23167. <https://doi.org/10.17520/biods.2023167>