

文章编号: 1001-8166(2005)11-1256-07

# 未来 10 年(2000—2010)美国古生物学研究方向 ——地球—生命耦合系统的动力历史\*

刘 羽

(国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085)

**摘 要** 阐述了美国 2000—2010 年古生物研究的 4 个主要方向: 生物多样性的驱动机制, 这些机制所适用的时空尺度; 主要的生物演变时、空分布的不均一性; 生物系统如何影响地表的物化性质, 生物地球化学循环如何随时间发生变化? 生物圈对区域尺度和全球尺度环境变化的反应, 以及每一个方向包含的主要科学问题。最后阐述了运用古生物知识认识当代环境变化。

**关 键 词** 美国 古生物学, 2000—2010 年

**中图分类号** Q91 **文献标识码** A

对世界各国的科学研究动态的了解和掌握, 对把握科学前沿问题, 积极参与国际合作和竞争具有重要的作用。美国基础研究处于世界领先地位, 美国国家科学基金会对其某一基础研究领域的发展战略具有前瞻性, 其它国家会把握住这些前沿科学领域, 结合本国国情, 提出相应的战略规划或优先研究领域。自 1999 年美国提出该发展战略, 2001 年德国国家科学基金会(DFG)和德国联邦政府教育与研究部(BMBF)在其未来 15 年超大型科学研究计划“地球工程学”中, 确定“地球—生命耦合系统——生物群动力学和全球环境控制”为其重要的研究领域<sup>[1]</sup>。中国国家自然科学基金委员会 2001 年也提出了优先领域“地球环境和生命过程”<sup>[2]</sup>。由美国国家科学基金会资助的“Geobiology and the Earth Sciences in the Next Decade”战略调研组, 向其提交了一份战略调研报告——Dynamic History of the Earth-life System<sup>[3]</sup>。该报告一是提出未来 10 年古生物学的研究主题; 二是为了促进这些研究主题取得实质性进展, 提出了相应的战略措施。

美国未来 10 年古生物发展方向, 能代表国际古生物学研究的前沿领域, 虽已过去 5 年, 但由于其理论性、前瞻性, 仍具有重要的意义。现介绍如下, 对其全面了解, 结合我国现有条件, 争取“有所为、有

所不为”, 在国际古生物研究前沿领域占有重要的一席。

## 1 美国未来 10 年古生物发展方向

### 1.1 生物多样性的动力学机制, 这些机制所适用的时空尺度

地史时期全球生物多样性变化的首要趋势是生物分类单元的数量、身体形态的变异幅度以及生态类型的净增加。这一增加没有受到经常性的灭绝、物种组成的大规模的变更以及物理和化学环境条件(如氧化、气候、大陆的增加、海平面)的影响。

尽管地球历史上生物多样性不断增长, 但在不同时期的增长并不恒定。生物的分异不仅受到灭绝事件的干扰, 而且至少有一次很长时期内海洋生物多样性近乎不变。目前, 要验证驱动机理的假说并产生有关的模型, 即通过分析内在的因素, 如在一定时空范围内生物起源和灭绝的速率, 来解释生物多样性产生的机制, 这还需要更坚实和广泛的努力。

(1) 不同尺度如何影响生物多样性的动力学机制?

生物多样性和生物复杂性可以在物种、进化支系、生态系统、种群和生物分区等不同等级尺度上进行认识。关键问题是这些不同的等级是如何链接

\* 收稿日期 2005-09-20; 修回日期 2005-10-28。

作者简介: 刘羽(1966-), 女, 湖南涟源人, 副研究员, 主要从事基金管理工作和古生物学研究工作。E-mail: liuyu@mail.nstc.gov.cn

的,以及这些链接最终如何产生全球生物多样性的变化轨迹。区域性的分异模式是彼此类似并反映了全球性的一致的模式?还是它们各自独立发生,所产生的全球性的模式是具有很大差异的各地区模式相加的结果呢?最近发现,由系统采集的全球性底栖海洋大化石数据所体现出的奥陶纪生物多样性的急剧增加,集中在板块活跃的地区,这一现象表明至少在某些情况下区域性的模式是独立形成的。

传统上,对生物多样性的记述采用的是诸如种或者目这样的生物分类单元。然而,通过和其它尺度如在一个多变量的空间内生物习性的多样性或者生物类型分布的比较,或许会开阔我们的视野。如古生代末的生物大灭绝导致大约 90% 海洋物种的消失,但是对主要生物—习性(食肉动物,表层生活的食悬浮生物者)物种的分布却具有较小的影响。这一不和谐的现象或许可以解释为什么古生代以来的生物进化中,尽管有大量的新物种的出现,但却并没有产生很多新的重要生物类型。

除了生物多样性广泛的地理分布的趋向外,当今的生物圈还包括一些多样性的“热点区”,它们具有异常丰富的分类单元和形态变异。这样的热点区在地质历史时期也有所发现。这些特别丰富的生物富集的区域是什么历史因素造成的呢?它们是生物多样性的源泉还是本身就是避难所呢?要真正理解产生和破坏这些多样性热点区的过程,唯一的途径是把化石记录从空间上分解为不同的高分辨率的区域时间序列。

(2) 主要的生物系统是否具有相似的动力学机制?

我们对全球生物多样性的认识主要来自底栖的海洋大化石。因此,一个重要的问题便是:是不是其它主要生物系统——海洋小型浮游生物、陆生的动物、陆生植物也具有类似的机制。尽管每一个系统总体的行为是相似的,但陆生和海洋生物的分异还是具有不同的直接诱因。在这两大生命领域中分异的速率和节拍是没有关联的,因此我们有必要分析这些广泛的相似性是否代表生物辐射的根本性的规律和机理。如不断增加的生物多样性的内容可能包括有:一个静态的资源基数不断地细分为小的单元;跟踪一个正在扩大的资源基数,或者占据新的环境,如深海和树栖的生境。在不同的时间和不同的生命领域中这些因素的对作用,将是我们今后经验性工作以及建立模式的一个具有潜力的目标。

(3) 生物演化过程中分异度和丰度的关系如何?

针对所研究问题的不同,一个类群在生物圈中的重要性可以用种的数量、丰度或者生态作用来进行定量的分析,这些分析衡量标准不一定要密切相关。一个演化支系分支历史和生物量的关系,代表了一个重要的但相对了解较少的进化与生态的链接。过去的研究显示进化分异大多发生在生物分化和灭绝的时期。如开花植物在晚白垩纪已经达到很高的分异度,但是在一些适宜的生境中一直到了始新世才开始在数量上占优势,相反的是,大的有孔虫类在古近纪的热带环境下丰度大量增加,但分异度却远远落后。重大的生态变化可能不会影响到系统的其它方面,如在泥盆纪发生的海洋食肉动物新陈代谢速率由低向高的转变没有导致被掠食者多样性的增加。同样,一些集群灭绝事件导致广泛的生态重建,然而其它一些相似强度的事件却产生了较小的生态影响。

在生物种类的增加、丰度的提高以及生态中心性相互之间缺少关联的情况下,我们最有可能检验有关这些不同的影响因素之间关系的假说。

(4) 内在驱动机制的相对重要性如何?

在不同的规模下,生物多样性的机制几乎都肯定要受到物理和生物过程相互作用的控制。研究的一项首要的任务是检验不同驱动机理的相对作用,并建立模型来分析不同内在因素的作用机制。这样的机制模型可以通过分析潜在的不同环境驱动因素,如海平面、生产力,并借助随着地质测年技术的改进而不断完善的时间序列来加以检验。地质测年的研究十分关键,如分析表明二叠纪末的环境变化比我们过去想象的还要迅速,因此有关二叠纪末重大集群灭绝的一些假说也就不再成立。

1.2 主要生物演变时空分布的不均一性

生物演变事件,也就是那些开拓了新的生态环境和演化途径的生命演化的突破性事件,并非随机地在时空中出现。这些生物演变时常与生物大分异事件或生物谱系对新生态位的扩张事件相联系。某些生物演变,如光合作用的产生、植物的登陆、小型海洋浮游生物的矿化骨骼的出现等对我们这颗星球的表面产生过极深远的影响。

化石记录所保留的信息可以以一个量化、可对比的方式用于探讨生物演变是如何对地球以及地球上的生命产生影响的。但对一些无实体化石保留的生物演变,如细胞的产生和光合作用的出现,最好结

合同位素证据或分子化石证据来进行研究。

其它的生物演变,如中生代中期小型钙质浮游生物的出现及其生物量的快速增长对于沉积及全球生物地球化学圈产生了永久的影响。由于同位素及生物标记物所发挥的重要作用,对于此类生物演变的研究,为我们挖掘地球科学和生命科学之间互动作用的巨大的潜力提供了典范。

了解生物演变在时空中的起因以及它们所导致的环境改变,是全面综合地了解演化过程以及生命与地球这个系统工程之间的关联的关键所在。

#### (1) 什么因素控制生物的空间分布?

某些生境或区域更有利于导致生物演变。生物演变似乎更常发生于频受扰动的环境,如某些海洋无脊椎动物门类所处的海岸生境或者某些陆生植物门类所处的河畔地带。类似的模式是否也会在深海(远洋)环境以及微生物界起作用?最近的一项与纬度有关的取样密度分析已提供证据支持古生代后的海洋无脊椎动物的大多数主要门类都起源于热带的观点。那些导致演变的生境究竟有什么奥秘呢?

对这些结果的普遍规律的检验以及对关于引发机制的假说的检验,将为演化动力学的分析添加重要的空间成分。

#### (2) 什么因素控制生物演变的时间分布?

虽然化石记录显示生物演变出现于整个地质历史时期,但它们在出现时间上却显示了会聚性。最戏剧性的会聚就是寒武纪大爆发,新元古代和寒武纪动物多样性的爆发式突现。

准确解读事件发生顺序是解决过程问题的根本。这些过程问题包括:大爆发的起因是否在于某物理环境的激发,如跨越了大气氧含量的某阈值、某关键生物因素的激发,超过了发育系统形成躯体能力的界限?对这些事件的发生时间及内在动力的研究依赖于从地质年代学到发育生物学等的各项研究领域。生物演变的次一级爆发往往会紧随一些大绝灭事件之后发生,如白垩纪—第三纪大绝灭之后的许多新哺乳动物类型(从鲸到蝙蝠)的出现。这些后期波动提供了量化、可对比的分析机会,用于探讨诸如绝灭前后生物分异度的差异、新生命形式的形态分歧等。

然而,一些类群的生物演变并不直接与绝灭事件相联系。如陆生植物,虽然在大绝灭事件中也遭受了巨大的多样性损失,它们最突出的演变事件(比如乔木的出现、有花植物的产生等)却都不是紧随绝灭事件发生的。植物生态系统也许能为生物演

变的发生提供另一种不同的模式。

同样重要的对生物演变的理解,是来自于生物演变的速率在经历过最初的上升之后通常会呈下降的趋势,机制是什么?是什么内在或外在的因素减慢了生物演变的步伐?而这样的内在动力的改变如果确实存在的话,又是如何影响到物种起源的速率及类群分异度的?

#### (3) 什么因素决定生物演变的结果?

要了解导致新事物形成的事件顺序,化石记录是唯一直接的窗口。并非所有生物演变都立即会产生引人注目的结果。我们需要知道为什么一些生物谱系获得了演变但却在大分异之前有一段时间的停滞?为什么一些引人注目的演变却未能导致有意义的反响(如食蚁动物和剑齿“猫”虽然与它们的祖先类型相比产生了巨大的差异但却从未真正拥有大的分异度)。

理论形态学的新技术可将形态分歧按时间和空间趋势标注成图。这些新方法,尤其是当它们与日新月异/system发育分析方法相结合时,将为生物演变提供一个量化的分析基础。

相似的生物演变的多起源性为我们检验那些引发大分异事件的因素的作用提供了机会。如飞行的起源至少发生在4个动物门类中(昆虫、翼龙、鸟、蝙蝠)。这为我们提供了4个自然实例来探索这种新的运动行为的演化及其带来的生态影响。类似的例子有很多,从陆源脊椎动物对海洋的入侵,到海洋无脊椎动物对硬质海底的钻孔能力,到植物界不同门类出现乔木型生长的演化等。

对化石所记录的演变信息的对照分析,使我们得以探索祖先类型、发育以及生态系统是如何推动或者束缚这些演变的。系统发育分析尤为重要,因为一个演化系统的起始点将决定演变的潜在幅度和方向。发育途径演变是另一个重要领域,因为它们不仅具有促使新特征形成的巨大潜力,还能阻止某些可能干扰胚胎中既定的相互作用的演化方向的出现。

生态系统必须容纳或者通过绝灭来拒绝所形成的新生命形式。某些演变又能反过来导致生态系统的巨大变化。如侏罗纪和白垩纪起源的甲壳动物、软体动物就不可逆转地改变了海洋群落的运转方式并诱导出一系列的防御演化反应。到何种程度,或者说在什么样的范畴内生态条件能作为决定演化演变频率的关键因素呢?

### 1.3 生物系统如何影响地表的物、化性质,生物地球化学循环如何随时间发生变化?

今天,研究生物是如何影响地球表面物理化学性质的高精度的地球化学方法和生物化石记录(实体化石、遗迹化石和分子化石)正在逐渐结合起来。从无氧的并且几乎全是微生物的太古代海洋,到种类如此之多的现代生态系统是一个漫长和复杂的过程,其间主要的生物、沉积和地球化学的变化在时间上大致相吻合。研究内容开始集中在物质和生物地球化学循环发生明显改变的时期内,集中在这些改变的短期动力机制上,集中在重要生物演变事件对扰乱和稳定这些循环的作用上,集中在相对稳定的状态是如何维持上。

(1) 生物多样性、生物复杂性和生态结构对地表物、化过程的控制程度如何?

重要的生物演变事件,如光合作用、陆生植物、海洋浮游微生物矿化骨骼的起源,毫无疑问会引起物理环境的变化。比如说,元古宙多细胞动物完整消化系统的出现,可能由于排泄物的排放加速了有机碳在海底的沉积从而明显改变营养的流动,最终加快大气和海洋中氧气的建造。相对于元古宙大幅度的地球化学的变化来说,大多数显生宙事件都引起相对较小的地球化学变化(如大量碳酸盐沉积的白垩纪),但它是否能够反映动物增长适应无机环境的能力呢?这需要相当多的研究和建模才能帮助我们回答这个问题。

化学循环中,生物的参与可能是地球表面的各种岩石(如广泛分布的大量的碳酸盐、煤、石膏和条带状磁铁矿)形成的长期驱动力。大气中的可利用的氧气,生物有机体同化和利用有机碳的能力和海洋中的碳酸盐的饱和状态也随着时间全部经历了重大变化。这些变化以及引起的沉积、地球化学方面的变化被看作是和生物相互作用的结果,包括反映和促进地球表面氧气重大变化的微生物生态系统。然而,这些生物和化学变化的速率和时间性仍然没有很好的界定,并且这些长期趋势主要通过非常宽泛的化学模型来解释。实体化石和生物地球化学的记录现在可以允许我们检验和修订这些化学模型。

实体化石、遗迹化石和分子化石的生物记录对过去不同生物有机体的活动和存在提供了唯一的证据。代谢的变化以及相应的行为变化使生物有机体可以在新的环境中生存。同时,这些生物有机体可能会改变以往生命有机体占据的生态位,从而完全改变生态系统的机能和生物地球化学循环。在精确

的地质年代内,把生物地球化学和古生物记录结合起来对于理解短期内的动力机制,特别是地质历史中重要时期的动力学机制是非常重要的。如检验二氧化碳的浓度在陆地生态系统变迁中作用的一系列的事实是全球同步变化的,这是由于植物固碳(如 $C_3$ 和 $C_4$ 途径)方式变化引起的。所以,确定这些变迁的年代精度对于检验大气圈二氧化碳的浓度和陆地生态系统的结构间相互作用是至关重要的。

(2) 生物地球化学循环控制或反馈生物、物理变化程度如何?

从板块构造到轨道参数,任何方面的变化都会显著的影响生物系统。那么,难题就是决定生物是如何减小和扩大外部影响的。随着地球化学研究的深入,可能会导致一系列重要的突破。由于洋中脊的扩张速率变化引起的海洋化学( $Mg/Ga$  比值)长期的变化可能会帮助或者破坏显生宙不同的造礁生物形成的骨骼建筑。生物能够多大程度适应地球表面物理环境的变化是很难理解的。如我们已经知道现代陆地植物是如何控制光的反照率、降水的模式和化学风化的方式,陆地植物的出现和结构的变化一定能引起地质时期环境因素的变化。

对于生物地球化学循环和我们理解的碳循环来说,问题是地球化学循环的变化多大程度上反映了生物有机体从微生物到后生动物对无机环境的调节能力。化石记录提供给我们和现在不能类比的许多信息。这些信息的记录将允许我们检验生物过程调节地球表面变化反应的重要性。

地质时期的化石记录通过不同的生物结构和不同的物理条件提供给我们一系列的信息。这些信息给我们提供了能够检验生物活动和结构对地球表面的过程和生物地球化学循环作用的唯一途径。同样,地质历史也给我们提供了检验生物地球化学对物理变化反应的唯一途径,如快速的气候变化和环境中二氧化碳的突然增多。

### 1.4 生物圈对区域尺度和全球尺度环境变化的反应

生物一直以来受到各种变化的冲击:小行星碰撞,气候突变,海洋及大气化学变化,陆地之间的生物迁移以及多种其他的环境变化。化石记录为生物对于不同种类及不同强度的环境变化所产生的反应,提供了可比较的基础。如生物系统恢复至初始状态的能力并不与环境变化的强度严格成比例,某些集群绝灭与别的集群绝灭相比有更深远的影响。

我们需要一个可比较、可量化的途径,去发现可预测的生物圈行为的总体规律。有很多严格的、以

经验为主而发展起来的模型,在这些模型中(物种)起源和灭绝的速率、环境变化的速率和强度是关键性的因素。在生物圈对环境变化的反应建立模型的过程中这样的模型是我们所需要的。考虑到如今生物圈受到的人类活动所引起的压力,生物系统对环境变化非线性的反应的可预测的总体规律,应该引起人们的普遍关注。

建立这样的模型需要我们理解生物系统本身的特点以及影响该系统的环境变化的特点。生物系统的变化主要包括以下几方面:物种组成、系统发生历史、生物地理学和生态学属性。变化不仅必须从导致的原因方面进行区分,还要从它们的强度、地理范围、持续时间以及脉冲周期进行区分。

我们还必须提供信息及证据以确定变化发生的速率以及生物系统的反应速率。为了度量这样的速率,我们必须有对关键化石集群的精确地质年代学控制,并必须同时结合对以下因素的严格分析:生态学特征、演化方式,以及形态学变化的量化描述。这要求在高分辨地质年代测定学及地球化学领域的不断持续的开创性工作。对于这些新技术的综合性应用将会为以下过程提供关键性的信息:集群绝灭、演化过程中的大爆发、生态系统的协同变化,以及气候变化和生物演化周转的关系。

虽然在生命演化历史中,地质记录已记录下环境变化对生物系统的影响,然而对于这些地质记录中所涉及的过程的完全理解,则需要建立可独立于这些记录而对系统进行操作的模式(正如气候模型提供了一种方法可操作与气候的产生有关的参量)。如果我们有处理下述问题所需的信息,我们就可以归纳出一般结论,更重要的是我们可以由此对未来可能发生的环境变化所引起的生物系统的反应做出预测。

有关于化石生态系统、古环境变化,以及环境变化和生物反应的速率的数据将会帮助古生物学家们解决如下关键的问题:

#### (1) 系统的初始状如何?

系统的初始状态对于理解生物系统对环境变化的反应是一个关键的变量,然而对这个变量探索得还很少。如生物系统在冰期和间冰期对环境变化的反应是否一致?一系列相同的变化会使生命系统对于环境变化的抵抗力加强还是更易受影响?

#### (2) 生态系统状态如何?

生态系统被理解为是状态变量(可度量的特性)和过程变量(如系统的动态属性)的结合体。这

些变量可以将生物反应与外界变化联系起来吗?在环境发生变化期间,有可能整个生态群落会作为一个整体单位发生改变,也可能不同的物种会作出不同的反应。如古生物学家们已经证明陆生物种在更新世气候变化中独立的改变而不是作为整体的群落进行迁移。这种形式并没有被生态学家或气候学家所预言过。另一方面,对于一些海洋化石群落的研究认为一些物种组合对环境变化会产生协同反应。未来研究的一个重要目标就是确定不同环境所引起的生物变化会引起怎样的反应。

#### (3) 生态系统的尺度如何?

生态系统的特性可以由很多不同的时空尺度来度量。从实验室系统中的短尺度变化到元古宙的微生物群落向显生宙的后生动物群落的长尺度过渡。这样的时空尺度变化范围也提供了很多和生态学家合作的机会。生态学的模型可以简单的上延至全球在地质时间范围内的尺度吗?简单地将短时间尺度外延至长时间尺度可能并不能适用,因为各种可能的相互促进作用,可以从多方面给全球系统带来重要影响。如环境变化后生命系统的重新恢复和组合对于所有尺度从生境内的生态变化到全球范围内的绝灭后的恢复都是相同的吗?几乎可以肯定地说这是不可能的,然而这些反应方式的不同之处将会揭示那些对生物系统变化反应有重要影响的过程。

## 2 以史为鉴——运用古生物知识认识当代的环境变化

随着环境问题的剧增,科学研究越来越关注于因人类活动而引起的整个陆地—海洋—大气圈系统的广泛变化。实际上,1999年7月“国家科学委员会”发表的“21世纪环境科学与环境工程”报告已指出:“在未来的岁月里,全球陆地、大气和水圈正在发生的生物学、化学变化以及某些情况下发生的物理结构的改变,将使人类面临十分严峻的挑战……我们需要开展大时空尺度的研究来正确认识许多环境现象”。

由于时间尺度太短,由观察而获得的生态记录绝大多数都无法用于研究自然环境的变动周期以及由此而引发的生物响应。如大多数生态学研究都无法包括一个完整的厄尔尼诺周期。没有古生态学的资料,我们将无法区别人类活动造成的环境变化和环境的自然变化。

古生物学资料种类多、数量大,在许多情况下十分适合重建环境和生物圈的历史。目前,先进的同

位素和骨骼测年技术在许多全新世和晚更新世时间序列的研究中可以达到  $1 \sim 10$  年的时间精度。研究古代的事件可使我们更深刻地认识因人类活动而造成的环境变化所导致的生物变化。如在始新世—渐新世之交的  $10 \text{ ka}$  时间里有大量二氧化碳被释放,其总量相当于人类活动产生的二氧化碳的总和。在这一时期,生物圈产生了复杂响应,底栖海洋生物遭受了显著的灭绝,但浮游生物却未受影响;在全球陆生动物群中,地方性类群数量减少,但陆生植物群中却未见有类似的变化。现代生物学的数据显然无法预测这些影响深远而又变化莫测的生物响应。

古生物学的数据提供了有可保存硬体的物种的地理分布和丰度的资料,包含有指示环境参数(例如温度、降雨量)的沉积学、化学和同位素信息以及反映生态系统过程(如初级生产量、火灾)的信息。这些信息对于研究下列问题不可或缺,如自然环境变化的边界在哪里?其典型的时空尺度有多大?对生物群落而言,是否有一个特征性的适应底线?这种底线在历史上是否发生过变化?研究这些问题可以使我们确定,在人类出现之前,自然环境究竟是稳定的还是变化的?如果是变化的,这种变化造成的后果更像一种随机变动呢,还是更接近一系列的似稳定状态呢?这些问题的答案可用来认识和评估当

代全球和区域环境变化所造成的后果。

就一些生态学模型的验证而言,如验证在人类社会的时间尺度上,生物群是如何对环境扰动产生响应的,古生物学资料是再适合不过的了。我们需要建立详细的时间序列,以便对构成现代生物群落和生态系统特征的物理、化学和生物学参数数百年以来发生变化的区间进行定量研究。对古生物资料进行时间序列分析时,古生物学家和生态学家的合作将有助于解决生态学和环境科学中的一些难题。

#### 参考文献(References):

- [1] Jiang Yuan, Zhao Shengcai, Sun Chengquan. Earth-life coupled System — Dynamic of biota and environment control[J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(6): 877-884. [江源,赵生才,孙成权.地球—生命耦合系统:生物圈动力学和全球环境控制[J].地球科学进展,2001,16(6):877-884.]
- [2] Department of Earth Sciences, NSFC. Executive Strategy of Earth Science at the Beginning of Twenty-one Century[M]. Beijing: Science and Technology Press in China, 2002. [国家自然科学基金委员会地球科学部.21世纪地球科学的战略重点[M].北京:中国科学技术出版社,2002.]
- [3] The Paleontological Society. Dynamic History of the Earth-Life System: A Report to the National Science Foundation on Research Directions in Paleontology[R]. Washington DC: Smithsonian Institution, 1999.

## RESEARCH DIRECTIONS IN PALEONTOLOGY IN THE NEXT DECADE —Dynamic History of the Earth-Life System

LIU Yu

(Department of Earth Sciences, NSFC, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The four paleontological major research directions in the United States from 2000 to 2010 are introduced. 1. What rules govern biodiversity dynamics, and do those rules apply at all temporal and spatial scales? 2. Why are major evolutionary innovations unevenly distributed in space and time? 3. How have biological systems influenced the physical and chemical nature of the Earth's surface, and how has biogeochemical cycling changed through time? 4. How does the biosphere respond to environmental perturbations at regional and global scales?, including key scientific question. Finally, it is introduced that applications of paleontology to understanding current environmental perturbations.

**Key words:** NSF; Paleontology research direction; 2000-2010.