



生物耦合及其分类学与特征规律研究

任露泉, 梁云虹

吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022

* E-mail: lqren@jlu.edu.cn

收稿日期: 2009-02-26; 接受日期: 2009-08-01

国家自然科学基金重点项目(批准号: 50635030)资助

摘要 生物功能源自生物耦合作用的现象, 是多元仿生的重要生物学基础, 也是仿生学领域的重要发现. 从仿生学角度, 提出了生物耦合相关的基本概念, 阐释了生物耦合的构成、分类及其特征规律, 分析了生物耦合研究的一般模式, 并展望了多元耦合仿生的前景.

关键词
生物功能
生物耦合
耦合仿生

为适应自然环境和满足生存需要, 在自然选择的法则下, 生物经过亿万年的进化, 优化出各种各样的形态、构形和复杂的结构, 成为对生存环境具有最佳适应性和高度协调性的系统^[1~3]. 随着仿生学研究的不断深入, 研究人员发现: 生物体适应外部环境所呈现的各种功能, 不仅仅是单一因素的作用或多个因素作用的简单相加, 而是由多种互相依存, 互相影响的因素通过一定的机制耦合、协同作用的结果^[3~7]. 例如, 生物体所呈现的减阻、耐磨、自洁等功能, 即是通过生物体多因素的耦合作用得以实现的, 即生物体的不同形态、结构、材料、构成等, 通过彼此之间耦合作用而达到生物功能最优化、对环境适应最佳化和能量消耗最低化^[8~14]. 因此, 学习和模仿生物这种耦合机制的多元耦合仿生, 较之学习和模仿生物功能单一影响因素的传统单元仿生, 更接近生物模本的功能原理, 将会产生更好的仿生效应, 加快仿生从形似向神似迈进的步伐. 显然, 全面分析可能影响生物功能的各种因素, 探索生物功能与因素间的内在关系及其在特定条件下因素间的耦合、协同作用, 揭示生物耦合的机理及其特征规律, 是进行多元耦合功能仿生不可或缺的生物学基础.

1 生物功能及其特点

1.1 生物体与生物群(落)

生物体. 即具有生命意义, 能相对独立地展现生物功能特性的生物个体或其部分. 例如, 一颗植物或植物的一片叶子, 一只动物或其爪趾、鳞片、脊背等, 都可称为生物体. 生物体不同于生物个体, 生物个体是一个完整的、活生生的生命体, 而不是其一部分. 显然, 生物体既含生物个体, 亦包涵生物个体的某部分.

生物群(落). 即大量生物个体的集合. 生物群中生物个体不仅是大量的, 且具有较为稳固的长久的联系. 有的生物群是由同类、同种生物构成的, 如蚁群、蜂群等, 有的则是由不同类、不同种生物构成的, 如生态植物群(落). 前者在仿生算法、智能仿生学、军事仿生学中大有用武之地, 而后者则是生态仿生学的重要生物学基础.

1.2 生物功能与生物特性

生物功能. 即生物体、生物群(落)(植物、动物、微生物)在生命过程中所呈现的某种(些)能力或作用.

这里主要指具有工程技术意义的, 而非完全生物学意义的功能. 如荷叶、粽叶等植物叶片以及蝴蝶、蜻蜓等昆虫翅膀的自洁功能; 蛭螂、蚯蚓、蝼蛄等土壤动物所呈现的脱附、减粘、降阻功能; 穿山甲、潮间贝以及生活在沙漠地区的沙漠蜥蜴等的耐磨功能; 长尾林鸮、长耳鸮等的消声降噪功能等等.

生物功能具有如下特点.

(1) 以生物体、生物群(落)为载体, 在其生命过程展现. 这里所指的生命过程, 即生物生长健康, 行为正常, 活动自由, 生境和谐, 否则, 生命过程就会遭到伤害, 甚至终结, 根本谈不上生物功能. 生物的一切功能特性被生物体、生物群(落)所承载, 也被其生命过程所展现.

(2) 普遍性. 生物为适应各自不同的生存环境和实现特定的生物学行为皆具有某些功能, 甚至有特殊的功能, 可以说, 凡是生物皆有之. 在时间历程中, 生物不同因素耦合在一起所呈现出的特定生物功能, 贯穿生命的全过程. 在三维空间、宏微观尺度内, 一切生物(动物、植物、微生物)根据自身不同的生物学特性, 都具有与之相应的生物功能存在, 以实现对环境的最佳适应性.

(3) 多样性. 不同的生物具有不同的生物功能, 同一生物体可能具有多种功能. 生物在不同生境, 进行不同活动, 发生不同行为, 处于不同生长期, 也会呈现出不同的生物功能. 即使同一生物体, 其不同部位、不同的系统也会呈现出不同的功能.

(4) 复杂性. 生物功能复杂性主要表现在: i) 影响生物功能的各种因素多类、多态、多样, 其影响机制呈现多元非线性、权重差异性; ii) 甚至在同一生物体也会呈现出功能的多重性、复合性; iii) 生物

功能实现模式多样性、并行性, 其实现过程静动态交叠, 显隐性交错, 从而形成具有最佳适应性的生物功能系统. 在自然界中, 越是高级的生物, 其生物功能越复杂.

生物特性. 即生物在生命过程中呈现的某种特征、品质、品性或特点. 如荷叶、粽叶以及蝴蝶翅膀的润湿性; 树枝、水草以及田鼠体表的柔性; 蚯蚓体表的电渗特性和自润滑性等. 生物特性更具普遍性和多样性, 同时, 生物特性还具有复杂性, 主要体现在各种特性的多层面、多尺度、多场复合、联合及多态变化上.

2 生物耦合及其构成

2.1 生物耦元

影响生物功能的各种因素, 即对生物功能作出贡献的各种因素, 是构成生物耦合的基本单元. 例如, 荷叶自洁功能是由微米级乳突非光滑形态、乳突与其上更细小的微米级或纳米级绒突构成的微-微或微-纳复合结构以及表面蜡质结晶物质共同引起的^[15]. 上述形态、结构和材料等因素均为荷叶自洁功能耦合的耦元, 见图 1(a)和(b). 荷叶这种三个耦元构成的耦合表面具有超疏水性, 水滴和污染物与荷叶表面的实际接触面积变得很小, 水在荷叶上形成水珠, 实现对污染物的润湿和粘附. 当水滴从荷叶上滚动时便将污染物带走(见图 1(c)), 从而实现自洁功能.

按对生物功能的贡献大小, 生物耦元可分为主耦元(主元)、次主耦元(次主元)与一般耦元. 其中, 主耦元对生物功能贡献最大, 占主导、支配地位, 如荷

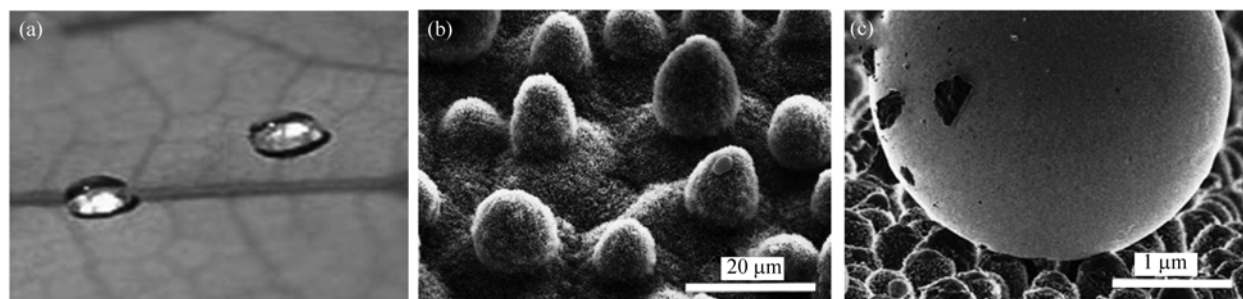


图1 荷叶效应^[15]

(a) 荷叶表面; (b) 乳突和微-纳复合结构; (c) 水滴滚落带走表面污染物

叶非光滑形态; 次主耦元对生物功能贡献仅次于主元, 经常与主元相伴随, 如荷叶的微-微或微-纳复合结构; 一般耦元对生物功能贡献一般, 如荷叶蜡质结晶材料。

事实上, 生物耦元多种多样。例如, 有物性耦元, 即生物体自身的物质形态, 如材料、结构、形态等; 非物性耦元, 即生物体的行为、特性, 如柔性、润滑等; 此外, 还有永久性耦元、临时性耦元、静态耦元、动态耦元、显性耦元、隐性耦元等。通常, 主耦元多为永久性的、显性的物性耦元。

生物耦元的特征量度是相当宽泛的, 除有宏观、微观、纳观尺度外, 还有定量、定性、模糊、灰色、欧氏几何或非欧几何等量度。

2.2 生物耦元的耦联方式

生物耦合中各耦元之间只有通过特定的方式相互联系起来才能完成生物的特定功能, 这种耦元之间的相互关系或联系称为耦联方式, 简称耦联。如果将生物功能看作因变量或试验指标 y , 将耦元看作是自变量或试验因素 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 则耦联即可看作是 $y \sim f(\mathbf{x})$ 中的函数关系 f , 其作用是将耦元与耦元联系起来。尚须指出, 耦联不同于自变量间的交互作用, 耦联强调的是耦元间的组成关系, 重点在构成, 主要服务于耦合机制; 而交互作用强调的是自变量间组合对因变量的影响, 重点是作用, 主要服务于因变量交互效能。

2.3 生物耦合

所谓生物耦合, 就是两个或两个以上耦元通过合适的耦联方式联合起来成为一个具有一种或一种以上生物功能的物性实体或系统。生物耦合是生物固有属性, 是生物经过亿万年进化、优化形成的多因素高度协调的系统, 对生存环境具有最佳适应性。例如, 荷叶、粽叶等植物叶片, 由非光滑形态 $\mathbf{X}_1$ 、微-微或微-纳复合结构 $\mathbf{X}_2$ 和蜡质材料 $\mathbf{X}_3$ 三种耦元, 经过 $\mathbf{X}_2$ 在 $\mathbf{X}_1$ 上的复合以及 $\mathbf{X}_3$ 与 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ 的结合这种耦联方式, 形成具有自洁功能的物性实体。由不同耦元构成的耦合, 可以是一个集合、一个系统; 可以是一个生物个体的某部分(或器官), 也可以是一个生物群等。生物耦合是有一定物性的且具有生物特征的实体或生物体, 其类似于 $y \sim f(\mathbf{x})$ 中的 $f(\mathbf{x})$ 。

2.4 生物耦合条件

(1) 构成生物耦合的耦元数应是两个或两个以上。耦合只能是两个或两个以上相合, 生物耦合亦然。生物耦元自身亦有相关功能, 如自洁、脱附、减阻等等, 凡生物功能有之, 其皆可能有之, 且强弱相异可能很大。单一生物耦元的功能只有通过生物耦合作用, 即将其与其他生物耦元功能耦合才能完全实现生物的特定功能。单一耦元自身虽有相关功能, 但没有与其他耦元的耦合或相互协同作用, 既不能称之为耦合, 也无法与生物耦合所实现的生物功能相比拟。因此, 构成生物耦合中的耦元数应是两个或两个以上。

(2) 耦元是异质的, 即异相、异场、异类等。构成生物耦合中的耦元是不同性质的, 即可以是不同组成, 不同性态, 不同种类, 不同结构, 不同空间层次, 还可以是不同模式的等等。生物基于外部环境和内部结构的特点, 通过异质耦元的耦合, 可以实现诸如形态、结构、成分、组织、行为、过程等多因素耦合, 从而展现出最佳的生物功能。

(3) 耦元间应具有有效的、合适的(相对生物功能)耦联方式。生物特定功能的实现是生物耦元通过一定的耦联方式发挥功能的过程, 是多个耦元在一定的时间、空间历程内其功能与环境相互作用的实现结果, 因此, 有效、合适的耦联方式可以使生物耦元的功能得到有效发挥。如栖息在沙漠地区的新疆岩蜥为适应风沙环境^[16], 其体表进化出了多层结构的皮肤, 紧密嵌合呈覆瓦状排列的菱形鳞片, 鳞片中部呈突起状(见图 2(a)和(b)), 从而有效减少了体表与地表的接触; 鳞片紧密地附着于皮肤表层, 鳞片相互之间通过鳞片下的皮肤柔性联结, 形成了刚性鳞片通过生物柔性连接的体表结构。这种刚性强化和柔性吸收的系统耦合具有极高的抵抗磨粒磨损和冲蚀磨损的生物功能。

然而, 生物对于自然环境的最佳适应性要通过生物耦合而达到, 但这种最佳适应性亦不是一成不变的, 是处在稳定—变化—稳定的不断变化之中, 因此, 生物耦元间有效、合适的耦联方式亦不是一成不变的, 是复杂的, 是相对于某一特定功能充分展现与特定生存环境而言的。

(4) 耦合绩效(功能)应大于或等于所有耦元绩效(功能)之和。当两个或两个以上的耦元通过合适的耦

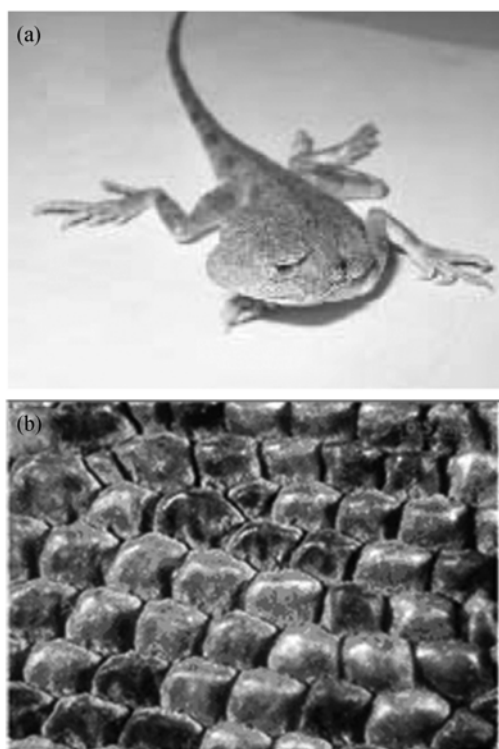


图2 新疆岩蜥及体表鳞片^[16]

(a) 新疆岩蜥; (b) 体表鳞片

联方式形成生物耦合时, 该耦合所发挥的生物功能应大于或等于组成生物耦合中耦元自身功能绩效之和. 此外, 当两个或两个以上的耦合通过适当耦联方式形成一个新的更高层次的耦合系统时, 它不是原有几个耦合量的增大, 而是一个新功能体的产生, 此时, 所展现的生物功能应大于或等于所有耦合(元)自身所具有生物功能绩效之和.

(5) 生物耦合应充分满足最小能量物质消耗达到最大生命效应的生物学原理. 生物耦合应满足生物本身物质能量消耗最低化并能达到生物功能最佳化, 以达到最大的生命效应, 即生长健康, 行为正常, 活动自由, 生境和谐等.

3 生物耦合分类

在生物耦合中, 耦元数、耦联方式、耦合性质不同, 构成的生物耦合的类别也不同, 相应地, 其所具有的生物功能也是不同的. 根据对生物耦合的初步研究, 可将其按以下几个方面进行分类.

3.1 按生物耦合中的耦元数分类

二元耦合. 即由两个生物耦元通过适当的耦联方式联合成为具有一定生物功能的生物耦合, 其中耦元数为两个. 但是, 生物耦合为满足对环境的最佳适应性和协调性, 两个耦元间的耦联方式可能是变化的.

多元耦合. 即由两个以上耦元通过适当的耦联方式构成的生物耦合. 但是, 在不同条件下为实现特定的生物功能, 生物耦合中耦元数或耦联方式可能相异较大.

3.2 按耦元间线性关系与否分类

线性耦合. 构成生物耦合中的各耦元发生变化时, 生物耦合所展现的生物功能也成比例或直线关系变化. 线性耦合具有叠加性, 即生物耦合所具有的生物功能是各耦元所具有生物功能的累加和; 线性耦合具有均匀性, 即各耦元生物功能与所构成的生物耦合所具有的生物功能之间保持一定的比例因子.

非线性耦合. 生物耦合中耦元发生变化时, 生物耦合所展现的生物功能不按比例、不成直线关系变化. 线性耦合中各耦元间是互不相干的独立关系, 而非线性耦合各耦元则有交互作用, 而正是这种交互作用, 使得生物耦合所具有的生物功能不再是简单地等于各耦元生物功能之和, 而是可能出现不同于“线性叠加”的增益.

3.3 按耦联性质分类

几何耦合. 即耦元间通过一维、二维或多维的几何耦联方式组成在平面或空间、宏观或微观上具有几何结构的生物耦合. 如蝴蝶翅膀由数层仅有 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 厚的鳞片组成, 这些鳞片呈覆瓦状交叠排列(见图3(a)), 每个鳞片的表面均由亚微米级纵肋及横向连接组成(见图3(b)), 鳞片的纵肋横截面均为规则的三角形(如图3(c)), 这种井然有序的几何耦合能捕捉光线, 仅让某种波长的光线透过, 从而使其翅膀显现出特殊颜色^[17,18].

数学耦合. 即耦元间通过具有数学模式或数学涵义的耦联方式组成具有可数学量度属性的生物耦合, 其可量度属性的存在与耦元性质无关, 但耦合结果却取决于耦元的性质、类别、功能等.

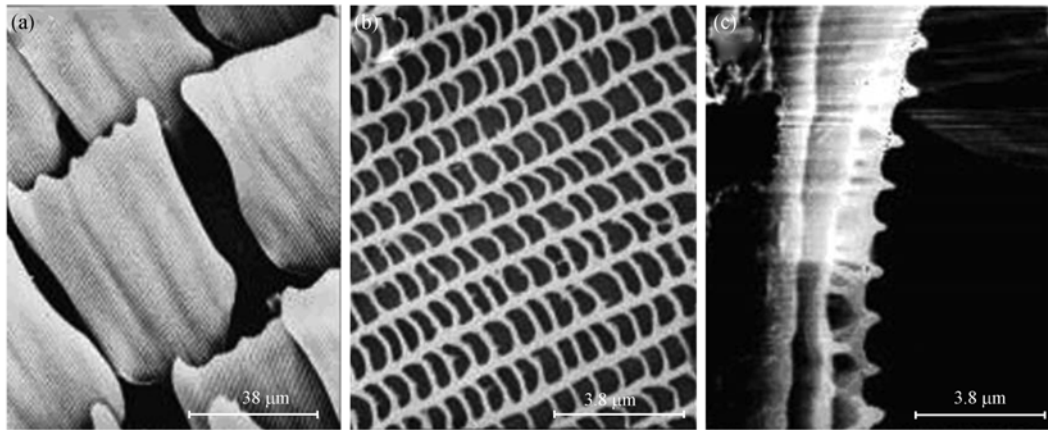


图3 蝴蝶翅膀鳞片微观形态^[17]
(a) 翅膀鳞片; (b) 鳞片结构; (c) 鳞片的纵肋横截面

物理耦合。 即耦元间通过运动、力、电、磁、光等物理耦联方式相互作用、联系起来, 从而构成具有一定功能的生物耦合。通过物理耦合组成的生物耦合没有化学反应, 没有新物质产生。

化学耦合。 即耦元间通过化合、融合、复合等化学耦联方式构成一个具有完全一体化的生物耦合。如人体内负责载氧和放氧的血红蛋白的形成, 当血红素中的 Fe^{2+} 从垂直于卟啉大环平面两

侧与蛋白质的肽链相连时, 就形成了血红蛋白, 进行载氧和放氧, 维持血液酸碱平衡^[19]。

机械耦合。 即耦元间通过嵌合、组合、联合等机械式耦联方法构成的生物耦合, 在实现生物功能时, 该耦合的各耦元间有确定的机械运动。例如, 甲虫左右鞘翅通过楔形结构榫嵌入相互耦联(如图 4(a)和(b)), 头部结构受到较大的力, 实体尺寸较大, 转动情况下鞘翅间相对运动距离较小, 因而楔

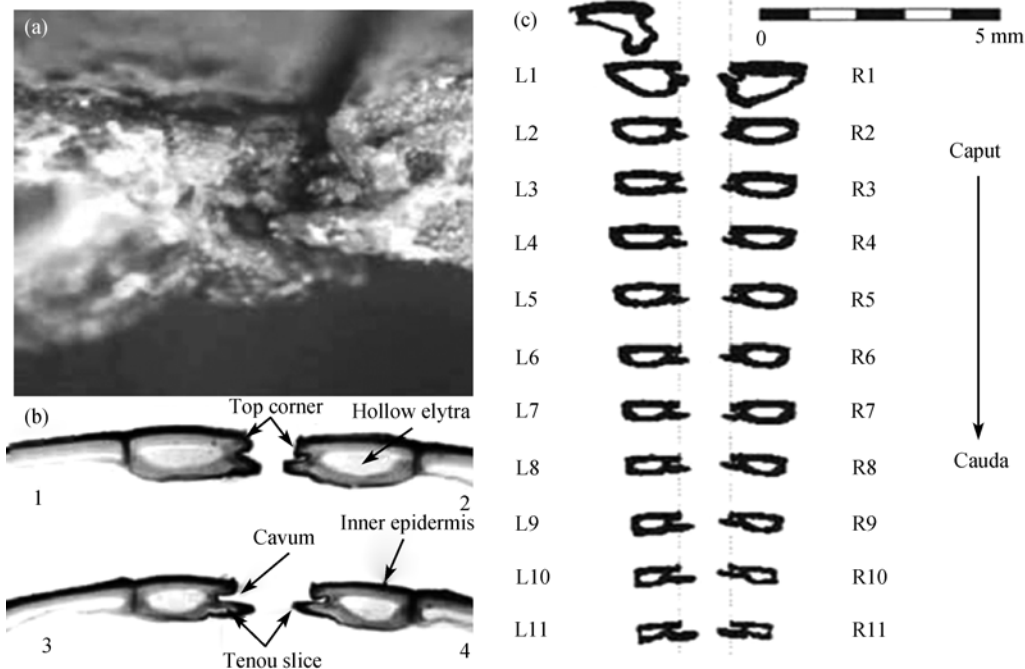


图4 甲虫鞘翅截面及切片^[20]
(a) 左右鞘翅啮合状态(风干样品断面); (b) 切片; (c) 鞘翅中腹部截面几何形态渐变图(图中 L 表示左侧鞘翅, R 表示右侧鞘翅)

形凸出和槽部尺寸较小; 尾部相对位移较大, 楔形凸出和槽部尺寸也较大(如图 4(c)). 甲虫鞘翅间这种榫联接耦合结构具有较好的几何和力学相关性, 有类似拉链的自锁结构及易于打开的特点, 有利于鞘翅的锁合^[20].

综合耦合. 即耦元间通过多种耦联方式共同作用完成一种或一种以上生物功能的生物耦合. 在自然界中, 生物耦合是多种的、复杂的, 耦元间的耦联方式往往不是单一的. 即使在同一个生物耦合中, 不同耦元间也可能具有不同的耦联方式, 从而使各耦元的生物功能充分发挥, 以实现对环境的最佳适应性.

3.4 按耦联的具体方式分类

永久性耦合. 即构成生物耦合中的耦元关系是固定的, 不发生变化.

临时性耦合. 若生物耦合中耦元间关系为临时、暂时而非固定的, 则称为临时性耦合.

静态耦合. 若耦元间关系是静止的, 不能活动, 即为静态耦合.

动态耦合. 即耦元间关系是可活动的, 如转动(自由度可为 1, 2, 3), 如骨关节、穿山甲鳞片、田鼠毛、爪趾、蝴蝶翅膀等; 滑动(自由度为 1, 2, 3), 如蚯蚓体节、爪趾纵向移动等.

方位耦合. 即各耦元在生物耦合中具有一定的空间相对方位关系, 其所处的方位关系可以是上下、左右、前后、叠加、阶梯、中间等等.

3.5 按耦元间的紧密程度分类

紧密耦合. 生物耦合中耦元间边界模糊或无边界, 主体独立性差, 则称为紧密耦合, 如化合、融合、复合等.

较紧密耦合. 生物耦合中耦元间边界可辨, 但不完全明晰, 主体独立性较差, 则称为较紧密耦合, 如嵌合、结合、组合等.

松散耦合. 耦元间边界明晰, 主体独立或相对独立, 则称为松散耦合, 如联合、混合、集合等.

4 生物耦合基本特征规律

生物界中, 许多与生存环境相协调的问题都是通过合理的生物耦合实现的, 且已达到了相当高的

优化水平, 这是生物生存的需要, 是生物亿万年进化的结果. 在生物长期进化中, 在生命活力不断呈现中, 特别是在生物功能的种种超强展现中, 生物耦合的特征规律始终在起着重要作用, 其也不断被发现、被揭示.

4.1 生物耦合中的耦元是异质的

同一生物耦合中的耦元是异质的, 即异相、异场、异类等; 同质耦元可以复合、融合, 但不能耦合, 这是生物耦合最本质特征之一. 通过不同组成, 不同性态, 不同种类, 不同结构, 不同空间层次等耦元的耦合, 可将形态、结构、材料等多因素耦合, 形成具有最佳适应性的生物功能系统, 以达到生物本身物质能量消耗最低化、对环境适应最佳化和生物功能最优化.

4.2 生物耦合可作为相对独立的具有一定生命特征的单元

生物耦合可作为相对独立的具有一定生命特征的单元(单体、个体)对周围环境产生作用, 并具有高度自适应协调控制能力, 在不同的生存环境中, 该生物耦合调控的程度、方式和侧重点皆可能不同; 生物耦合也可以作为一个完全独立的生命系统与其他体系的生命系统或非生命系统相互作用.

4.3 生物耦合具有功能性

生物耦合具有功能性, 或单功能, 或多功能, 甚至有多于该耦合中耦元数的新功能. 例如, 蝴蝶翅膀上的鳞片呈覆瓦状交叠排列, 这种周期性排列的耦合结构会产生特殊的结构色, 同时, 这种井然有序的耦合还使其表面具有自洁功能^[21]. 事实上, 生物耦合中某个(些)耦元的功能也可能被增强或减弱. 以贝壳的珍珠层为例, 其组成 95% 以上为易碎的陶瓷碳酸钙, 剩下的是以蛋白质为主的有机质, 这两种物质交替层叠排列, 其断裂韧性比单向碳酸钙高约 3000 倍^[22].

4.4 生物耦合可再现耦元的功能

生物耦元自身亦有相关功能, 生物耦合可再现耦元的功能, 但并非简单的重现(演), 是新系统(耦合)的特性, 功能的质与量都会有异.

4.5 耦元对生物耦合功能的贡献不同

同一耦合中, 各耦元对生物耦合功能的贡献是

不同的,且其贡献的机制与规律也可能不同.如荷叶表面微米级乳突非光滑形态使其具有疏水性,水滴在这种表面上具有较大的接触角,可有效阻止荷叶被润湿;荷叶乳突与其上更细小的微米级或纳米级绒毛构成的微-微或微-纳复合结构的贡献在于能使水滴的滚动角大大降低,即能使水滴在其表面的粘附大大降低.

4.6 耦元间的作用机制与规律可能不同

生物在不同生境,进行不同活动,发生不同行为,处于不同生长期,同一生物耦合中,耦元间的作用机制与规律可能不同,这是生物耦合结构智能化和功能调控系统化的特征表现.

4.7 生物耦合具有层级结构

有些生物耦合具有层级结构,某层级耦合可能是另一层级耦合的耦元.如非洲燕尾蝶翅膀底色为黑色,上面点缀着明亮的绿色和蓝色斑纹,是一个天然发光的二级管.燕尾蝶翅膀覆盖着细微的鳞状物,通过鳞状物周期性排列和鳞状物自身的微结构组成的生物耦合能够吸收紫外线,又将其重新发射回去,从而使人们看到蝴蝶翅膀的特殊结构色.当这一生物耦合做为耦元与翅膀上的荧光色素相互耦合时,那些被重新发射的光线与荧光色素相互作用,就产生了明亮的蓝绿色.相隔长距离的蝴蝶用这种明亮的颜色进行相互沟通^[23].

5 生物耦合分析方法

生物耦合是生物固有的属性,必然存在着耦合方式与功能机制的对应性,因此,采用适当的分析方法是解析生物耦合奥秘的关键.生物耦合分析应重点做好以下几点.

5.1 明晰目标

首先应确立明确的生物功能目标.同一个生物体或生物群可能同时具有多个具有工程意义的功能.因此,应该根据研究目的与任务,先确定研究对象的一个或两个生物功能.

5.2 分析耦元

根据已明确的目标和研究任务、内容及相关专业

知识,全面分析可能影响生物功能的各种因素;按贡献大小或重要程度,将耦元排序,并找出主耦元、次主耦元.

5.3 确定耦联模式

针对已确认的主耦元,并结合其他耦元,从生物耦合(生物个体或其部分)的构成、结构、运动学、动力学及其生命过程,探索并揭示耦元间的相关关系,即耦联模式.

5.4 寻求生物耦合功能实现模式

从生物功能与生物耦合(耦元+耦联)关系,以及耦合的运动规律、作用方式出发,寻求生物功能得以实际展现并取得成效的模式.

5.5 揭示生物耦合功能机制

用试验研究(观察、测试、实验等)和理论研究(数学建模,模拟仿真)相结合的方法,分析生物耦合类型及其与生物功能和环境因子间的关系,揭示生物体不同层级的形态、结构及材料等耦元相互耦合而发挥功能作用的机理与规律.

5.6 建立生物耦合模型

利用相应的技术手段量化生物耦合信息,建立关于生物功能与耦元、耦联及其实现模式间的物理模型,并进一步运用数学语言进行抽象表述,使之成为具有普遍意义的数学模型,这是耦合仿生研究的基础.

6 多元耦合仿生

目前,在国际仿生领域,单元仿生仍占主导地位,如形态仿生、结构仿生、材料仿生等,尤其是非光滑形态仿生正成为国际众多工程仿生领域研究的热点.但是,单纯学习和模拟影响生物功能某单一因素或生物耦合中某单一耦元的单元仿生,毕竟与生物模本的真实性有较大的距离,仿生的效果也决不会是理想的.

生物耦合是耦合仿生的生物学基础,因此,学习生物耦合机制与规律的耦合仿生,是不同于传统单元仿生的多元仿生,是更近于生物实际的仿生,是从概念、内容到方法上的全新的仿生理念,有望解决

传统单元仿生难以有效解决的问题。例如, 学习荷叶、粽叶及蝴蝶等生物将表面形态, 复合结构和表面低能化材料相耦合的原理, 进行三元耦合仿生有望解决高能表面的自洁问题; 学习沙漠蜥蜴、潮间带贝类等动物与其生境相适应的生物耦合机制与规律, 进行多元耦合仿生, 有望解决既提高抗疲劳性, 又保证耐磨性的问题。而上述问题, 利用单元形态仿生或材料仿生都难以有效解决。多元耦合仿生理论与技术, 在生物功能的仿生实现中, 发挥着越来越重要的作用。例如, 用于地面机械脱附减阻的传统电渗系统, 都是将正极和负极分别置于两个不同的表面, 两极间距大, 需较高的电渗电压(美国、日本试验研究电渗电压达 $45\sim 250\text{ V}^{[24]}$), 电渗效果不理想, 且工作也不安全。基于蚯蚓等土壤动物体表非光滑形态与表面低压电渗特性(蚯蚓体表在运动中产生的正负电位在同一个表面)相耦合具有脱附减阻功能的原理, 吉林大学研发了非光滑表面低压仿生电渗技术, 将正负极布置于同一表面, 与触土面构成一体, 电渗电压降至 $12\text{ V}^{[25]}$; 同时, 开发了不同类型仿生电渗的设计与制备技术, 已被应用于火力发电厂输煤系统和工程机械装载机铲斗等工程领域, 产生了良好的脱附效应。

耦合仿生的设计应遵循功能性原理: 第一, 明确耦合仿生的功能目标, 为实现特定的仿生功能而设计, 如脱附、减阻、降噪等; 第二, 从自然界中选取具有相应功能的生物原型; 第三, 根据典型生物自身及其环境的特点, 分析影响目标功能的主耦元、次主耦元及其耦联方式; 第四, 建立生物耦合模型; 第五, 根据仿生学原理和实际需求与具体技术要求, 运用现代工程仿生建模技术(仿生方法学), 突出重点, 简

化凝练相关约束及工程实现条件, 提出仿生耦合模型; 第六, 功能仿生设计时, 根据功能载体的工况条件和技术要求, 即可按上述仿生耦合模型进行具体的仿生优化与功能设计。

生物耦合为工程仿生学带来了全新的研究内容, 为仿生设计制造技术与方法向更高层次拓展提供了理论依据。在生物耦合研究基础上进行的多元耦合仿生设计正向着结构智能化、功能系统化、材料多元化的现代仿生设计水平发展, 展现功能时更具环境适应性和空间协调能力。研究生物耦合中形态、结构、材料等因素的协同作用, 建立具有普遍意义的生物耦合模型, 是全面构建生物材料-结构-形态-功能一体化的仿生耦合技术的关键。生物耦合规律与机制的研究为仿生科学与工程的发展提供了更为宽广的探索空间和发展前景。

7 结束语

生物通过两个或两个以上不同因素的耦合作用有效地实现生物的各种功能, 充分展现其对环境的最佳适应性, 这种生物耦合现象是生物界普遍存在的。

生物耦合是由不同耦元遵循不同耦联方式联合起来构成的, 耦元和耦联方式的多样性, 必然展现生物耦合多样性。生物耦合在实现生物功能的过程中, 呈现出一定的特征规律, 生物耦合分析的重点应是这种耦合构成机制与其特征规律。

基于生物耦合机制与规律的多元耦合仿生, 较之传统的单元仿生, 更接近于生物模本的功能原理, 将会产生更好的仿生效应, 将加快仿生从形似向神似迈进的步伐。

参考文献

- 1 Lu Y X. Significance and progress of bionics. *J Bionic Eng*, 2004, 1(1): 1—3
- 2 Bogatyrev N R. A “Living” machine. *J Bionic Eng*, 2004, 1(2): 79—87
- 3 任露泉. 地面机械脱附减阻仿生研究进展. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(9): 1353—1364
- 4 孙少明. 风机气动噪声控制耦合仿生研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 2008
- 5 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望. *农业机械学报*, 2005, 36(7): 144—147
- 6 Paton R. Process, structure and context in relation to integrative biology. *Biosystems*, 2002, 64(1-3): 63—72
- 7 Zhang Y, Zhou C H, Ren L Q. Biology coupling characteristics on soil-engaging components of mole crickets. *J Bionic Eng*, 2008, 5(Suppl 1): 164—171
- 8 Edison T L. Systems biology, integrative biology, predictive biology — Commentary. *Cell*, 2005, 121(4): 505—506
- 9 程红, 孙久荣, 李建桥, 等. 臭蜣螂体壁表面结构及其与减粘脱附功能的关系. *昆虫学报*, 2002, 45(2): 175—181

- 10 Ren L Q, Wang S J, Tian X M, et al. Non-smooth morphologies of typical plant leaf surfaces and their anti-adhesion effects. *J Bionic Eng*, 2007, 4(1): 33–40
- 11 Wu L Y, Han Z W, Qiu Z M, et al. The microstructures of butterfly wing scales in northeast of China. *J Bionic Eng*, 2007, 4(1): 47–52
- 12 任露泉, 徐晓波, 陈秉聪, 等. 典型土壤动物爪趾形态的初步分析. *农业机械学报*, 1990, 21(2): 44–49
- 13 Fang Y, Sun G, Cong Q, et al. Effects of methanol on wettability of the non-smooth surface on butterfly wing. *J Bionic Eng*, 2008, 5(2): 127–133
- 14 Xu L, Lin M X, Li J Q, et al. Three-dimensional geometrical modelling of wild boar head by reverse engineering technology. *J Bionic Eng*, 2008, 5(1): 85–90
- 15 Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 1997, 202(1): 1–8
- 16 高峰, 黄河, 任露泉. 新疆岩蜥三元耦合耐冲蚀磨损特性及其仿生试验研究. *吉林大学学报*, 2008, 38 (03): 86–90
- 17 Ren L Q, Qiu Z M, Han Z W, et al. Experimental investigation on color variation mechanisms of structural light in *Papilio maackii* menetries butterfly wings. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2007, 50(4): 430–436
- 18 Vukusic P, Sambles J R. Photonic structures in biology: Photonic technologies. *Nature*, 2003, 424(6950): 852–855
- 19 Voet D, Voet J G. *Biochemistry*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2004
- 20 Dai Z D, Zhang Y F, Liang X C, et al. Coupling between elytra of some beetles: Mechanism, forces and effect of surface texture. *Sci China Ser C- Life Sci*, 2008, 51(10): 894–901
- 21 Fang Y, Sun G, Wang T Q, et al. Hydrophobicity mechanism of non-smooth pattern on surface of butterfly wing. *Chinese Sci Bull*, 2007, 52(3): 711–716
- 22 Mayer G. Rigid biological systems as models for synthetic composites: Materials and biology. *Science*, 2005, 310(5751): 1144–1147
- 23 Vukusic P, Hooper I. Directionally controlled fluorescence emission in butterflies. *Science*, 2005, 310(5751): 1151
- 24 Clyma H E, Larson D L. Evaluating the Effectiveness of Electro-osmosis in Reducing Tillage Draft Force. Technical Report, ASAE Paper No. 91-3533. 1991
- 25 Ren L Q, Cong Q, Tong J, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method. *J Terramechanics*, 2001, 38(4): 211–219