



引用格式: 张秀华, 钟益鑫, 彭东辉. 福建汀江源自然保护区石松类和蕨类植物区系分析[J]. 西北植物学报, 2024, 44(9): 1499-1508. [ZHANG X H, ZHONG Y X, PENG D H. Floristic analysis of lycophytes and fern in the Tingjiangyuan Nature Reserve in Fujian[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(9): 1499-1508.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230609

福建汀江源自然保护区石松类和蕨类植物区系分析

张秀华¹, 钟益鑫², 彭东辉^{3*}

(1 闽西职业技术学院, 福建龙岩 364021; 2 福建汀江源国家级自然保护区管理局, 福建长汀 366300; 3 福建农林大学 风景园林与艺术学院, 福州 350002)

摘要 【目的】探讨汀江源自然保护区石松类和蕨类植物从物种多样性和区系地理特征, 以期两类植物多样性保护、资源应用开发及系统演化等研究提供参考。【方法】在野外调查、标本鉴定基础上, 结合文献资料, 整理该区石松类和蕨类植物名录, 分析区系组成及地理成分。【结果】(1) 该区石松类和蕨类植物有 23 科 60 属 129 种, 其中石松类有 2 科 5 属 15 种, 蕨类植物有 21 科 55 属 114 种。(2) 优势科、属明显, 优势科有 3 科, 优势属有 1 属; 单种科、属和寡种科、属是构成该区石松类和蕨类植物科、属的主体。(3) 科的分布区类型以世界分布和热带分布为主; 属、种的分布区类型以热带分布为主, 同时呈现温带性质; 中国特有种有 15 种。(4) 该区与梁野山保护区的地理亲缘关系最近。【结论】汀江源国家级自然保护区石松类和蕨类植物地理成分多样, 特有现象明显, 生物多样性较低, 植物区系成分在水平梯度上呈现由热带向温带过渡的特征。

关键词 汀江源自然保护区; 石松类; 蕨类植物; 植物区系; 地理成分

中图分类号 Q948.5

文献标志码 A

Floristic analysis of lycophytes and fern in the Tingjiangyuan Nature Reserve in Fujian

ZHANG Xiuhua¹, ZHONG Yixin², PENG Donghui^{3*}

(1 West Fujian Vocational and Technical College, Longyan, Fujian 364021, China; 2 Fujian Tingjiangyuan National Nature Reserve Management Bureau, Changting, Fujian 366300, China; 3 School of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract [Objective] The objective of this study is to investigate species diversity and floristic geographical characteristics, in order to provide a reference for the research on the diversity conservation, resource application and development, and phylogenetic evolution of lycophytes and fern in the Tingjiangyuan Nature Reserve. [Methods] On the basis of field investigation and specimen identification, combined with the literature data, the list of lycophytes and fern in the area was compiled, and the faunal composition and geographical composition were analyzed. [Results] (1) There were 129 species of lycophytes and ferns in 60 genera and 23 families, including 15 species of lycophytes in 5 genera and 2 families, and 114 species of ferns in 55 genera and 21 families. (2) The dominant families and genera were obvious, with 3 families

收稿日期: 2023-09-27; 修改稿收到日期: 2024-04-28

基金项目: 2021 年度福建省中青年教师教育科研项目(科技类)(JAT210913); 2022 年闽西职业技术学院“园林植物应用”科研创新团队项目(2022KYCXTD003)

作者简介: 张秀华(1971—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事园林植物资源及应用研究。E-mail: 1428776989@qq.com

* 通信作者: 彭东辉, 教授, 主要从事园林植物资源与利用研究。E-mail: fjpdh@126.com

and 1 genus of the dominant families. Monospecific families, genera, and oligogenes were the main bodies of the lycophytes and fern families and genera in the area. (3) The distribution types of families were mainly global and tropical, and the distribution types of genera and species were mainly tropical and temperate. There were 15 endemic species in China. (4) The geographical kinship between this area and the Liangye Mountain Nature Reserve was the closest. [Conclusion] The geographical composition of the lycophytes and fern plants in the Tingjiangyuan National Nature Reserve is diverse, with obvious endemic phenomena and low biodiversity. The plant flora shows a transition from tropical to temperate on a horizontal gradient.

Key words Tingjiangyuan Nature Reserve; lycophytes; ferns; flora; geographical components

蕨类植物旧时称羊齿植物,是植物界的一个自然类群。在经典分类中,蕨类植物门作为植物界的一个自然门类^[1]。新近的分子系统学研究显示,蕨类植物并非自然类群,它包括石松类和蕨类植物^[2]。石松类和蕨类植物起源古老,种类繁多,在植物进化中有着重要的地位^[3]。

研究一个区域石松类和蕨类植物区系对了解该区域石松类和蕨类植物与环境的关系,探索其在地质历史中的演化脉络有一定的意义^[4]。福建汀江源国家级自然保护区位于福建长汀县境内,气候温和,雨量充沛,阳光充足,地理环境复杂,植被类型和动植物资源丰富^[5]。目前多位研究人员对汀江源自然保护区在种子植物资源、区系、蕨类植物资源评价及开发应用、珍稀濒危植物资源等方面进行了相关研究^[6-10],但对石松类和蕨类植物的区系研究鲜见报道。因此,该研究在野外实地调查、统计分析和查阅相关文献资料^[5,11]等基础上,整理汀江源国家级自然保护区石松类和蕨类植物名录,分析地理成分、区系组成、优势类群及珍稀濒危物种,以期为汀江源国家级自然保护区石松类和蕨类植物的多样性保护、资源应用开发、物种引用和系统演化等研究提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

福建汀江源国家级自然保护区(116°02′—116°30′ E, 25°35′—26°02′ N)位于福建省长汀县境内,总面积 10 533 hm²,海拔 500~1 248 m。保护区植被类型丰富,有 8 个植被型 23 个群系 55 个群丛。气候为中亚热带性季风气候,气候温和,年平均气温 16.8℃,平均霜期 105 d;阳光充足,全年日照时间 1 942 h;雨量充沛,年均降水量 1 750 mm,常年相对湿度 80%以上。区内溪流众多,地形复杂,野生动植物资源丰富,复杂的地理环境为石松类和蕨类植物生长提供了良好的条件^[5]。

1.2 数据收集

为全面了解和掌握汀江源国家级自然保护区石松类和蕨类植物资源,该研究于 2022 年多次到汀江源保护区,选择不同路线对石松类和蕨类植物进行调查,在 3 个片区的沟溪两侧进行典型调查,同时记录、拍照、采集标本。查阅相关资料^[5,12],依据《中国植物志》、*Flora of China*^[13]、《中国植物图像库》、《福建植物志》等对石松类和蕨类植物进行鉴定,采用 *Flora of China* 分类系统对石松类和蕨类植物进行分类和名录校正,整理编制福建汀江源国家级自然保护区石松类和蕨类植物名录。

1.3 统计分析

对汀江源石松类和蕨类植物的科、属、种分布区类型的统计分析参考严岳鸿等^[14]的划分方法进行。为探讨汀江源保护区与其他保护区石松类和蕨类植物(按 *Flora of China* 系统分类)植物区系的亲缘关系,选取福建梅花山^[15]、福建梁野山^[16]、江西赣江源^[17]、江西马头山^[18]、海南五指山^[19]、广东云开山^[20]、贵州麻阳河^[21]等 7 个自然保护区,采用 Sorensen 相似性系数比较方法,比较 8 个保护区的科、属、种的相似性系数(S_s)和种系分化度(S_D)。

$$S_s = 2C / (A + B) \times 100\% \tag{1}$$

式中: S_s 为相似性系数; C 为两地区共有科(属/种)数; A 和 B 分别为两地区科(属/种)数。

$$S_D = n_2 / n_1 + n_3 / n_2 \tag{2}$$

式中: n_1 、 n_2 、 n_3 分别为植物区系中的科数、属数、种数。

R/T 为分布区类型中热带成分与温带成分科/属/种数的比值。

2 结果与分析

2.1 汀江源保护区石松类和蕨类植物多样性分析

根据调查统计,汀江源石松类和蕨类植物共有 23 科 60 属 129 种(表 1),分别占中国该类植物总科(38)、总属(177)、总种(2 258)^[13] 的 60.53%、33.90%、5.71%;分别占福建省该类植物总科(32)、总属(101)、总种(406)^[22] 的 71.88%、59.41%、31.77%。

表 1 汀江源石松类和蕨类植物组成

Table 1 Composition of lycophytes and ferns from Tingjiangyuan

序号 Number	科名 Family name	属数 Number of genera	种数 Number of species
1	石松科 Lycopodiaceae	4	4
2	卷柏科 Selaginellaceae	1	11
3	木贼科 Equisetaceae	1	1
4	合囊蕨科 Marattiaceae	1	1
5	紫萁科 Osmundaceae	1	2
6	膜蕨科 Hymenophyllaceae	2	4
7	里白科 Gleicheniaceae	2	4
8	海金沙科 Lygodiaceae	1	1
9	蘋科 Marsileaceae	1	1
10	槐叶蘋科 Salviniaceae	2	2
11	瘤足蕨科 Plagiogyriaceae	1	1
12	金毛狗科 Cibotiaceae	1	1
13	鳞始蕨科 Lindsaeaceae	2	2
14	碗蕨科 Dennstaedtiaceae	4	5
15	凤尾蕨科 Pteridaceae	8	20
16	铁角蕨科 Aspleniaceae	1	7
17	金星蕨科 Thelypteridaceae	5	7
18	蹄盖蕨科 Athyriaceae	3	9
19	乌毛蕨科 Blechnaceae	2	3
20	鳞毛蕨科 Dryopteridaceae	6	21
21	肾蕨科 Nephrolepidaceae	1	1
22	骨碎补科 Davalliaceae	1	1
23	水龙骨科 Polypodiaceae	9	20
合计 Total		60	129

2.1.1 科的组成分析

在汀江源 23 科 60 属 129 种石松类和蕨类植物中,其中石松类有 2 科 5 属 15 种(表 2),分别占该区总数的 8.70%、8.33%和 11.63%,占中国石松类科(3)属(12)种(165)^[23]的 66.67%、41.67%、9.09%。石松类中卷柏科(Selaginellaceae)种数最多含 1 属 11 种,其余为石松科(Lycopodiaceae)有 4 属各 1 种。从属级水平上看,石松类种数最多的是卷柏属

(*Selaginella*)有 11 种,是构成该区石松类植物的主体(表 3)。

汀江源保护区蕨类植物有 21 科 55 属 114 种,分别占该区石松类和蕨类植物科、属、种数的 91.30%、91.67%、88.37%(表 2)。其中较大科有 3 科 23 属 61 种,分别为鳞毛蕨科(Dryopteridaceae)(21 种),水龙骨科(Polypodiaceae)(20 种)和凤尾蕨科(Pteridaceae)(20 种),分别占该区总科、总属、总种数的 13.04%、38.33%、47.29%,为该区的优势科。此外单种科有木贼科(Equisetaceae)、瘤足蕨科(Plagiogyriaceae)、金毛狗科(Cibotiaceae)等 8 科,占该区总种数的 6.20%。寡种科有石松科(Lycopodiaceae)、里白科(Gleicheniaceae)和乌毛蕨科(Blechnaceae)等 7 科 15 属 21 种,占该区总种数的 16.28%。(表 4)。该区单种科和寡种科分别占总科 34.78%和 30.44%,合计占总科的 65.22%,构成该区科的重要组成。

2.1.2 属的组成分析

汀江源保护区共有石松类和蕨类植物 60 属(表 2),其中石松类有 5 属,蕨类植物 55 属,分别占该区总属数的 8.33%和 91.67%。

表 5 显示,大型属为卷柏属(*Selaginella*)1 属 11 种,分别占总属数和总种数 1.67%和 8.53%,为该区的优势属;中等属有鳞毛蕨属(*Dryopteris*)、瓦韦属(*Lepisorus*)等 5 属,共有 34 种,占总属数和总种数的 8.33%和 26.36%;单种属(1 种)最多,有瓶蕨属(*Vandenboschia*)、乌毛蕨属(*Blechnum*)、车前蕨属(*Antrophyum*)、姬蕨属(*Hypolepis*)等 36 属 36 种,单种属分别占总属数和总种数的 60.00%和 27.90%;其次为寡种属,有舌蕨属(*Elaphoglossum*)、伏石蕨属(*Lemmaphyllum*)、薄唇蕨属(*Leptochilus*)等 18 属 48 种,分别占总属数和总种数的 30.00%和 37.21%;这两类属合计占总属数、总种数的 90.00%、65.11%,构成该区属的主要组成。

表 2 汀江源石松类和蕨类植物种数统计

Table 2 Statistics of species of lycophytes and ferns from Tingjiangyuan

植物种类 Plant species	科 Family		属 Genus		种 Species	
	数量 Quantity	占比 Percentage/%	数量 Quantity	占比 Percentage/%	数量 Quantity	占比 Percentage/%
石松类 Lycophytes	2	8.70	5	8.33	15	11.63
蕨类 Ferns	21	91.30	55	91.67	114	88.37
合计 Total	23	100.00	60	100.00	129	100.00

表 3 汀江源石松类植物组成

Table 3 Composition of lycophytes from Tingjiangyuan

科 Family	属 Genus	种 Species
石松科 Lycopodiaceae	石杉属 <i>Huperzia</i>	千层塔 <i>Huperzia javanica</i>
	藤石松属 <i>Lycopodiastrum</i>	藤石松 <i>Lycopodiastrum casuarinoides</i>
	石松属 <i>Lycopodium</i>	石松 <i>Lycopodium japonicum</i>
	垂穗石松属 <i>Palhinhaea</i>	垂穗石松 <i>Palhinhaea cernua</i>
卷柏科 Selaginellaceae	卷柏属 <i>Selaginella</i>	薄叶卷柏 <i>Selaginella delicatula</i>
		深绿卷柏 <i>Selaginella doederleinii</i>
		异穗卷柏 <i>Selaginella heterostachys</i>
		耳基卷柏 <i>Selaginella limbata</i>
		毛枝卷柏 <i>Selaginella trichoclada</i>
		卷柏 <i>Selaginella tamariscina</i>
		疏叶卷柏 <i>Selaginella remotifolia</i>
		翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>
		兖州卷柏 <i>Selaginella involvens</i>
		伏地卷柏 <i>Selaginella nipponica</i>
		江南卷柏 <i>Selaginella moellendorffii</i>
合计 Total	2	5

表 4 汀江源石松类和蕨类植物科级统计

Table 4 Family statistics of lycophytes and ferns in Tingjiangyuan

级别 Grade	科 Family		属 Genus		种 Species	
	数量 Quantity	占比 Percentage/%	数量 Quantity	占比 Percentage/%	数量 Quantit	占比 Percentage/%
单种科(1 种) Single family (1 species)	8	34.78	8	13.33	8	6.20
寡种科(2~4 种) Oligtypic family (2-4 species)	7	30.44	15	25.00	21	16.28
小科(5~9 种) Samll family (5-9 species)	4	17.39	13	21.67	28	21.70
中等科(10~16 种) Mesotypic family (10-16 species)	1	4.35	1	1.67	11	8.53
较大科(17~39 种) Larger family (17-39 species)	3	13.04	23	38.33	61	47.29
合计 Total	23	100.00	60	100.00	129	100.00

表 5 汀江源石松类和蕨类植物属级统计

Table 5 Genus level statistics of lycophytes and ferns in Tingjiangyuan

级别 Grade	属 Genus		种 Species	
	数量 Quantity	占比 Percentage/%	数量 Quantity	占比 Percentage/%
单种属(1 种) Monotypic genus (1 species)	36	60.00	36	27.90
寡种属(2~4 种) Oligtypic genus (2-4 species)	18	30.00	48	37.21
中等属(5~9 种) Mesotypic genus (5-9 species)	5	8.33	34	26.36
大属(≥10 种) Plurimotypic genus (more than 10 species)	1	1.67	11	8.53
合计 Total	60	100.00	129	100.00

2.1.3 珍稀濒危石松类和蕨类植物资源

根据 2021 年颁布的《国家重点保护野生植物名录》^[24],在福建汀江源保护区石松类和蕨类植物 129

种中,属于国家二级重点保护野生植物有金毛狗(*C. barometz*)、福建观音座莲(*A. fokiensis*)、千层塔(*H. javanica*)等 3 种,占总种数的 2.33%。

2.2 汀江源保护区石松类和蕨类植物区系分析

2.2.1 科的区系分析

汀江源保护区 23 科石松类和蕨类植物区系可划分为 4 个地理分布区类型(表 6),科以世界分布和热带分布类型为主,无温带分布类型。世界分布型科有木贼科(Equisetaceae)、紫萁科(Osmundaceae)、膜蕨科(Hymenophyllaceae)、蕨科(Marsileaceae)、槐叶蕨科(Salviniaceae)、凤尾蕨科(Pteridaceae)、铁角蕨科(Aspleniaceae)、蹄盖蕨科(Athyriaceae)等 12 科。

热带分布型科共 11 科,占总科数(不计世界分布科,以下相同)的 100%。其中泛热带分布有合囊蕨科(Marattiaceae)、金毛狗科(Cibotiaceae)、金星蕨科(Thelypteridaceae)等 8 科,占总科数的 72.72%;旧世界热带分布有乌毛蕨科(Blechnaceae)和骨碎补科(Davalliaceae)2 科,占总科数的 18.18%;热带亚洲-热带美洲分布仅有瘤足蕨科(Plagiogyriaceae)为单型科,占总科数的 9.09%。

在评估区科的地理分布型中,除了世界分布型的 12 科以外,其余均为热带分布型科,无温带分布型和中国特有分布型科,充分反映了该区石松类和蕨类植物在科的分布型上具有明显热带特征。

2.2.2 属的区系分析

汀江源保护区 60 属石松类和蕨类植物可划分为 8 个分布类型(表 6)。其中世界分布型有紫萁属(*Osmunda*)、碎米蕨属(*Cheilanthes*)、凤了蕨属(*Coniogramme*)、双盖蕨属(*Diplazium*)、对囊蕨属(*Deparia*)、蹄盖蕨属(*Athyrium*)、耳蕨属(*Polystichum*)、舌蕨属(*Elaphoglossum*)、膜蕨属(*Hymenophyllum*)等 22 属。

热带分布型(2-7 型)有 32 属,占总属数的 84.21%(不计世界分布属,以下相同)。其中泛热带分布有观音座莲属(*Angiopteris*)、里白属(*Diplopterygium*)、书带蕨属(*Haplopteris*)、姬蕨属(*Hypolepis*)、毛蕨属(*Cyclosorus*)、假毛蕨属(*Pseudocyclosorus*)、复叶耳蕨属(*Arachniodes*)等 17 属,占总属数的 44.74%,在热带成分中占绝对优势;旧世界热带分布有修蕨属(*Selliguea*)、芒萁属(*Dicranopteris*)、骨碎补属(*Davallia*)、鳞盖蕨属(*Microlepia*)等 4 属;热带亚洲-热带美洲间断分布型有圣蕨属(*Dictyocline*)、瘤足蕨属(*Plagiogyria*)2 属;热带亚洲-热带大洋洲分布型有革舌蕨属(*Scleroglossum*)、金星蕨属(*Parathelypteris*)、乌毛蕨属(*Blechnum*)、斛蕨属(*Drynaria*)4 属;热带亚洲-热

带非洲分布有车前蕨属(*Antrophyum*)、贯众属(*Cyrtomium*)和藤石松属(*Lycopodiastrium*)3 属;热带亚洲分布有薄唇蕨属(*Leptochilus*)、石韦属(*Pyrrosia*)2 属。

温带分布型(8-12)有 6 属占总属数的 15.79%。其中东亚分布型属最多均为东亚广布分布型,占总属数的 13.16%,分别为剑蕨属(*Loxogramme*)、实蕨属(*Bolbitis*)、棱脉蕨属(*Goniophlebium*)、瓦韦属(*Lepisorus*)和伏石蕨属(*Lemmaphyllum*)5 属;北温带分布型仅 1 属,即卵果蕨属(*Phegopteris*)。从属的分布型上看,该区热带分布型属有 32 个,占总属数的 84.21%;温带分布型属有 6 个,占总属数的 15.79%,无中国特有属。

综上所述,汀江源保护区石松类和蕨类植物区系在属的分布区类型上以热带分布为主,兼有少数的温带分布型,无中国特有属。

2.2.3 种的区系分析

汀江源保护区 129 种石松类和蕨类植物可划分为 10 个分布类型(表 6)。其中世界分布型有槐叶蕨(*S. natans*)、蕨(*M. quadrifolia*)、铁线蕨(*A. capillus-veneris*)、铁角蕨(*A. trichomanes*)和蕨(*P. aquilinum*)5 种。

热带分布型(2-7 型)有 66 种,占总种数的 53.23%(不计世界分布型种,以下相同)。其中热带亚洲分布型最多,占总种数的 39.52%,有单叶双盖蕨(*D. lancea*)、管苞瓶蕨(*V. kalamocarpa*)、镰羽耳蕨(*P. balansae*)、稀羽鳞毛蕨(*D. sparsa*)、线蕨(*L. ellipticus*)、槲蕨(*D. roosii*)、革舌蕨(*S. sulcatum*)等 49 种;泛热带分布型有垂穗石松(*P. cernua*)、长柄落蕨(*H. polyanthos*)、倒挂铁角蕨(*A. normale*)、肾蕨(*N. cordifolia*)、姬蕨(*H. punctata*)等 7 种,占总种数的 5.64%;旧世界热带分布型仅有蜈蚣凤尾蕨(*P. vittata*)1 种;热带亚洲-大洋洲分布型有长尾铁线蕨(*A. diaphanum*)、菜蕨(*D. esculentum*)、剑叶凤尾蕨(*P. ensiformis*)、薄叶碎米蕨(*C. tenuifolia*)、长尾铁线蕨(*A. diaphanum*)、毛轴假蹄盖蕨(*D. petersenii*)等 8 种,占总种数的 6.45%;热带亚洲-热带非洲分布型有仅有 1 种为粗齿紫萁(*O. banksiiifolia*) , 占总种数的 0.81%。

温带分布型(8-12 型)43 种,占总种数的 34.67%,全部为东亚分布型。其中东亚广布(H-S-J)分布型最多,有狭翅铁角蕨(*A. wrightii*)、江南短肠蕨(*D. mettenianum*)、长江蹄盖蕨(*A. iseanum*)、黑鳞耳蕨(*P. makinoi*)、暗鳞鳞毛蕨(*D. atrata*)、华东膜蕨

(*H. barbatum*) 华南实蕨(*B. subcordata*)、金鸡脚假瘤蕨(*S. hastata*)、丝带蕨(*L. miyoshianus*)等 24 种, 占总种数的 19.35%; 其次为中国-日本(S-J)分布型有耳基卷柏(*S. limbate*)、珠芽狗脊(*W. prolifera*)、禾秆蹄盖蕨(*A. yokoscense*)、小戟叶耳蕨(*P. hancockii*)、黑足鳞毛蕨(*D. fuscipes*)、粤瓦韦(*L. obscurevenulosus*)、伏石蕨(*L. microphyllum*)、日本水龙骨(*G. niponicum*)、柳叶剑蕨(*L. salicifolia*)等 18 种, 占总种数的 14.51%; 中国-喜马拉雅(SH)分布型最少, 仅扭瓦韦(*L. contortus*)1 种, 占总种数的 0.81%。

中国特有分布型种有福建观音座莲(*A. fokiensis*)、粉背蕨(*A. anceps*)、抱石莲(*L. drymoglossoides*)、光石韦(*P. calvata*)、华中铁角蕨(*A. sare-*

lii)、奇羽鳞毛蕨(*D. sieboldii*)、盾蕨(*L. ovatus*)、百山祖短肠蕨(*D. baishanzuense*)、毛枝卷柏(*S. trichoclada*)、翠云草(*S. uncinata*)、平肋书带蕨(*H. fudzinoi*)、溪洞碗蕨(*D. wilfordii*)、华南铁角蕨(*A. austrochinense*)、庐山石韦(*P. sheareri*)、相近石韦(*P. assimilis*)等 15 种, 占总种数的 12.10%。

从种的分布型上看, 该区以热带分布型为主, 有 66 种, 占总种数的 53.23%, 兼有温带分布型 43 种, 占总种数的 34.67%。在种的分布型中以热带亚洲分布型最多, 有 49 种, 占总种数的 39.52%; 东亚分布型次之, 43 种, 占总种数的 34.67%, 中国特有种 15 种, 占总种数的 12.10%。说明该区种的地理成分复杂多样, 热带分布型种占优势, 兼有一些温带分布型种, 表现出该区种的热带性质为主兼有温带性质。

表 6 汀江源保护区石松类和蕨类植物科、属、种的地理分布区类型
Table 6 Types of geographical distribution areas of lycophytes and ferns families, genera, and species in Tingjiangyuan Reserve

分布区类型 Areal type	科 Family		属 Genus		种 Species	
	数量 Quantity	占比 Percentage/%	数量 Quantity	占比 Percentage/%	数量 Quantity	占比 Percentage/%
1 世界分布 Cosmopolitan	12	—	22	—	5	—
2 泛热带分布 Pantropic	8	72.72	17	44.74	7	5.64
3 旧世界热带分布 Old world troptics	2	18.18	4	10.53	1	0.81
4 热带亚洲-热带美洲间断分布 Tropical Asia trop. America disjuncted	1	9.09	2	5.26	0	0
5 热带亚洲-热带大洋洲分布 Tropical Asia-trop. Australasia	0	0	4	10.53	8	6.45
6 热带亚洲-热带非洲分布 Tropical Asia-trop. Africa	0	0	3	7.89	1	0.81
7 热带亚洲分布 Tropical Asia	0	0	2	5.26	49	39.52
热带成分小计 Subtotal of tropical components	11	100.00	32	84.21	66	53.23
8 北温带分布 North Temperate	0	0	1	2.63	0	0
12 东亚分布 East Asia	0	0	5	13.16	43	34.67
12.1 东亚广布(H-S-J)	0	0	5	13.16	24	19.35
12.2 中国-喜马拉雅(SH)	0	0	0	0	1	0.81
12.3 中国-日本(S-J)	0	0	0	0	18	14.51
温带成分小计 Temperate composition subtotal	0	0	6	15.79	43	34.67
13 中国特有 Endemic to China	0	0	0	0	15	12.10
合计 Total	23	100.00	60	100.00	129	100.00

注: 计算比例时不包括世界分布类型。
Note: Excluding cosmopolitan in percentage.

2.3 汀江源保护区与其他保护区石松类和蕨类植物比较

2.3.1 相似性系数(S_s)

福建汀江源保护区与其他 7 个保护区植物区系的相似性系数(S_s)比较, 结果(表 7)显示, 在科的相

似性系数上, 汀江源与其他 7 个保护区均达到 64% 以上, 与梁野山、梅花山、江西赣江源的均达到 89% 以上, 其中与梁野山科的相似性系数(92.00%)最高, 与海南五指山(64.29%)最低。属的相似性系数与梅花山(80.59%)、梁野山(79.06%)和江西赣江源

(80.31%)差异不明显,均达到79%以上,表现出一致的相似性,与海南五指山属的相似性系数(29.47%)最低。种的相似性系数与梁野山的最高,为69.56%;与江西赣江源(61.87%)和梅花山(57.86%)均达到57%以上,与海南五指山(17.71%)最低。说明汀江源与梁野山、梅花山、江西赣江源在石松类和蕨类植物区系上有密切关系,在各级水平上汀江源与梁野山均表现出较高的相似性。

2.3.2 种的R/T值

比较汀江源和7个保护区种的R/T(表8),可见海南五指山的R/T最高为3.69,热带属性最强;

汀江源的R/T(1.53)与梅花山(1.53)、梁野山(1.97)的相近,贵州麻阳河的R/T(0.42)为最低。从保护区的R/T看,随保护区纬度升高,R/T总体呈现下降趋势。

2.3.3 种系分化度(S_D)

对比汀江源与7个保护区的S_D值(表8),海南五指山S_D值(6.25)为最高,最低的为梁野山(4.69)。汀江源的S_D值(4.75)与梁野山(4.69)相近,相对较低。汀江源与梁野山的石松类和蕨类植物种系分化度仅相差0.06,差距最小;与五指山的种系分化度相差1.5,差距最大。

表 7 汀江源与其他保护区的石松和蕨类植物相似性系数比较

地区 Region	科 Family			属 Genus			种 Species		
	总数 Total	共有 Same	相似性系数 S _s /%	总数 Total	共有 Same	相似性系数 S _s /%	总数 Total	共有 Same	相似性系数 S _s /%
福建汀江源 Tingjiangyuan, Fujian	23	—	—	60	—	—	129	—	—
福建梅花山 Meihuashan, Fujian	28	23	90.20	74	54	80.59	189	92	57.86
福建梁野山 Liangyeshan, Fujian	27	23	92.00	69	51	79.06	147	96	69.56
江西赣江源 Ganjiangyuan, Jiangxi	24	21	89.36	67	51	80.31	191	99	61.87
江西马头山 Matoushan, Jiangxi	19	18	85.71	58	48	74.58	155	72	50.70
海南五指山 Wuzhishan, Hainan	28	18	64.29	95	28	29.47	271	48	17.71
广东云开山 Yunkaishan, Guangdong	23	17	73.91	87	40	45.98	185	64	34.59
贵州麻阳河 Mayang River, Guizhou	19	15	78.95	55	33	60.00	158	54	34.18

表 8 汀江源保护区与其他自然保护区R/T和S_D比较

Table 8 Comparison of R/T and S_D of Tingjiangyuan Nature Reserve with other nature reserves

地区 Region	地理坐标 Geographic coordinates	海拔 Altitude/m	热带性种/温带性种 R/T	种系分化度 S _D
福建汀江源 Tingjiangyuan, Fujian	116°02′—116°30′E, 25°35′—26°02′N	500~1 248	1.53	4.75
福建梅花山 Meihuashan, Fujian	116°45′—116°57′E, 25°15′—25°35′N	375~1 811	1.53	5.19
福建梁野山 Liangyeshan, Fujian	116°00′—116°15′E, 25°04′—25°20′N	273~1 538	1.97	4.69
江西赣江源 Ganjiangyuan, Jiangxi	116°15′—116°29′E, 25°56′—26°07′N	500~1 200	0.73	5.64
江西马头山 Matoushan, Jiangxi	119°09′—117°18′E, 27°04′—27°53′N	500~1 300	0.54	5.72
海南五指山 Wuzhishan, Hainan	109°39′—109°47′E, 18°49′—18°58′N	200~1 867	3.69	6.25
广东云开山 Yunkaishan, Guangdong	111°08′—111°28′E, 22°14′—22°24′N	600~1 704	1.43	5.91
贵州麻阳河 Mayang River, Guizhou	108°03′—108°19′E, 28°37′—28°54′N	280~1 441	0.42	5.77

3 讨论

3.1 汀江源保护区石松类和蕨类植物资源多样性

汀江源国家自然保护区石松类和蕨类植物有 23 科 60 属 129 种, 分别占福建省科、属、种总数的 71.88%、59.41%、31.77%。该区石松类有 2 科 5 属 15 种, 蕨类植物有 21 科 55 属 114 种。从现代石松类和蕨类植物的系统演化关系^[25]上看, 石松类植物是最原始的。该区有被认为维管植物最早演化类群的石松类植物的石松科 (*Lycopodiaceae*), 蕨类植物起源古老处于基部类群的木贼类木贼科 (*Equisetaceae*) 和合囊蕨类合囊蕨科 (*Marattiaceae*) 等, 处于系统演化中期的水龙骨科的早期演化类群鳞始蕨科 (*Lindsaeaceae*) 和碗蕨科 (*Dennstaedtiaceae*) 等, 也有处于系统进化顶端的真水龙骨科水龙骨科 (*Polypodiaceae*)^[26]。可见该区石松类和蕨类植物在系统排序上分布着不同发展阶段的类群, 起源古老, 在系统发育或进化关系上存在比较连贯的谱系关系。

该区优势科、属明显, 鳞毛蕨科, 水龙骨科和凤尾蕨科是该区的优势科, 卷柏属为该区的优势属。单种科和单种属构成该区石松类和蕨类植物重要组成部分, 也是构成该区科属多样性的主要组成成分。单种科、属和寡种科、属的大量存在说明该区石松类和蕨类植物科、属内分化程度弱, 属系、种系较少, 科、属结构相对较为简单; 单种属和寡种属的大量存在说明属的多样性显著, 丰富度较大, 属内分化程度较低, 种系较贫乏, 结构比较简单^[14, 26]。同时也说明该区历史以来环境、气候条件变化不大, 导致科、属内分化程度较低。

珍稀濒危蕨类植物对生境要求较严格, 该区千层塔、福建观音座莲和金毛狗等珍稀濒危蕨类植物的存在说明汀江源地理环境复杂, 生态环境保护较好, 为珍稀濒危物种的生长提供优质的生存环境。

3.2 汀江源保护区石松类和蕨类植物区系地理特征

汀江源保护区石松类和蕨类植物地理成分较为复杂, 科的分布区类型有 4 个, 除了世界分布型 12 科以外, 其余 11 科均为热带分布型; 符合该区的亚热带气候特点。相对于科分布区类型, 属的分布区类型更能体现出某一植物区系的特征, 能够更好地反映该区系在进化过程中的地理特征^[27]。该区属的分布型有 8 个, 其中热带分布型属有 32 属占总属数的 84.21%, 温带分布类型属仅有 6 属, 占 15.79%, 反映了该区属的分布区类型以热带属性占优势。种的分布类型有 10 个, 其中热带分布型种有 66 种, 占总种数的 53.23%, 在热带分布型中又以热带亚洲分布型最多

有 49 种, 占 39.52%, 处优势地位, 显示该区系与热带亚洲的亲缘关系; 温带分布型有 43 种, 占总种数的 34.67%; 中国特有种有 15 种。说明该区石松类和蕨类植物种的地理成分复杂多样, 以热带性质为主兼有温带性质, 植物区系成分由热带到温带逐渐过渡。这与陈开森等^[15]和邓元德等^[16]对邻近的梅花山和梁野山等保护区蕨类植物区系成分由热带到温带逐渐过渡的分析相一致, 说明汀江源与梅花山和梁野山 2 个地区的地理、地质和气候相近以及共同的区系起源、发展历史有密切联系。汀江源种的地理成分复杂多样, 可能与该区地理位置、质地、气候有关, 随着地理环境的变化, 有些热带属在进化过程中扩散到亚热带或者到温带, 分化出温带成分种, 产生属内分异, 形成不同的地理特征, 产生了多样化的植物区系。

3.3 汀江源与其他保护区植物区系关系

3.3.1 汀江源与其他保护区石松类和蕨类植物相似性系数

相似性系数不仅可以判定两地区或多地区植物区系的相关程度, 同时也是判定分析植物区系分区以及过渡地区植物区系地理属性的重要手段。通常相似性系数越大, 植物区系起源和演化关系越密切^[28]。对比汀江源与其他保护区的区系表明, 汀江源与梅花山、梁野山和江西赣江源石松类和蕨类植物在科的相似性系数均达到 89% 以上, 属的相似性系数均达到 79% 以上, 在种的相似性上均达到 57% 以上, 可见各保护区区系间的历史联系强于近代自然地理联系。汀江源与梁野山在科、种的相似性系数均最高, 属的相似性也达到 79% 以上, 说明汀江源与梁野山亲缘关系最为密切, 不仅具有共同起源, 历史地理联系紧密, 近代自然地理联系也十分密切, 现代区系具有同质性, 表现的地理亲缘关系明显, 这与两者的距离最近, 现代自然条件相符。汀江源与海南五指山科、属、种的相似性系数最低, 亲缘关系最为疏远, 这与五指山的地理位置相距较远有关。

3.3.2 汀江源与其他保护区石松类和蕨类植物的 R/T 值

R/T (热带成分/温带成分) 可以反映植物区系的性质^[21]。 R/T 越大, 说明该区域植物热带种越多, 植物区系热带性质越显著^[29]。从热带成分/温带成分 (R/T) 比较看, 汀江源的与梅花山纬度相近, 距离较近, R/T 相近, R/T 随着保护区纬度升高, 总体呈现下降趋势, 这表明石松类和蕨类植物的分布具有明显的纬向性^[30]。说明随着纬度的升高, 气候逐渐凉爽, 温带成分种逐渐增多, 植物区系成分

由热带逐渐向温带过渡,这与刘利等^[31]研究中国不同地区滨海湿地植物地理分布组成规律相符,也符合物种多样性的纬度格局理论^[32]。

3.3.3 汀江源与其他保护区石松类和蕨类植物的种系分化度

植物区系的种系分化度是判定物种分化程度的指标,也是评判物种丰富度的重要指标^[3]。 S_D 表征石松类和蕨类植物区系分化程度, S_D 值高表示物种分化强度大, S_D 值低表示物种分化强度小^[33]。从种系分化度看,汀江源和梁野山种系分化度均较低且差异最小,可能与两保护区纬度、海拔高度、气候条件相似,都属于亚热带地区,科、属的热带属性所分化的种系较少,因此汀江源与梁野山石松类和蕨类植物种的相似性系数最高,种系分化度较低且相差最小,说明两地生境的差异性相对较小。

4 结 论

(1)汀江源自然保护区石松类和蕨类植物

有 23 科 60 属 129 种,其中石松类有 2 科 5 属 15 种,蕨类植物有 21 科 55 属 114 种。优势科、属明显,科、属多样性和丰富度较高,结构较为简单,单种科和单种属构成该区石松类和蕨类植物重要组成部分。珍稀濒危物种金毛狗、福建观音座莲、千层塔均属于国家二级保护植物,应加强种群和生境的有效保护,促进种群的恢复和扩大。

(2)在地理成分上,汀江源保护区石松类和蕨类植物地理成分较为复杂,科的分布区类型以世界分布和热带分布为主,科、属的热带成分占绝对优势,表现明显的热带属性,呈现强烈的热带性质;种以热带性质为主兼有温带性质,中国特有种有 15 个,植物区系成分有由热带到温带逐渐过渡的趋势。

(3)汀江源与梁野山石松类和蕨类植物的物种相似性系数最高,种系分化度均较低且差异最小,亲缘关系最近;与海南五指山石松类和蕨类植物亲缘关系最为疏远。

参考文献:

[1] 陆树刚. 蕨类植物学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1-213.

[2] 沙沙, 张光富, 邵丽鸳. 江苏石松类和蕨类植物多样性及生物地理学特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(2): 194-200.

SHA S, ZHANG G F, SHAO L Y. Diversity and biogeographical analysis of lycophytes and ferns in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(2): 194-200.

[3] 胡佳玉, 谭成江, 姚正明, 等. 茂兰国家级自然保护区石松类和蕨类植物区系特征[J]. 亚热带植物科学, 2021, 50(3): 216-221.

HU J Y, TAN C J, YAO Z M, *et al.* Floristic characters of the lycophytes and ferns of Maolan national nature reserve in Guizhou, southwestern China[J]. *Subtropical Plant Science*, 2021, 50(3): 216-221.

[4] 李健玲. 广西姑婆山自然保护区维管植物区系研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.

[5] 李振基, 金斌松, 刘新悦, 等. 福建汀江源自然保护区生物多样性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[6] 陈开森, 邓元德, 吕国梁, 等. 福建汀江源自然保护区种子植物区系研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(6): 7-15.

CHEN K S, DENG Y D, LÜ G L, *et al.* Research on seed plant flora of Tingjiangyuan Nature Reserve in Fujian Province [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(6): 7-15.

[7] 管诗敏, 玄锦, 李祖婵, 等. 汀江源自然保护区蕨类植物资源评价及开发应用[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2021, 49(3): 48-57.

GUAN S M, XUAN J, LI Z C, *et al.* Evaluation and exploitation of resources of fern flora in Tingjiangyuan Nature Reserve[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(3): 48-57.

[8] 周友秀, 秦子博, 孙耿敏, 等. 汀江源自然保护区种子植物资源分析[J]. 南方园艺, 2023, 34(2): 50-57.

ZHOU Y X, QIN Z B, SUN G M, *et al.* Analysis of seed plant resources in Tingjiangyuan Nature Reserve[J]. *Southern Horticulture*, 2023, 34(2): 50-57.

[9] 王学兵. 福建汀江源国家级自然保护区珍稀濒危植物资源现状及保护措施[J]. 绿色科技, 2016(16): 205-207.

WANG X B. Present situation and protection measures of rare and endangered plant resources in Tingjiangyuan National Nature Reserve, Fujian Province[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2016(16): 205-207.

[10] 王学兵. 福建汀江源自然保护区伞花木群落特征研究[J]. 林业勘察设计, 2017, 37(2): 52-56.

WANG X B. Characteristics of umbrella community of Tingjiangyuan Nature Reserve in Fujian province[J]. *Forestry Prospect and Design*, 2017, 37(2): 52-56.

[11] 林沁文. 福建蕨类植物新资料[J]. 亚热带植物科学, 2015, 44(1): 56-57.

LIN Q W. Additions to fern flora in Fujian Province, China [J]. *Subtropical Plant Science*, 2015, 44(1): 56-57.

[12] 陈思思, 张梦华, 王锦秀, 等. 药用植物千层塔的基原物种及研究进展[J]. 广西植物, 2021, 41(11): 1794-1809.

CHEN S S, ZHANG M H, WANG J X, *et al.* Original

plant and research progress of the medicinal plant *Huperzia javanica*[J]. *Guihaia*, 2021, 41(11): 1794-1809.

[13] WU Z Y, RAVEN P H. *Flora of China: Vol. 2*[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[14] 严岳鸿, 张宪春, 马克平. 中国蕨类植物多样性与地理分布[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 91-308.

[15] 陈开森, 吴锦平. 福建梅花山自然保护区蕨类植物区系研究[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(6): 1121-1126.

CHEN K S, WU J P. Fern flora of Meihuashan Nature Reserve in Fujian Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(6): 1121-1126.

[16] 邓元德, 许秀平. 福建省梁野山自然保护区的蕨类植物区系[J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(4): 58-62.

DENG Y D, XU X P. The fern flora of Liangyeshan Nature Reserve in Fujian Province[J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 28(4): 58-62.

[17] 谢宜飞, 朱恒, 陈慧, 等. 赣江源自然保护区蕨类植物区系研究[J]. *广西植物*, 2013, 33(6): 804-811.

XIE Y F, ZHU H, CHEN H, *et al.* Pteridophyte flora of Ganjiangyuan Nature Reserve[J]. *Guihaia*, 2013, 33(6): 804-811.

[18] 张伟清, 吴和平, 罗晓敏, 等. 江西马头山自然保护区石松类和蕨类植物多样性[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2018, 42(6): 603-610.

ZHANG W Q, WU H P, LUO X M, *et al.* The flora and resources of lycophytes and ferns in Matoushan Nature Reserve of Jiangxi Province[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2018, 42(6): 603-610.

[19] 张凯, 陈伟岸, 罗文启, 等. 海南五指山国家级自然保护区石松类和蕨类植物区系研究[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(4): 618-629.

ZHANG K, CHEN W A, LUO W Q, *et al.* Lycophytes and ferns flora of Wuzhishan National Nature Reserve in Hainan[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(4): 618-629.

[20] 韦灵灵, 陈珍传, 董仕勇. 广东西部云开山自然保护区蕨类植物多样性调查[J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(4): 303-312.

WEI L L, CHEN Z C, DONG S Y. Diversity survey on pteridophytes in Mt. Yunkai Nature Reserve, western Guangdong, China[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2011, 19(4): 303-312.

[21] 吴菲菲. 麻阳河国家级自然保护区蕨类植物研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

[22] 李国平, 杨鹭生. FOC 基础上的福建石松类及蕨类植物科属分类系统[J]. *武夷学院学报*, 2021, 40(12): 16-23.

LI G P, YANG L S. A preliminary study on the classification of extant lycophytes and ferns in Fujian Province based on flora of China (FOC)[J]. *Journal of Wuyi University*, 2021, 40(12): 16-23.

[23] 王婷, 舒江平, 顾钰峰, 等. 中国石松类和蕨类植物多样性研究进展[J]. *生物多样性*, 2022, 30(7): 45-72.

WANG T, SHU J P, GU Y F, *et al.* Insight into the studies on diversity of lycophytes and ferns in China[J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(7): 45-72.

[24] 国家林草局 农业农村部. 2021 年第 15 号. 国家重点保护野生植物名录[EB/OL]. (2021-09-09)[2023-05-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm.

[25] 周喜乐, 张宪春, 孙久琼, 等. 中国石松类和蕨类植物的多样性与地理分布[J]. *生物多样性*, 2016, 24(1): 102-107.

ZHOU X L, ZHANG X C, SUN J Q, *et al.* Diversity and distribution of lycophytes and ferns in China[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(1): 102-107.

[26] 张宪春. 中国现代石松类和蕨类植物分类系统概览[J]. *生物学通报*, 2015, 50(10): 1-3.

ZHANG X C. Overview of modern classification system of lycopodium and pteridophyte in China[J]. *Bulletin of Biology*, 2015, 50(10): 1-3.

[27] 尚帅斌, 范琳, 刘楠, 等. 昆仑山国家公园青海片区评估区种子植物区系研究[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(3): 491-501.

SHANG S B, FAN L, LIU N, *et al.* Flora of seed plants in Qinghai Area of the Kunlun Mountain National Park[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(3): 491-501.

[28] 梁胜, 王梦楠, 胡希军, 等. 广东南雄丹霞梧桐自然保护区蕨类植物区系研究[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(7): 1230-1236.

LIANG S, WANG M N, HU X J, *et al.* Fern flora of firminana danxiaens nature reserve in Nanxiong city, Guangdong Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(7): 1230-1236.

[29] 梁胜, 王梦楠, 韦宝婧, 等. 丹霞地貌石松类和蕨类植物区系比较研究[J]. *生态科学*, 2022, 41(2): 166-173.

LIANG S, WANG M N, WEI B J, *et al.* Comparative study of lycophytes and ferns on Danxia landform[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(2): 166-173.

[30] 谢艳秋, 魏凯, 张群, 等. 海坛岛及周边岛屿野生石松类和蕨类植物区系与地理分布研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2022, 42(1): 53-62.

XIE Y Q, WEI K, ZHANG Q, *et al.* Flora and geographical distribution of the wild lycophytes and ferns in Haitan Island and surrounding islands[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2022, 42(1): 53-62.

[31] 刘利, 季长波, 张梅, 等. 中国不同地区滨海湿地植物区系特点及其影响因素[J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(10): 44-48.

LIU L, JI C B, ZHANG M, *et al.* Phytogeography distribution and environmental factors from different coastal wetlands in China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50(10): 44-48.

[32] ROMDAL T S, ARAÚJO M B, RAHBEEK C. Life on a tropical planet: Niche conservatism and the global diversity gradient[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(3): 344-350.

[33] 郭舜, 黄启堂, 黄磊, 等. 福建武平中山河国家湿地公园蕨类植物区系研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(4): 697-701.

GUO S, HUANG Q T, HUANG L, *et al.* Study on the fern flora in Zhongshan River National Wetland Park of Wuping, Fujian Province[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(4): 697-701.