DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 05. 069

文章编号：1006-6616（2021）05-0855-12

西南极乔治王岛新生代古生物特征及古环境探讨

韦利杰[1,2,3]

WEI Lijie[1,2,3]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 中国地质调查局极地地学研究中心，北京 100081；
3. 自然资源部新构造运动与地质灾害重点实验室，北京 100081
1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Research Center of Polar Geosciences*, *China Geological Survey*, *Beijing* 100081, *China*;
3. *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

WEI L J, 2021. Cenozoic paleontological characteristics and paleoenvironment of King George Island, West Antarctica [J]. Journal of Geomechanics, 27 (5): 855 - 866. DOI: 10. 12090/j. issn. 1006 -6616. 2021. 27. 05. 069

Abstract: A set of high-K and low-Al tholeiites intercalated with volcanic clastic rocks developed in King George Island (Western Antarctica), belonging to the island arc volcanic rock series. Moreover, the longest record of glacial deposition in Antarctica is preserved on the island, which provides the important evidence of the Antarctic Ice Sheet evolution. Fossils of plant leaves, sporopollen, stems, invertebrate animals and bird footprints which were abundantly found in the outcropped Cenozoic continental strata of King George Island, started to decrease from the Eocene to the early Miocene, showing an obvious downward trend of plant diversity, and the surviving sparse vegetation was only the tundra species around the glacier. The studies of ice marine strata and paleontology suggest that the late Oligocene marine strata mainly correspond to high-energy environment and the early Miocene marine strata correspond to low energy environment. This paper explores the Cenozoic paleontological characteristics and paleoenvironment of King George Island, and the investigations allow us to understand the trend of paleontological diversity and provide evidence for the reconstruction of the Antarctic paleoenvironment as well.

Key words: West Antarctica; Cenozoic; King George Island; paleontology; paleoenvironment

摘　要：西南极乔治王岛发育有一套高钾低铝的拉斑玄武岩，夹火山碎屑岩，属于岛弧火山岩系列。该岛还保存了南极最长的冰川沉积记录，是研究南极冰盖演化历史的重要证据。乔治王岛出露的新生代陆相地层中含有丰富的植物叶、孢粉、茎干、无脊椎动物化石及鸟类足印的痕迹化石等，从始新世到早中新世，化石逐渐减少，表明植物多样性呈明显下降趋势，幸存的稀疏植被被严格限制在冰川周缘的苔原物种上。冰海相地层与古生物研究表明，晚渐新世海相地层主要对应高能环境，早中新世海相地层对应低能环境。对乔治王岛新生代古生物特征及古环境的探讨，不仅理解了古生物及多样性的变化趋势，也为重建南极古环境提供证据。

基金项目：国家自然科学基金重点项目（41930218）；中国地质调查局地质调查项目（DD20160060）；中国-智利国际合作项目（中智合作南设得兰群岛 1∶25 万地质填图）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41930218), the Geological Investigation Project of the Chinese Geological Survey (Grant No. DD20160060), and the Sino-Chile International Cooperation Project (The geological mapping of South Shetland Island at 1∶250000 scale in Sino-Chile cooperation)

第一作者简介：韦利杰（1974—），女，博士，副研究员，从事地层与古生物学方面研究工作。E-mail：weilijie74@163. com

收稿日期：2021-05-31；**修回日期**：2021-08-31；**责任编辑**：范二平

引用格式：韦利杰，2021. 西南极乔治王岛新生代古生物特征及古环境探讨［J］. 地质力学学报，27（5）：855-866. DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 05. 069

关键词：西南极；新生代；乔治王岛；古生物；古环境
中图分类号：Q91；P532 **文献标识码**：A

0 引言

乔治王岛是西南极南设得兰群岛（South Shetland Islands）中最大的岛屿，长 95 km，宽 25 km，面积约 1160 km^2，位于南设得兰群岛的北端，南距南极半岛（Antarctic Peninsula）约 120 km。中国第一个南极科学考察站——长城站（Great Wall Station）就建在乔治王岛的菲尔德斯半岛（Fildes Peninsula）。

乔治王岛介于南纬 61°50′—62°15′和西经 57°30′—59°00′之间，该区域接近南极大陆，且 90% 以上的区域被冰雪覆盖，附近的海洋每年从 4 月上旬到 12 月上旬都会被海冰覆盖，气候寒冷，每年 4 月至 11 月的平均气温低于 0 ℃。由于该岛四面环海，全年气温温差不大、多云、潮湿，西风强烈，夏季平均气温约为 1.5 ℃，冬季则为 -5 ℃。由于南极严酷而独特的自然地理条件，现仅在南极冰盖边缘生长植物，且隐花植物占优势，仅有两种开花植物生长，南极漆姑草（*Colobanthus quitensis*）和南极发草（*Deschampsia antarctica*）（Smith，1994）。

乔治王岛因出现了从晚白垩世到古近纪沉积的各种陆相化石和早中新世海相化石而闻名，南极最长的冰川沉积记录位于西南极南设得兰群岛的乔治王岛（Oh et al.，2020）。无论是全球性的还是区域性古气候事件所引起的环境变化，都对生物产生深远影响。生物要么被迫适应不断变化的环境，要么迁移到更有利的栖息地，要么灭绝。所有这些对生物产生影响的古气候事件都保留在地层和沉积记录中，因此，可以用保存在地层中的古生物重建古环境和古气候事件等。南极的动植物化石一直以来都是理解世界最南端的历史及其地球气候历史的关键证据，特别是对理解南极冰盖演变历史做出了独特的贡献。

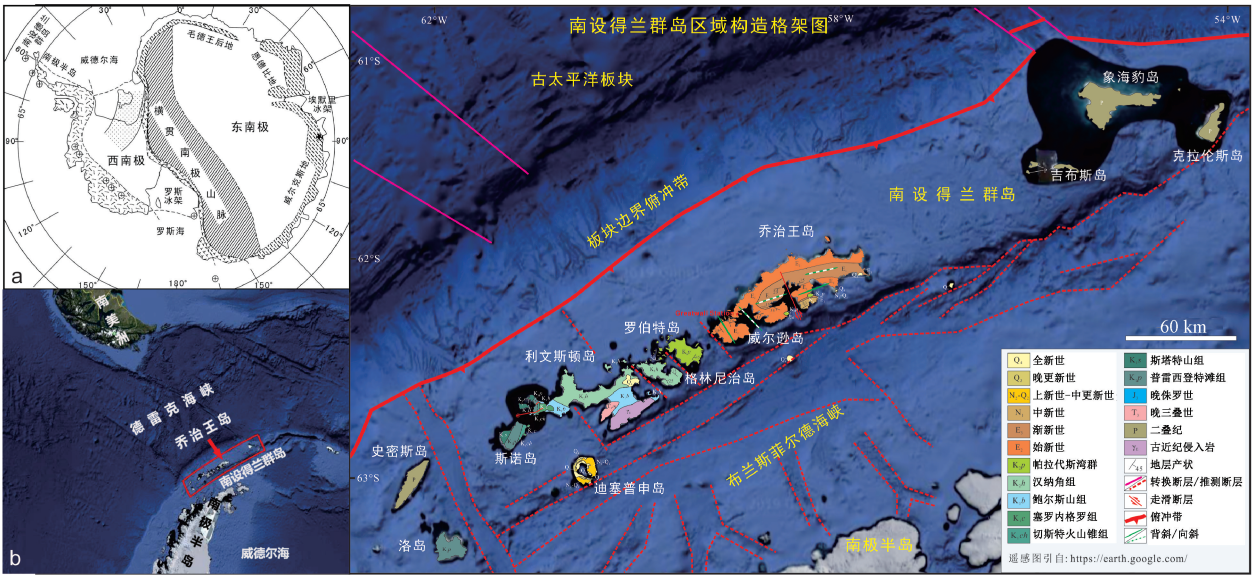
文章通过对乔治王岛地层中的古生物化石进行系统的整理，总结研究区域的古生物特征，探讨乔治王岛新生代古环境，揭示西南极乔治王岛新生代古生物及多样性的变化趋势，为南极冰盖演变历史提供证据。

1 区域地质概况

南设得兰群岛位于古太平洋板块与南极板块的拼合部，主要由古太平洋板块向南极板块的俯冲过程中形成一套统称为安第斯侵入岩套和南极半岛火山岩群。中新生代时，这里经历了强烈的火山活动。布兰斯菲尔德海峡（Bransfield Strait）在约上新世之后才将南极半岛与南设得兰群岛分开（Barker et al.，1991；陈廷愚等，1995）。南设得兰群岛呈北东向分布，长达 550 km，是一个中新生代的活动带，火山活动有从西南向东北迁移的趋势，白垩纪岩浆作用主要发生在西南部的利文斯顿岛（Livingston Island）、格林尼治岛（Greenwich Island）、罗伯特岛（Robert Island）和纳尔逊岛（Nelson Island），而到新生代则迁移到东北部的乔治王岛和部分纳尔逊岛（Kraus et al.，2010）。乔治王岛新生代发育有一套高钾低铝的拉斑玄武岩，夹火山碎屑岩，属于岛弧火山岩系列（图 1）。

2 地层特征

乔治王岛主要由新生代岛弧火山岩系组成，但其中 90% 以上的面积为冰盖和冰川覆盖（Birkenmajer，1989）。乔治王岛的古近系沉积物是与混合喷发型活火山相关的沉积物（Smellie et al.，1984），它主要由火山岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积物组成（Haase et al.，2012），这些沉积物含植物叶、茎干、孢粉以及鸟类足印等遗迹化石，蕴含着丰富的古环境信息。乔治王岛的始新世至渐新世反映了火山、冰川和海侵的复杂历史，出露有始新世和渐新世冰川的零碎沉积记录（Birkenmajer et al.，2005）。目前乔治王岛发现的最古老的冰川是波罗内兹冰川，年龄是渐新世晚期（Troedson and Smellie，2002），而较年轻的梅尔维尔冰川则是中新世早期（Troedson and Riding，2002）。在乔治王岛的梅尔维尔角（Melville Piont）发现的冰川作用，是迄今为止在南极半岛地区发现的唯一新近纪中新世早期的冰川海洋层序（Birkenmajer



a—南极大地构造单元简单示意图（底图据位梦华，1986）；b—南设得兰群岛地理位置图（底图据 Google Earth）

图 1　乔治王岛地理位置及南设得兰群岛区域构造格架图（底图据 Google Earth）

Fig. 1　Location of King George Island and structural frame and tectonic map of the South Shetland Islands (based on Google Earth)
(a) Simple diagram of geotectonic units in Antarctica (the original diagram after Wei, 1986); (b) Geographical map of the South Shetland Islands (based on Google Earth)

et al.，1987)，这些冰川沉积序列是起源于南极大陆但被乔治王岛上的局部冰川所改造过的沉积物，蕴含着丰富的古环境和古环境信息（Troedson and Smellie，2002）。这套地层对于了解南极新生代生物多样性极为重要。

乔治王岛的新生界地层单位主要包括：下始新统的菲尔德斯半岛群（Fildes Peninsula Group）、巴兰诺夫斯基冰川群（Baranowski Glacier Group）和埃斯库拉湾群（Ezcurra Inlet Group），中始新统的埃内坎角群（Hennequin Point Group），上渐新统的迪斯特拉克申湾组（Destruction Bay Formation）、波罗内兹湾组（Polonez Cove Formation）和阿德默勒尔蒂湾群（Admiralty Bay Group），下中新统梅尔维尔角组（Melville Piont Formation）、博伊角组（Boy Point Formation）和维瑟尔湾组（Wesel Cove Formation）等地层。到目前为止，在乔治王岛还没有发现晚始新世—早渐新世、中—晚中新世和上新世含植物地层。这些地层单位的露头主要散布于岛屿南部朝着布兰斯菲尔德海峡开口的海湾沿岸，以马克斯韦尔湾（Maxwell Bay）和阿德默勒尔蒂湾（Admiralty Bay）出露相对较广。乔治王岛地层综合柱状图及定年依据见图 2。

3　古生物特征

乔治王岛出露上白垩统—下中新统沉积地层，晚白垩世产树干及假山毛榉科、松柏类和蕨类等古生物化石（Birkenmajer，1982）。乔治王岛新生代古生物化石包括蕨类、针叶林和被子植物叶及茎干等植物大化石，孢粉、沟鞭藻、硅藻等微体古生物化石，无脊椎动物化石以及鸟类足印的痕迹化石等。含古生物化石的新生代岩石地层单位及古生物特征如下。

3.1　下始新统菲尔德斯半岛群

乔治王岛菲尔德斯半岛半三角（Halfthree Point）地区出露的一套火山-沉积岩地层，其中夹有厚约 5 m 的灰色凝灰质粉砂岩，发现 4 种类型的植物叶化石 *Podocarpus fildesensis*、*Sphenopteris* sp.、*Nothofagus* sp.、*Dicotylophyllum* sp.，其中 *Podocarpus* 占优势（沈炎彬，1994）。菲尔斯半岛半三角地区孢粉植物群数量和类型都非常丰富，发现 35 属 60 种孢子和花粉。其中蕨类孢子约占 81.5% 以上，Gleicheniaceae、Cyatheaceae 和 Adiantaceae 占绝对优势；裸子植物花粉约占 2%，有 *Araucariacites australis*、? *Abietineaepollenites microatatus*、*Microcachryidites* sp.、*Phyllocladidites* sp.、*Podocarpidites*

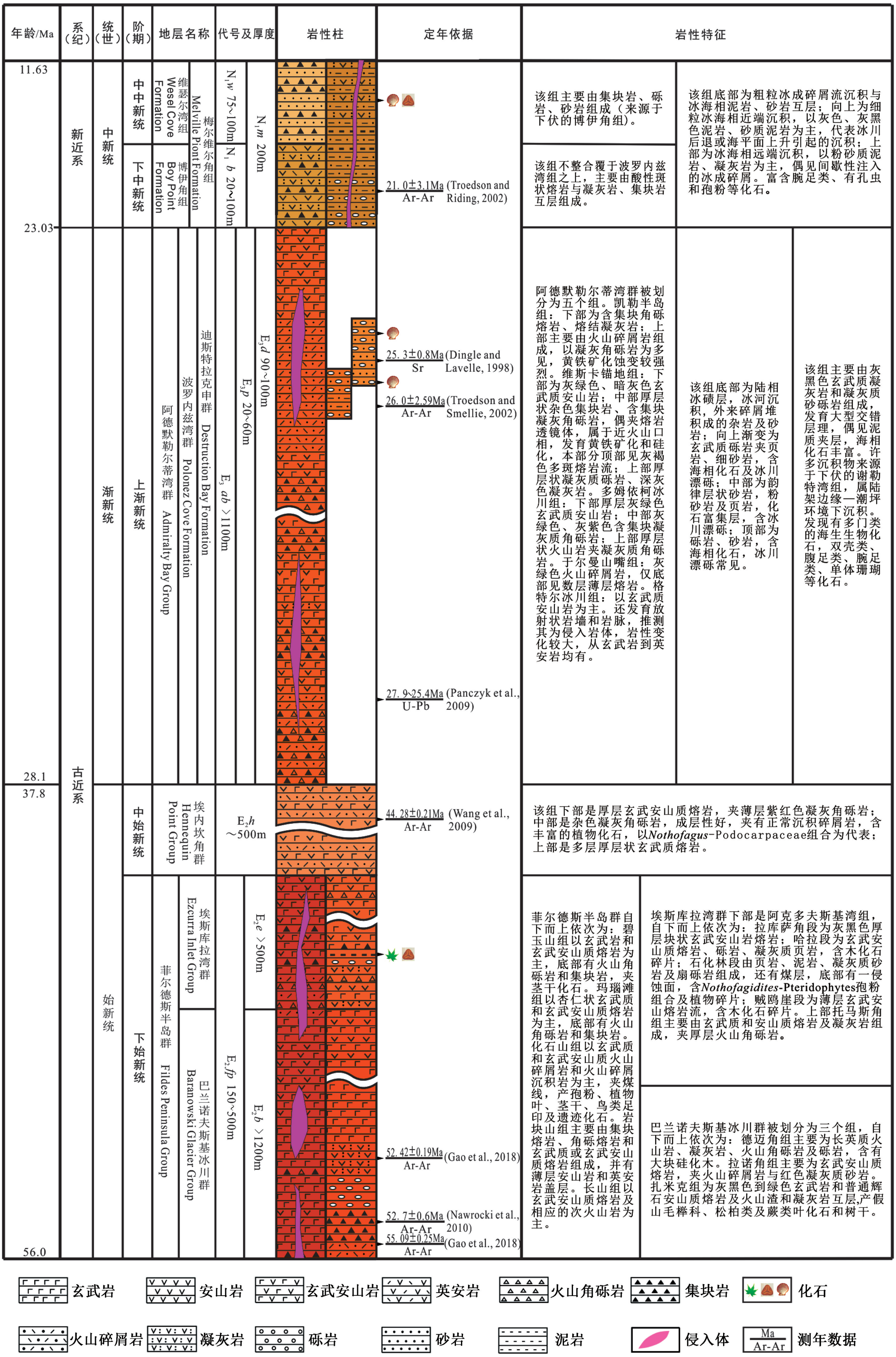


图2 乔治王岛地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of King George Island *ellipticus*、*Gnetaceaepollenites* sp. 和 *Dacrydium* sp. 等；被子植物花粉有 *Nothofagidites* cf. *N. senectus*、*N.* cf. *N. brachyspinulosus*、*N.* cf. *N. rocaensis*、*N. nanus*、*N.* sp.、*Cranwellia* sp.、*Gothanipollis bassensis*、*Triporopollenites* sp.、*Tricolporopollenites* spp. 和 *Tricolporites* spp. 等，约占 3%~5%；除了孢子和花粉外，还有种类较多的真菌孢子 13 属 38 种（沈炎彬，1990，1994；曹流，1990）。

菲尔德斯半岛化石山（Fossil Hill）和磐石湾（Rocky Cove）凝灰质粉砂岩中发现的 40 种不同植物的植物大化石，其中蕨类孢子有 4 属 6 种；裸子植物花粉 5 属 11 种，主要有 *Dion antarctica*、*Araucaria* sp.、*Podocarpus*（*Dacrycarpus*）*tertiarius*、*Podocarpus* spp.、*Acmopyle antarctica*、*Papuacedrus shenii*；被子植物花粉 7 属 23 种，主要有 *Nothofagus subferruginea*、*Nothofagus oligophlebia*、*Nothofagus* sp.、*Lomatia* sp.、*Pentaneurum dusenii*、? *Myrtiphyllum bagnalense*、*Rhoophyllum nordenskjoeldi*、? *Oreopanax guinazui*、*Dicotylopyllum elegans*、*Dicotylophyllum latitrilobatum*、*Dicotyloph-yllum* spp.（Barton，1965；Lyra，1986；Czajkowski and Rosler，1986；李浩敏和宋德康，1988；李浩敏和沈炎彬，1990；沈炎彬，1990，1994；Li，1992）。化石山所产的鸟类足印，至少有 4 种类型。第 1 类是唯一已被确定的 *Antarctichnus fuenzalidae*，可能属于秧鸡类（Rallidae）；第 2 类是平胸类（ratite）或鹤类（Gruiform），脚趾宽，最大的指长达 180 mm，可能属大型的陆生鸟类；第 3 类是鸭类（anatid），具有蹼及较短而粗的趾，与鸭或鹅类相近；第 4 类有 4 个发育很完整的脚趾，属不同鸟科的遗迹（Covacevich and Rich，1982；李建军和甄朔南，1994；沈炎彬，1994）。

在菲尔德斯半岛化石山组孢粉植物群中共发现 95 种类孢粉，其中以苔藓类、蕨类最为繁多，占总种类的 51%多，分异度都很高，占优势的孢子属有 *Cyathidites*、*Gleicheniidites*、*Lycopodiumsporites*、*Baculatisporites*、*Laevigatosporites* 和 *Polypodiaceaesporites* 等；其次为被子植物，约占 29%；再次为菌藻类，占 10%多；裸子植物的种类最少，约占 9%（宋之琛，1998）。

菲尔德斯半岛磐石湾的孢粉含量很丰富：蕨类孢子约占 38%，主要是 Cyatheaceae 和 Lygodiaceae；裸子植物花粉约占 30%，主要有 *Dacrycarpites* sp.、*Trisaccites* sp.、*Podocarpidites ellipticus*、*Phyllocladidites* sp.、*Microcachrydites* sp.、*Araucariacites* sp. 等；被子植物花粉约占 32%，主要包括 *Nothofagidites cf. N. flemingii*、*Nothofagidites cf. N. emarcidus*、*N.* spp.、*Proteacidites* sp.、*Myrtaceidites* sp.、*Momipites* sp.、*Triorites* sp.、*Peninsulapollis gillii*、*P. truswelliae*、*Triporopollenites* sp.、*Tricolporopollenites* sp. 等（Cao，1992）。Torre（1984）则记述了磐石湾（Rocky Cove）的硅化木，被子植物有 *Nothofagoxylon antarcticus* 和 *Cupressinoxylon parenchymatosum*，还记录了裸子植物 *Araucarioxylon* 和 *Podocarpoxylon* 两属的存在。

Poole et al.（2001）在乔治王岛菲尔德斯半岛柯林斯冰川植物区系发现的茎干化石包括：裸子植物有 Cupressaceae（*Cupressinoxylon* sp.）、Podocarpaceae（*Podocarpoxylon fildesense*），被子植物有 Nothofagaceae（*Nothofagoxylon corrugatus*、*N. neuquense*、*Nothofagus scalariforme*）、Eucryphiaceae（*Eucryphiaceoxylon eucryphioides*）、Myrtaceae（*Myrceugenelloxylon antarcticus*）。Oh et al.（2020）在菲尔德斯半岛苏菲菲尔德角采集硅化木化石，裸子植物有 Araucariaceae（*Agathoxylon antarcticum*、*A. pseudoparenchymatosum*）、Podocarpaceae（*Phyllocladoxylon antarcticum*、*Protopodocarpoxylon araucarioides*），被子植物有 Atherospermataceae、Cunoniaceae、Eucryphiaceae、Monimiaceae、Myrtaceae、Nothofagaceae 和 Rubiaceae。

Del Valle et al.（1984）在巴顿半岛（Barton Peninsula）发现 5 种类型的假山毛榉科植物叶化石，可以鉴定的只有 2 种：*Nothofagus subferruginea* 和 *N. densinervosa*，其他是具有环结脉的双子叶植物。这些假山毛榉科植物叶化石在费尔德斯半岛的化石山植物群中也都发现过类似的化石叶。

3.2　下始新统巴兰诺夫斯基冰川群

乔治王岛的阿德默勒尔蒂湾巴兰诺夫斯基冰川群上部扎米克组植物叶化石呈现 *Nothofagus-Laurophyllous* 阔叶林组合（Birkenmajer and Zastawniak，1989），产树干及叶化石假山毛榉（*Nothofagus* sp.）、松柏类及蕨类（Mozer et al.，2015）。

3.3　下始新统埃斯库拉湾群

乔治王岛的阿德默勒尔蒂湾埃斯库拉湾群下部阿克多夫斯基湾组拉库萨角段含木化石碎片，

石化林段含 *Nothofagidites-Pteridophyte* 孢粉组合、植物叶及木化石，贼鸥崖段含木化石碎片（Birkenmajer，1987）。托马斯角组以 *Nothofagus* 为主，还有蕨类及罗汉松科的分子（Birkenmajer and Zastawniak，1989）。在埃斯库拉湾（Ezcurra Inlet）南岸出露埃斯库拉湾群上部托马斯角组，层内有茎干和植物叶化石等植物残骸，植被主要由 Podocarpaceae-*Araucaria-Nothofagus* 组成（Mozer，2012）。

Stuchlik（1981）报道了阿德默勒尔蒂湾埃斯库拉湾群的孢粉，包括 36 种类型的孢子和花粉，是以 *Nothofagus-Pheridophyta* 组合为特征。Mozer（2012）研究表明埃斯库拉湾孢粉组合以 Podocarpaceae-*Araucaria-Nothofagus* 为主，林下生长着喜湿和喜热的蕨类植物。

3.4 中始新统埃内坎角群

阿德默勒尔蒂湾的埃内坎角（Point Hennequin）的德拉根湾（Dragon Cove）和瓦维尔山（Mount Wawel）的 3 个层位发现以 *Nothofagus*-Podocarpaceae 为主，含丰富松科的植物叶、根、种子和果实等植物大化石，罗汉松科主要有 *Dacrydium*（*Dacrydioides*）、*Acmopyle* 和 *Stachycarpus*，被子植物主要有 *Nothofagus*、*Roophyllum*、*Rubus* 和 *Cupania* 等，其特点是小型及中型叶超过 95%，叶缘具齿，叶脉达缘，类型单调（Zastawniak，1981；Zastawniak et al.，1985）。

段威武和曹流（1998）在阿德默勒尔蒂湾的埃内坎角上部凝灰质砂泥岩夹层中发现有近 40 种孢粉化石：菌类孢子有 10 多种，约占孢粉组合总量的 8%；蕨类孢子有近 15 种，约占 45%，为孢粉组合的主要成分；裸子植物花粉主要有 *Trisaccites microsaccatum*、*Dacrycarpites australiensis*、*Podocarpidites marwickii*、*Phyllocladidites mawsonii*、*Phyllocladidites* sp. 和 *Microcachry ditesantarcticus* 等 8 种，约占 42%，为孢粉组合的优势种群；被子植物花粉含量少，仅发现 5 种，约占 5%，主要成分为 *Nothofagidites cf. flemingii*、*Nothofagidites cf. saraensis* 和 *Nothofagidites* spp. 等。

阿德默勒尔蒂湾的瓦维尔山发现以节肢动物为主的痕迹化石，包括：*Glaciichnium australis* 和 *cf. Pterichnus*（Uchman et al.，2018）。

3.5 上渐新统迪斯特拉克申湾组

Troedson and Riding（2002）在梅尔维尔角迪斯特拉克申湾组中发现陆相孢粉和海相沟鞭藻化石，含量很低，孢粉组合中 *Nothofagidites fusca* 丰富，还含有 bisaccate 花粉（podocarps）、*Cyathidites* spp.（蕨类）和 *Inaperturopollenites hiatus* 等陆相孢粉化石；海相沟鞭藻化石有？*Bitectatodinium tepikiense*、*Lejeunecysta* spp.、*Operculodinium centrocarpum* 和 Spiniferites ramosus 等。

迪斯特拉克申湾组产原位双壳类、腹足类、独居珊瑚和腕足类，腕足类动物有 *Discinisca*、*Pachymagas*、*Neothyris*、*Rhizothyris*、*Magellania* 和？*Magella*（Birkenmajer，1987）。

3.6 上渐新统波罗内兹湾组

波罗内兹湾组含有叠层石、有孔虫、海绵、珊瑚、双壳类、棘球类和腕足类（Birkenmajer，1991），最上部的腕足动物有 *Rhynchonellida*，*Liothyrella* 和 *Rhizothyris*（Bitner and Thomson，1999；Bitner et al.，2009），浮游有孔虫有 *Chiloguembelina*、*Globigerina* 和 *Globorotalia*（Gazdecki，1989）。Hryniewicz and Gazdzicki（2016）在乔治王湾洛角和海狮岬的波罗内兹湾组斯克拉瓦段的下部发现双壳类 *Pholadidea gradzinskii* 化石，其生存环境为浅海环境。棘皮类包括 *Caenopedina aleksandrabitnerae* 和 *Caenopedina aleksandrabitnerae*（Kroh，2014）。

波罗内兹湾孢粉组合以草本植物为主，伴有假山毛榉和罗汉松植物（Kymes，2015）。在波罗内兹湾组还发现 *Bitectatodinium tepikiense* 沟鞭藻化石（Jonkers，1998）。

3.7 上渐新统阿德默勒尔蒂湾群

阿德默勒尔蒂湾的凯勒半岛（Keller Peninsula）地层属于阿德默勒尔蒂湾群下部，其中发现植物叶化石 *Nothofagus*（Nothofagaceae）（Kellner et al.，2007）。Lucas and Lacey（1981）在凯勒半岛采集 11 块硅化木，归为 5 类，其中包括 *Dodoxylon pseudoparenchymatosum*、*D. kellerense* 和 *D.* sp. 等。

3.8 早中新世梅尔维尔角组

梅尔维尔角组地层中的古生物化石种类和数量都非常丰富，隶属于刺胞动物门（Cnidaria）、软体动物门（Mollusca）、环节动物门（Annelida），节肢动物门（Arthropoda）、苔藓动物门（Bryozoa）、腕足动物门（Brachiopoda）和棘皮动物门（Echinodermata），其中软体动物门双壳类

(Bivalve) 占总动物群的 57.8%，软体动物门腹足类 (Gastropod) 占 20.4%，刺胞动物门珊瑚类 (Coral) 占 13.5%，节肢动物门十足类 (Decapod) 占 6.1%等 (Whittle et al.，2014)。双壳类主要有 *Nuculidae*、*Sarepdidae*、*Malletiidae*、*Hiatellidae*、*Periplomatidae*、*Limopsidae*、*Limidae* 和 *Pectinidae* (Jonkers，2003；Anelli et al.，2006；Whittle et al.，2012)。腹足类主要有 *Volutidae*、*Cerithiidae*、*Epitonidae*、*Turitellidae*、*Naticidae*、*Buccinidae*、*Apomhaidae*、*Philinidae* 和 *Mathildidae* 等 (Beu，2009；Whittle et al.，2014)。珊瑚类主要是 *Flabellum* (Birkenmajer et al.，1983)。十足类有 *Homolodromiidae* 和 *Nephropoidea* (Whittle et al.，2014)。苔藓虫主要是 *Microporoidea* (Birkenmajer and Łuczkowska，1987；Hara and Crame，2004)。腕足类主要被鉴定为 *Liothyrella* 和 *Paraldingia* (Bitner and Crame，2002)。软体动物还有 *Conotheca*、*Microcornus*、*Parkula*、*Hyptiotheca*、*Hyolithes*、? *Pararacornus*、*Yochelcionella*、*Anabarella*、*Pelagiella*、*Beshtashella*、*Cupitheca* (Wrona，2004)。棘皮类包括 *Cidaridae*、*Echinidae* 和 *Schizasteridae* (Birken-majer and Łuczkowska，1987；Jesionek-Szymańska，1987)。节肢动物还有 *Albrunnicola bengtsoni*、*Liangshanella birkenmajeri*、*Melvillella corniculata*、*Mongolitubulus squamifer*、? *Zepaera* sp. 和? *Dabashanella* sp. 等 (Wrona，2009)。

Troedson and Riding (2002) 在梅尔维尔角组中发现种类稀少的陆相孢粉和海相沟鞭藻化石：其中梅尔维尔角组中陆相孢粉化石主要有 bisaccate 花粉和 *Cyathidites* spp.，*Nothofagus* spp. 很少；海相沟鞭藻化石 *Brigantedinium* 和 *Lejeunecysta* 占优势，还有少量的 *Lejeunecysta cf. communis*、*Protoperidinium* spp.、? *Selenopemphix* 和 *Selenopemphix nephroides* 等；另外在 1 个样品中还发现有丰富的 *Leiospheres*。Warny et al. (2016) 认为梅尔维尔角组孢粉组合以 *Nothofagidites fusca* 为主，还有零星的 *Podocarpidites* sp.、Asteraceae、Caryophyllaceae、*Chenopodipollis* 和苔藓孢子 *Coptospora* sp. 等。

梅尔维尔角组的微体动物化石还包括：有孔虫主要有 *Uvigerina*、*Cyclammina*、*Globobulimina*、*Haplophragoides* 和 *Pullenia*；硅藻有 *Actinoptychus*、*Asteromphalus*、*Coscinodiscus*、*Trinacria* 和 *Triceratium*；还有金藻类 *Bolboforma reticulata*、硅鞭藻和海绵骨针等 (Birkenmajer et al.，1983)。梅尔维尔角组有孔虫可区分出 2 个组合，下部为 *Cibicides-Cibicidoides* 组合；上部为 *Cribrostomoides-Cyclammina-Globobulimina* 组合，时代都相当于早中新世 (Birkenmajer and Łuczkowska，1987)。

4　古气候与古环境探讨

4.1　早始新世

始新世时，乔治王岛仍为岛弧拉斑玄武岩喷发，然而出现了河、湖相火山细碎屑沉积，有不连续的煤线分布 (沈炎彬，1994)，菲尔德斯半岛下始新统菲尔德斯半岛群的化石山组最为代表，在阿德默勒尔蒂湾埃斯库拉湾群阿克托夫斯基湾组上部及托马斯角组也有早始新世的沉积。

菲尔德斯半岛植物群植物叶化石都以中型叶为主，种类丰富，有落叶树种 (*Nothofagus*)、常绿树种 (*Dicotylophyllum elegans*)、松柏类植物 (*Podocarpus*、*Araucaria*、*Papuacedrus*)、紫萁属 (*Osmunda*)、苏铁 (*Dion*) 及许多喜湿喜暖的蕨类。半三角地区以 *Acmopyla* 为主，化石山以 *Podocarpus* 占优势。假山毛榉属 (*Nothofagus*) 是研究南半球植物生物地理区的关键属，现在生长在南美、新西兰、澳大利亚、塔斯马尼亚、新几内亚及新喀里多尼亚雨量充沛的温带—亚热带雨林，在高纬度或高海拔地区由于气候条件过分严峻才出现矮化现象。*Dicotylophyllum elegans* 叶尖细长，与滴水叶尖近似，说明气侯潮湿，雨量比较充沛，反映了与现代暖温带雨林相类似的气侯环境。紫萁属与苏铁植物的存在都反映当时气候较温暖。通过对化石山 40 多种植物叶化石的叶相特征进行分析发现，以中型叶为特征，全缘叶占 40%左右，所代表的年均温约为 10 ℃。菲尔德斯半岛植物区代表一种与现代暖温带—亚热带雨林植被相类似的面貌 (沈炎彬，1989；李浩敏和沈炎彬，1990；李浩敏，1994)。

菲尔德斯半岛群孢粉以蕨类植物占优势，蕨类这些孢子的母体植物可能属于桫椤科、里白科、石松科、水龙骨科和紫萁科，还有海金沙科、蚌壳蕨科等的少数属种。裸子植物多数具气囊花粉，虽有气囊上的区别，但它们均和罗汉松科有关系，

在南半球古近纪分布广泛。被子植物花粉 *Proteacidites*、*Nothofagidites*、*Tricolpites*、*Tricolporites* 和 *Triorites* 等和南半球广泛分布的山龙眼科、假山毛榉属以及具三沟和三孔沟花粉的属种有关系。半三角地区孢粉植物群反映了一种低山湖泊或湖沼岸边及其附近山坡生长着蕨类植物为主的植被，在这一植被中还生长着由 Araucariaceae-Podocarpaceae-*Nothofagus* 等组成的稀疏针阔叶混交林。化石山孢粉植物群代表了以假山毛榉属和罗汉松科为主的针阔叶混交林，山龙眼科的一些属种和其他一些被子植物位于林冠层，在林下还生长杜鹃科、小二仙草科等的灌木、草本及大量的蕨类植物，水体及其周围生长有眼子菜及菌藻类分子。菲尔德斯半岛群孢粉植物组合特征反映了暖温带—亚热带的气候特征，环境湿润（曹流，1994；宋之琛，1998）。

菲尔德斯半岛群所含的真菌孢子、孢粉、植物叶和茎干化石都是陆生植物残骸，虽然经过一定距离搬运，但并不是很远，从古生物推测菲尔德斯半岛地区在早始新世应是淡水湖相沉积，可能临近海岸（沈炎彬，1989，1990，1992）。

宋之琛（1997）对阿德默勒尔蒂湾埃斯库拉湾群阿克托夫斯基湾组上部石化林段的孢粉分析得出其孢粉组合以水龙骨科等孢子占优势为特征，与菲尔德斯半岛群化石山组孢粉植物群的类似。石化林段孢粉植物群代表了以假山毛榉属为主的森林，林下生长有山龙眼科、杜鹃科等的灌木及大量蕨类植物，水体中生长有眼子菜及绿藻植物，认为其地质时代为中—晚始新世，表明了暖温带—亚热带温暖而湿润的环境特征。在埃斯库拉湾南岸出露埃斯库拉湾群上部托马斯角组，层内有茎干和植物叶化石等植物残骸，主要由罗汉果科-南洋杉-白桦组成，表明有一种潮湿和嗜热的蕨类植物在火山活动中断期间生长在乔治王岛的火山斜坡和周围低地地区，反映了潮湿、温暖的气候环境，有可能与化石山组上部地层相当。

化石山菲尔德斯半岛群有大量的鸟类足迹及遗迹等化石，说明有过水流作用，但水体不稳定，降雨期水域面积扩大，雨期过后水域面积缩小，反映了丘间或低地河流的特点（李建军和甄朔南，1994）。现今秧鸡类分布比较广泛，但一般都在温暖潮湿的环境中。在有些四季变化较大地区，某些秧鸡类还有迁徙的习惯。这说明秧鸡类适应不了恶劣的环境。因此，南极在始新世时应该比较温暖潮湿（李建军和甄朔南，1994）。乔治国王岛的大多数具有宽环的化石木反映出真正有利的生长条件，因为较宽的年轮表明树木生长迅速，这与有利的气候有关（Oh et al.，2020）。

总之，早始新世时，乔治王岛地区气候温暖、潮湿、降雨最多，有利于植物生长，反映了暖温带—亚热带的植被与气候特征。

4.2 中始新世

中始新世埃内坎角群的植物面貌与埃斯库拉湾群和菲尔德斯半岛群有显著区别，埃内坎角群的植物群类型单调，小型叶和中型叶占95%以上，叶缘具齿，叶脉达缘，以 *Nothofagus*-Podocarpaceae 组合为代表，与现代澳大利亚寒温或暖温带雨林植被类似（Zastawniak，1981；Zastawniak et al.，1985），说明中始新世温度比早始新世偏低。瓦维尔山节肢动物的出现与气候降温很好地吻合（Uchman et al.，2018）。中始新世埃内坎角群的孢粉组合特征反映其周围古植被为由松柏类和 *Nothofagus* 等组成的针阔叶混交林，林下植被主要由 Gleicheniaceae、Cyatheaceae、Adiantaceae、Lygodiaceae 和 Polypodiaceae 等科的蕨类植物组成，沉积环境为近中低山区的湖沼环境，气候温暖潮湿（段威武和曹流，1998）。

因此，中始新世时，乔治王岛地区是温暖湿润的古气候环境，植被与现代生长在南美、澳大利亚及新西兰温带或凉温带的常绿或落叶植被接近。

4.3 晚渐新世

乔治王岛渐新世植物层仅见于乔治王湾和梅尔维尔角下部地层。上渐新统波罗内兹湾孢粉组合以草本植物为主，伴有假山毛榉和罗汉松植物（Kymes，2015）。上渐新统迪斯特拉克申湾组中，*Nothofagus* 是优势花粉，表明古近纪结束时被子植物的多样性降低了，幸存的稀疏植被被严格限制在冰川周缘的苔原物种上，假山毛榉和罗汉松可能是灌木（Warny et al.，2016）。上述孢粉特征表明，渐新世植物面貌与始新世植物面貌有一定差别，它或许反映了当时气候与始新世相比已经变冷，环境已经开始恶劣，不利于植物生长。

波罗内兹湾组腕足动物组合标本丰富，但多样性低。波罗内兹湾组动物化石组合特征表明，波罗内兹湾冰川海相地层形成于滨浅陆架环境

(Birkenmajer，1987)。

总而言之，乔治王岛的气候晚渐新世时相比始新世时已经变冷，稀疏的植被类似于现代南极洲周围的岛屿，反映了温凉—寒冷气候或冰川、荒漠等贫瘠或恶劣的生态环境。

4.4 早中新世

梅尔维尔角组的动物群包括单体珊瑚、多毛类、双壳类、腹足类、甲壳类、棘皮类和十足类等。微生物的代表是众多的底栖钙质和砂质有孔虫、硅藻、黄单胞菌、硅藻和海绵骨针。梅尔维尔角组底栖动物群的特征，指向浅海、安静、低能环境（Birkenmajer，1985）。

梅尔维尔角组含稀有的罗汉松针叶树和几种被子植物花粉，后者包括 *Nothofagus*、Asteraceae、Caryophyllaceae（*Colobanthus*-type）和 *Chenopodipollis*（Warny et al.，2016），反映了温凉—寒冷气候或冰川、荒漠等贫瘠或恶劣的生态环境。*Nothofagus* 在梅尔维尔角组中是稀有的，可能表明 *Nothofagus* 花粉在中新世早期局部消失，可能是早中新世冰川事件的一个证据，梅尔维尔角组中丰富的 *Leiospheres* 也说明沉积过程中海冰发生过扩张，呈现出一个以海冰为主的近海海洋沉积环境（Troedson and Riding，2002）。

早中新世梅尔维尔角组是一个受冰川影响的地层，十足类的存在表明温度下降程度不足以完全消除乔治王岛生态系统中的动物群。梅尔维尔角组动物化石组合特征表明，梅尔维尔冰川海相地层形成于深水外陆架环境（Birkenmajer，1985）。

综上所述，早中新世植被稀疏，反映了温凉—寒冷气候或冰川、荒漠等贫瘠或恶劣的生态环境。早中新世海相地层对应低能环境，表明其形成于深水外陆架环境。

5 结论

乔治王岛始新世至早中新世的沉积反映了沉积时期的古气候和古环境，岛上的植物化石是在温暖的阶段或间冰期之间生长的植被遗迹。早始新世时，乔治王岛地区气候温暖、潮湿、雨最多，有利于植物生长，反映了暖温带—亚热带的植被与气候特征；中始新世时，该地区是温暖湿润的气侯环境，植被与现代生长在南美、澳大利亚及新西兰温带或凉温带的常绿或落叶植被接近。晚渐新世—早中新世植被稀疏，反映了温凉—寒冷气候或冰川、荒漠等贫瘠或恶劣的生态环境。研究表明从始新世到早中新世，乔治王岛植物多样性呈明显下降趋势，幸存的稀疏植被被严格限制在冰川周缘的苔原物种上。冰海相地层与古生物研究表明，晚渐新世海相地层主要对应高能环境，早中新世海相地层对应低能环境。

致谢：项目执行过程中得到了中国地质调查局、智利南极研究所、国家海洋局极地考察办公室、中国极地研究中心、中国第 29~34 次南极科学考察队等单位和个人的大力支持，赵越、刘晓春、胡健民、陈虹、张拴宏、裴军令、杜星星、郑光高、胡娟、高亮等参加了野外考察，在此一并表示感谢。

References

ANELLI L E, ROCHA-CAMPOS A C, DOS SANTOS P R, et al., 2006. Early Miocene bivalves from the cape Melville formation, king George island, west Antarctica [J]. Alcheringa, 30 (1): 111-132.

BARKER P F, DALZIEL I W D, STOREY B C, 1991. Tectonic development of the scotia arc region [M] //TINGEY R J. Antarctic geology. Oxford: Oxford University Press: 215-248.

BARTON C M, 1965. The geology of the South Shetland Islands. III. The stratigraphy of King George Island [M]. London: British Antarctic Survey: 1-33.

BEU A G, 2009. Before the ice: biogeography of Antarctic *Paleogene molluscan* faunas [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 284 (3-4): 191-226.

BIRKENMAJER K, 1982. Report on geological investigations of King George Island and Nelson Island (South Shetland Islands, West Antarctica) in 1980/81 [R]. Studia Geologica Polonica, 74 (3): 175-197.

BIRKENMAJER K, GAŹDZICKI A, WRONA R, 1983. Cretaceous and Tertiary fossils in glacio-marine strata at Cape Melville, Antarctica [J]. Nature, 303 (5912): 56-59.

BIRKENMAJER K, 1987. Oligocene-Miocene glacio-marine sequences of King George Island (South Shetland Islands), Antarctica [J]. Palaeontologia Polonica, 49: 9-36.

BIRKENMAJER K, ŁUCZKOWSKA E, 1987. Foraminiferal evidence for a lower Miocene age of glaciomarine and related strata, Moby Dick Group, King George Island (South Shetland Islands, Antarctica) [J]. Studia Geologica Polonica, 90: 81-123.

BIRKENMAJER K, 1989. A guide to Tertiary geochronology of King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 10 (4): 555-579.

BIRKENMAJER K, ZASTAWNIAK E, 1989. Late cretaceous-early Tertiary floras of King George Island, West Antarctica: their stratigraphic distribution and palaeoclimatic significance [M] //

CRAME J A. Origins and evolution of the Antarctic biota. Geological Society, London, Special Publications, 47 (1): 227-240.

BIRKENMAJER K, 1991. Report on the Polish geological investigations in West Antarctica, 1990/91 [J]. Polish Polar Research, 12 (3): 369-390.

BIRKENMAJER K, GAZDZICKI A, KRAJEWSKI K P, et al., 2005. First Cenozoic glaciers in West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 26 (1): 3-12.

BITNER M A, THOMSON M R A, 1999. Rhynchonellid brachiopods from the Oligocene of King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 20 (2): 83-88.

BITNER M A, CRAME J A, 2002. Brachiopods from the lower Miocene of King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 23 (1): 75-84.

BITNER M A, GAZDZICKI A, BLAZEJOWSKI B, 2009. Brachiopods from the Chlamys ledge member [Polonez Cove Formation, Oligocene] of King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 30 (3): 277-290.

CAO L, 1990. Discovery of Late Cretaceous palynoflora from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica and its significance [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 29 (2): 140-146. (in Chinese with English abstract)

CAO L, 1992. Late Cretaceous and Eocene palynofloras from Fildes peninsula, King George Island (South Shetland Islands), Antarctica [M] //YOSHIDA Y, KAMINUMA K, SHIRAISHI K. Recent progress Antarctica earth science. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company: 363-369.

CAO L, 1994. Late Cretaceous palynoflora in King George Island of Antarctica with reference to its paleoclimatic significance [M]. Beijing: Science Press: 51-84. (in Chinese)

CHEN T Y, XIE L Z, ZHAO Y, et al., 1995. Geological map of Antarctica (1 ∶ 5000000) (with instruction) [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

COVACEVICH V, RICH P V, 1982. New bird ichnites from Fildes Peninsula, King George Island, West Antarctica [M]. Madison: The University of Wisconsin Press: 245-254.

CZAJKOWSKI S, RÖSLER O, 1986. Plantas fosseis da Peninsula Fildes; Ilha Rei Jorge (Shetlands do Sul); Morfografia das impressoes foliares [R]. Brazil: Anais da Academia Brasileira de Ciencias (Supplemento), 58: 99-110.

DEL VALLE R A, DIAZ M T, ROMERO E J, 1984. Preliminary report on the sedimentites of Barton Peninsula, 25 de Mayo Island (King George Island), South Shetland Islands, Argentine Antarctica [J]. Con-tribucion del Instituto Antdrtico Argentino, 308: 121-131.

DINGLE R V, LAVELLE M, 1998. Antarctic Peninsular cryosphere: early Oligocene (*c.* 30 Ma) initiation and a revised glacial chronology [J]. Journal of the Geological Society, 155 (3): 433-437.

DUAN W W, CAO L, 1998. Late Paleogene palynoflora from Point Hennequin of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica and its significance in stratigraphy [J]. Chinese Journal of Polar Research, 10 (2): 108-114. (in Chinese with English abstract)

GAO L, ZHAO Y, YANG Z Y, et al., 2018. New paleomagnetic and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronological results for the South Shetland Islands, West Antarctica, and their tectonic implications [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123 (1): 4-30.

GAZDECKI A, 1989. Planktonic foraminifera from the Oligocene Polonez Cove Formation of King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 10 (1): 47-55.

HAASE K M, BEIER C, FRETZDORFF S, et al., 2012. Magmatic evolution of the South Shetland Islands, Antarctica, and implications for continental crust formation [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 163 (6): 1103-1119.

HARA U, CRAME J A, 2004. A new aspidostomatid bryozoan from the cape Melville formation (Lower Miocene) of King George Island, West Antarctica [J]. Antarctic Science, 16 (3): 319-327.

HRYNIEWICZ K, GAZDZICKI A, 2016. A new sediment-dwelling pholadid bivalve from Oligocene glaciomarine sediments of King George Island, West Antarctica [J]. Acta Palaeontologica Polonica, 61 (4): 885-896.

JESIONEK-SZYMAŃSKA W, 1987. Echinoids from the cape Melville formation (Lower Miocene) of King George Island, West Antarctica [J]. Palaeontologia Polonica, 49: 163-168.

JONKERS H A, 1998. Stratigraphy of Antarctic late Cenozoic pectinid-bearing deposits [J]. Antarctic Science, 10 (2): 161-170.

JONKERS H A, 2003. Late Cenozoic-recent Pectinidae (Mollusca: Bivalvia) of the Southern Ocean and neighbouring regions [M]. Leiden: Backhuys Publishers: 1-125.

KELLNER A W A, DUTRA T L, DE ARAÚJO CARVALHO M, et al., 2007. First record of fossils leaves from the Keller Peninsula, King George Island, Antarctica [M] //DE SOUZA CARVALHO I. Paleontologia: cenários de vida. Brazil: Interciência: 627-635.

KRAUS S, POBLETE F, ARRIAGADA C, 2010. Dike systems and their volcanic host rocks on King George Island, Antarctica: implications on the geodynamic history based on a multidisciplinary approach [J]. Tectonophysics, 495 (3-4): 269-297.

KROH A, 2014. Echinoids from the Chlamys Ledge Member (Polonez Cove Formation, Oligocene) of King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 35 (3): 455-467.

KYMES C M, 2015. A palynological analysis of Seymour Island and King George Island off the Antarctic Peninsula: a dating and climatic reconstruction [D]. Baton Rouge: Louisiana State University: 1-54.

LI H M, SONG D K, 1988. Fossil remains of some angiosperms from King George Island, Antarctica [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 27 (4): 399-403. (in Chinese with English abstract)

LI H M, SHEN Y B, 1990. A primary study of fossil hill flora from Fildes Peninsula of King George Island, Antarctica [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 29 (2): 147-153. (in Chinese with English abstract)

LI H M, 1992. Early Tertiary palaeoclimate of King George Island, Antarctica-evidence from the Fossil Hill Flora [M] //YOSHIDA Y. Recent progress in Antarctic earth science. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company: 371-375.

LI H M, 1994. Early tertiary fossil hill flora from Fildes Peninsula of

King George Island, Antarctica [M]. Beijing: Science Press: 133-172. (in Chinese)

LI J J, ZHEN S N, 1994. New materials of bird ichnites from Fildes Peninsula, King George Island of Antarctica and their biogeographic significance [M]. State Beijing: Science Press: 239-250. (in Chinese)

LUCAS R C, LACEY W S, 1981. A permineralized wood flora of probable Early Tertiary age from King George Island, South Shetland Islands [R]. British Antarctic Survey Bulletin, 53: 147-151.

LYRA C S, 1986. Palinologia de sedimentos Terciarios da Peninsula Fildes, Ihla Rei George (Ihla Shetland do Sul Antarctica) e Algumas Concideracoes Paleoambientais [R]. Brazil: Anais da Academia Brasileria de Ciencias (Supplemento), 58: 137-147.

MOZER A, 2012. Pre-glacial sedimentary facies of the Point Thomas Formation (Eocene) at Cytadela, Admiralty Bay, King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 33 (1): 41-62.

MOZER A, PECSKAY Z, KRAJEWSKI K P, 2015. Eocene age of the Baranowski Glacier Group at Red Hill, King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 36 (4): 307-324.

NAWROCKI J, PAŃCZYK M, WILLIAMS I S, 2010. Isotopic ages and palaeomagnetism of selected magmatic rocks from King George Island (Antarctic Peninsula) [J]. Journal of the Geological Society, 167 (5): 1063-1079.

OH C, PHILIPPE M, MCLOUGHLIN S, et al., 2020. New fossil woods from Lower Cenozoic volcano-sedimentary rocks of the Fildes Peninsula, King George Island, and the implications for the Trans-Antarctic Peninsula Eocene climatic gradient [J]. Papers in Palaeontology, 6 (1): 1-29.

PAŃCZYK M, NAWROCKI J, WILLIAMS I S, 2009. Isotope age constraint for the Blue Dyke and Jardine Peak subvertical instrusions of King George Island, West Antarctica [J]. Polish Polar Research, 30 (4): 379-391.

POOLE I, HUNT R J, CANTRILL D J, et al., 2001. A fossil wood flora from King George Island: ecological implications for an Antarctic Eocene vegetation [J]. Annals of Botany, 88 (1): 33-54.

SHEN Y B, 1989. Palaeontological evidence for Upper Cretaceous volcano-sedimentary rocks in Fildes Peninsula of King George Island, Antarctica [J]. Antarctic Research, 1 (3): 27-33. (in Chinese with English abstract)

SHEN Y B, 1990. Progress in stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 29 (2): 129-139. (in Chinese with English abstract)

SHEN Y B, 1992. Discussion on stratigraphic subdivision and nomenclature in Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica [J]. Antarctic Research, 4 (2): 18-26. (in Chinese with English abstract)

SHEN Y B, 1994. Stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula King George Island, Antarctica [M]. Beijing: Science Press, 1-348. (in Chinese)

SMELLIE J L, PANKHURST R J, THOMSON M R A, et al., 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution [J]. British Antarctic Survey Scientific Report, 87: 1-85.

SMITH R I L, 1994. Vascular plants as bioindicators of regional warming in Antarctica [J]. Oceologia, 99: 322-328.

SONG Z C, 1997. Research on Tertiary palynoflora from the petrified forest member of King George Island, Antarctica [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 14 (3): 255-272. (in Chinese with English abstract)

SONG Z C, 1998. Research on Tertiary palynoflora from the Fossil Hill Formation of King George Island, Antarctica [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 15 (4): 335-350. (in Chinese with English abstract)

STUCHLIK L, 1981. Tertiary pollen spectra from the Ezcurra Inlet Group of Admiralty Bay, King George Island, (South Shetland Islands, Antarctica) [J]. Studia Geologica Polonica, 72: 109-132.

TORRE S T, 1984. *Nothofagoxylon antarcticus* n. sp., madera fósil del Terciario de la Isla Rey Jorge, isles Shetland del Sur, Antártica [J]. Serie Cientıfica INACH, 31: 39-52.

TROEDSON A L, RIDING J B, 2002. Upper Oligocene to lowermost Miocene strata of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica: stratigraphy, facies analysis, and implications for the glacial history of the Antarctic Peninsula [J]. Journal of Sedimentary Research, 72 (4): 510-523.

TROEDSON A L, SMELLIE J L. 2002. The Polonez Cove Formation of King George Island, Antarctica: stratigraphy, facies and implications for mid-Cenozoic cryosphere development [J]. Sedimentology, 49 (2): 277-301.

UCHMAN A, GAŹDZICKI A, BŁAŻEJOWSKI B, 2018. Arthropod trace fossils from Eocene cold climate continental strata of King George Island, West Antarctica [J]. Acta Palaeontologica Polonica, 63 (2): 383-396.

WANG F, ZHENG X S, LEE J I K, et al., 2009. An $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology on a mid-Eocene igneous event on the Barton and Weaver Peninsulas: implications for the dynamic setting of the Antarctic Peninsula [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10 (12): Q12006, doi: 10.1029/2009GC002874.

WARNY S, KYMES C M, ASKIN R A, et al., 2016. Remnants of Antarctic vegetation on King George Island during the early Miocene Melville Glaciation [J]. Palynology, 40 (1): 66-82, doi: 10.1080/01916122.2014.999954.

WEI M H, 1986. Strange continent-Antarctica [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-175. (in Chinese)

WHITTLE R J, QUAGLIO F, CRAME J A, et al., 2012. Nuculidae (Bivalvia) in the Cape Melville Formation, King George Island, Antarctica, with an overview of the bivalve fauna [J]. Antarctic Science, 24 (6): 625-633.

WHITTLE R J, QUAGLIO F, GRIFFITHS H J, et al., 2014. The Early Miocene Cape Melville Formation fossil assemblage and the evolution of modern Antarctic marine communities [J]. Naturwissenschaften, 101 (1): 47-59.

WRONA R, 2004. Cambrian microfossils from glacial erratics of King George Island, Antarctica [J]. Acta Palaeontologica Polonica, 49

(1): 13-56.

WRONA R, 2009. Early Cambrian bradoriide and phosphatocopide arthropods from King George Island, West Antarctica: biogeographic implications [J]. Polish Polar Research, 30 (4): 347-377.

ZASTAWNIAK E, 1981. Tertiary leaf florafrom the Point Hennequin Group of King George Island (South Shetland Islands, Antarctica) [R] Warszawa: Studia Geologica Polonica: 97-112.

ZASTAWNIAK E, WRONA R, GOZDICK A, et al., 1985. Plant remains from the top part of the Point Hennequin Group (Upper Oligocene) King George Island (South Shetland Islands, Antarctica) [J]. Studia Geologica Polonica, 81: 143-164.

附中文参考文献

曹流, 1990. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛晚白垩世孢粉植物群的发现及其意义 [J]. 古生物学报, 29 (2): 140-146.

曹流, 1994. 南极乔治王岛晚白垩世孢粉植物群及其古气候 [M]. 北京: 科学出版社: 51-84.

陈廷愚, 谢良珍, 赵越, 等, 1995. 南极洲地质图 (1∶5000000) (附说明书) [M]. 北京: 地质出版社.

段威武, 曹流, 1998. 南极乔治王岛海军湾亨内克角早第三纪晚期孢粉化石及其地层学意义 [J]. 极地研究, 10 (2): 108-114.

李浩敏, 宋德康, 1988. 南极乔治王岛的几种被子植物化石 [J]. 古生物学报, 27 (4): 399-403.

李浩敏, 沈炎彬, 1990. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛化石山植物群的初步研究 [J]. 古生物学报, 29 (2): 147-153.

李浩敏, 1994. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛早第三纪化石山植物群 [M]. 北京: 科学出版社: 133-172.

李建军, 甄朔南, 1994. 南极乔治王岛早第三纪鸟类足迹新材料及其古地理意义 [M]. 北京: 科学出版社: 239-250.

沈炎彬, 1989. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛晚白垩世火山岩地层的古生物证据 [J]. 南极研究, 1 (3): 27-33.

沈炎彬, 1990. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛地层古生物研究新见 [J]. 古生物学报, 29 (2): 129-139.

沈炎彬, 1992. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛几个地层划分命名问题之商榷 [J]. 南极研究, 4 (2): 18-26.

沈炎彬, 1994. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛地层及古生物研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1-348.

宋之琛, 1997. 南极乔治王岛第三纪石化林段的孢粉植物群研究 [J]. 微体古生物学报, 14 (3): 255-272.

宋之琛, 1998. 南极乔治王岛第三纪化石山组的孢粉植物群 [J]. 微体古生物学报, 15 (4): 335-350.

位梦华, 1986. 奇异的大陆-南极洲 [M]. 北京: 地质出版社, 1-175.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 可以听到作者的语音
介绍及更多文章相关资讯