

运动领域中复杂性表达的应用与展望

尹晓峰^{1, 2}, 刘志民¹, 郭莹³

(1.上海体育学院 体育休闲与艺术学院, 上海 200438; 2.上海体育科学研究所 信息研究中心, 上海 200030; 3.上海立信会计学院 体育部, 上海 201620)

摘 要: 20 世纪中叶兴起的复杂范式的思维革命, 在包括体育运动在内的不同领域产生巨大影响。特别是进入 21 世纪, 围绕体育运动领域复杂系统的研究呈现显著增长的趋势。作为运动领域当中应用较为广泛的复杂系统代表, 生态动力学系统和神经生物学系统更能反映并解释运动领域当中的复杂现象。对上述研究进行综合回顾和梳理, 以期为体育领域的未来理论研究与应用实践提供参考。尽管在复杂系统思想的发展过程中, 完全评估在体育领域中的贡献仍然为时尚早, 但是复杂系统的方法却可以将研究者的注意力集中在新的可能性上。

关 键 词: 复杂系统; 运动领域; 生态动力学; 神经生物学; 综述

中图分类号: G804.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2016)01-0097-07

The application and expectation of complex expressions in the sports area

YIN Xiao-feng^{1, 2}, LIU Zhi-min¹, GUO Ying³

(1.School of Sports Leisure and Art, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China;
2.Information Research Center, Shanghai Research Institute of Sports Science, Shanghai 200030, China;
3.Department of Physical Education, Shanghai Lixin University of Commerce, Shanghai 201620, China)

Abstract: Emerging in the mid 20th century, the revolution of thinking in a complex paradigm produced tremendous influence on sports included areas. Especially, as the 21st century came, researches on complex systems in the sports area showed a trend of remarkable increasing. As representatives of complex systems widely applied in the sports area, ecological dynamic and neurobiological systems can better reflect and explain complex phenomena in the sports area. The authors reviewed and collated the said researches, hoping to provide reference for and inspirations to theoretical study and application practice in the sports area in the future. Although it is still too early to completely evaluate contributions made in the sports area in the process of development of complex system thinking, methods used in complex systems can direct researches' attention to new possibilities.

Key words: complex system; sports area; ecological dynamics; neurobiology; overview

20 世纪中叶以来, 科学界正在悄然经历一次从简单到复杂范式更迭的思维革命, 使人类对客观事物的认识由线性上升到非线性, 由简单均衡上升到非均衡, 由简单还原论上升到复杂整体论。曾经统治长达 300 多年的经典科学中, 线性、均衡、机械还原论的传统思维模式受到前所未有的挑战。1994 年复杂科学研究的旗帜人物、美国圣菲研究所主要创始人约翰·霍兰正式提出比较完整的复杂适应性系统理论, 并在之后

对各个学科领域产生强大的冲击力, 成为解释复杂系统机制的一种重要观点。将事物看作系统, 运用非还原论方法研究复杂系统产生复杂性机理及演化规律, 成为这场“复杂性研究运动”的主旋律。纷繁复杂的真实世界要求科研工作者用更加整体、非线性、动态的以及有机联系的眼光看待问题, 开展复杂系统的跨学科研究是大势所趋。

复杂系统具有自我组织、自我调整的能力, 能够

收稿日期: 2015-03-02

基金项目: 上海市体育局 2014 年科技雏鹰计划资助项目(14CY006)。

作者简介: 尹晓峰(1978-), 男, 副研究员, 博士研究生, 研究方向: 体育社会学、运动训练学。E-mail: 13564416996@139.com

将秩序和混沌融入某种特殊的平衡,其平衡点是混沌边缘的系统^[1]。该定义较为明确地指明复杂系统更加强调适应性造就了复杂性,即主体自身组织中有序性和无序性的结合造成了事物发展的多种可能性。20世纪90年代后,体育运动领域中的复杂现象(如团队项目中动态变化的场景或是运动员对训练刺激的适应等)逐渐引起学者和专家的关注,尤其是进入到21世纪,围绕运动领域的复杂系统开展的研究呈现出显著增长的趋势。

1 生态动力学系统在运动表现分析中的应用与展望

科学、客观的运动表现分析是区分运动员或运动队成功与否的重要手段,无论是教练员还是体育科技工作者一直都在致力于运动表现的综合分析工作,希望通过研究获得用于改善和提升训练和比赛过程中运动表现的关键信息。传统用于运动表现分析的方法主要有符号分析技术^[2]和序列分析法。前者主要通过数理统计程序,如因素分析、多元回归方程等,依据比赛结果相关程度对能够反映运动表现的指标进行分级排序,一般用于反映运动表现指标主要包括定量指标(如得分、篮板、失误等)和定性指标(如失误、铲断、控球权等)两类^[3];后者则是按照一定时间序列模式记录运动员动作的离散频率^[4],该方法能够解释比赛中不易直接察觉和感知到的潜在交互情况。然而这些方法存在先天的缺陷是,忽视运动环境信息的约束影响,如在足球或篮球等团体项目中,本方队员做出的行为可能是在对方队员施压前提下被迫形成的,换言之这些方法只考虑到了运动员在“何时”、“何地”完成“何种”行为,而“为何”以及“如何”完成这些动作的相关信息却没有考虑在内^[5],因此分析结果与实际经常出现矛盾。

作为复杂系统的典型代表,生态动力学系统相关概念的引入能够很好地解决上述问题,在该框架下可以借助环境信息解释运动员或者团队表现优异的原因,同时也可以解释为何不同的动作或战术模式依然能够产生同样优异的表现结果。

1)生态动力学视角下运动表现综合特征的研究。

从生态动力学的视角看,团队项目中的运动员以及球队可以视作神经生物学和社会神经生物学系统,在该系统下自组织过程受到周边环境信息、运动员生理变化及主观意愿等约束因素的影响,运动员与运动环境之间不断进行着信息交换。在这个信息交互过程中,运动员对环境以及其他运动员(包括队友和对手)各种关系的可视性感知成为团队项目人际间协调性建立的前提,并在此基础上做出与之相适应的行为^[6]。由

于比赛本身就是不断变化的动力系统,无论是个体约束还是运动环境约束始终都在发生变化,所以运动员在通过可视性感知与这些变化的约束条件进行信息交换时会促成不同的动作行为,最终引起比赛组织状态的涨落。当这种涨落的强度达到足以破坏存在于球员之间的平衡时,一个对称性破损就会出现。对于体育科技工作者以及教练员而言,就是要借助上述信息进一步了解团队项目运动表现的特征。

2)生态动力学视角下团队项目人际协调行为研究。

生态动力学视角下的另一个研究方向是以攻-防队员构成的次级系统(即二元体)作为考察的基本单元,探究团队项目中球员间的协调性。一项针对篮球的研究已经证实在1对1次级阶段中,进攻和防守队员在位移上存在高度耦合性特征。但是,随着进攻队员移动至篮下区域,临界涨落就会出现在这个二元体稳定态之中,系统会向“进攻方占优”或“防守方占优”的两种可能性状态之一发生突变^[7]。当然,在实际的比赛环境下,同时存在不止一个攻防队员二元体系统,它们可能会是影响球员间协调动力学的主要限制因素。因此该方向的研究是要帮助运动员清楚如何运用球与目标物移动等信息适配自己的行为并获取胜利。

总之,生态动力学在运动表现的分析方面提供可以识别关键信息变量的理论框架,在某种意义上它甚至可以成为替代符号分析法的又一选择。目前的研究主要集中在球体与运动员时空运行轨迹的分析方面,未来需要明确一个可以描述系统运行动力学特征的集合变量。除此之外,今后另一个研究重点是如何借助生态动力学,帮助团队项目运动员使用关键信息变量实现对自身运动表现控制的模拟^[8],更好做到信息与动作的功能性耦合。

2 生态动力学系统在运动创造性培养中的应用与展望

体育领域中有关运动表现的创造性解决方案始终伴随着运动项目的发展而不断涌现,这当中无论是个体技术的创新,比如田径中跳高项目从最先运用的“跨越式”、“剪刀式”到之后“背越式”技术的更迭;也不论是团队项目中创造性行为,如足球项目中局域范围攻防战术的即兴选择,都能够在运动背景下得以发现。然而,运动表现领域中的创新性却很少成为系统性研究的主题,这从另一个侧面也反映出有体育科学研究的相关理论在研究和解释创造性行为上的相对不足。在一些传统的决策或者行为选择理论当中,多重解决方案(或者选择)必须基于共同的人类经验做出假设,一旦解决方案的数量和类型以一种特别的方式

固定下来，那么系统就必须从中做出选择，而不存在寻找新方案的可能性。然而在体育领域中，很多情况下的运动表现确是在全新动作模式的发明中得以提升，而非对已有技术的模式参数再优化。近年来，特别是在复杂系统有关概念的影响下，一些学者从动力学系统的观点对体育领域创造性进行了重新审视，并将“创造性”定义为“新的功能性行为的‘探索及生成过程’”^[9]。

1) 运动领域创新性行为产生的机制研究。

根据神经生物系统的观点，大多数主体-环境系统解决方案或者状态，都是系统组分之间（或者是作为社会神经系统的运动项目中的系统主体之间）大量潜在的非线性耦合作用的结果^[10]。此类系统具有基因多效性、简并以及多重稳定性的特征^[11]。基因多效性体现了表型或行为在某个约束条件下(比如环境和基因)表达的多重效果，它为神经生物系统提供了多种交替的运动表现解决方案^[12]，而简并则是非同构组件协调在一起实现相同行为目标的能力^[13]。上述二者已经被证实可以用来解释不同运动员在试图满足特定任务约束时存在不同的约束配置，而系统多重稳定性则与个体创造性密切相关。Hristovski 等^[14]认为一项新技术或者运动方式的创造可以看作是协调性的学习阶段，它们可以通过练习更具有功能性。而个体的创造性是三个非线性特征——复杂系统中的因果非比例性、参量(约束条件)控制以及多重稳定性交互的产物^[15]。多重稳定性使得系统能够处于亚稳定状态，即在同一长期约束条件下具有两个以上吸引态，一个行为可以在吸引子或吸引点附近驻留一段时间，然后再切换到另一个吸引子周围^[16]。系统具有的这种非预先形成的柔性聚集特征不仅支撑了在约束条件下形成的体育技能习得理论的构建，同时也成为神经生物系统中创造性的先决条件，因此该理论也成为创造性行为模型的主要依据^[17-20]。

2) 运动领域创造性行为模型在个体中的应用研究。

针对创造性行为涌现的特征，以 Hristovski、Chow^[21]为代表的学者在无系统统计力学框架内，提出了基于经验的人体动作变化性的分层结构用以解释创造性的行为特征。这种人体动作变化性的分层结构显示出了一种内嵌多个亚稳态极小值的崎岖地貌^[22]，并且在武术、拳击以及舞蹈等体育活动中进行了实证研究。有学者通过精密操控关键任务的约束条件促使一名运动员或一支团队探索行动工作空间的亚稳态区域，从而观察涌现出的新颖行为。例如，Hristovski 等在对拳击运动员的击拳行为的研究中证明，在击打沙袋的任务中操控击打目标的距离会引起最佳击打动作序列的

自发性改变，不同的击拳动作会在不同拳手-目标物(沙袋)之间的距离上出现和中断。一个稳定的目标将各种动作引向特定区域，使得拳头-沙袋在一定的角度下完成碰撞。而这些角度就可以看作运动员-环境系统的序参量。^①因此，目标物体的随机移动或者是一般性的环境改变都可能引起运动员新的功能性行为的出现。

再如，另一项针对接触即兴舞蹈的研究，将舞者的行为视为一连串涌现的人体动作形式，以及在即刻情境下特殊姿态和行为持续的探测和发现的表达。在上述研究中，无论击拳行为，还是即兴发挥的舞蹈随拍动作，都可以视为创造性行为的涌现过程^[23]。针对不同的任务约束，动态层次性具有不同的结构，新颖行为的发现就是约束条件的特定配置。

3) 运动领域中创造性行为模型在团体项目中的应用研究。

团体项目创造性现象是体育领域中创造性研究关注的另一个视点。此类创造性的产生和维系来自运动员之间的非线性交互，它使环境变得非比例、突发以及不可预测。正如在其他的社会系统中，每名队员与身边其他队员之间的互动，不仅会影响到队友的行为，同时也是扰乱对手行为的必要条件^[24]。进攻队员做出行为的目的就是要造成防守队员跟随进攻队员移动而移动，从而出现破坏防守方稳定性的时空窗口。而这种进攻-防守队员结构性组织的突变只有在进攻-防守队员系统进入到队员间距离较近的临界区域时才会出现。在这些临界区域，创造性发生可能就会随着运动表现解决方案而涌现和终止^[25]，而临界区域内探索性亚稳态行为涌现是作为创新性产物的先导，因此创造性行为探索和产物具有同时存在的特征^[26]。

在复杂系统的观点下，多稳态特征能够使系统在同一参量下处于不止一种状态，非线性和噪声特征使得系统的行为并非总是必须有一个“完美理由”才会出现。减少此类不规律行为概率的唯一方式是在一个适当的方向上通过改变控制参量(一个或多个)使吸引子更加稳定。然而，有些时候这类弱稳态行为正是人们需要的，因为它们可以产生不被人们所认知的新式功能性行为。因此，未来研究首先仍应当在复杂系统的视野下进一步挖掘体育领域中的创造性行为。其次，尽管一些学者已经通过对部分项目的实证研究，建立起创造性行为的探索模型，但是如何增加模型的预测性和适用性也将是未来研究着重考虑的环节。最后，在训练实践的应用中，教练员应当注意到“内在动力学与外部系统的约束条件之间的交互作用将会促成个体解决方案涌现”这一研究结论，因为这意味着告知

运动员理论上的合理动作输出并不具有必要性。换言之,不应让运动员选择记忆大量的惯例和行为序列,而是去发展他们理解信息化约束因素的能力,并能够根据特定目标适应自己的行为。

3 神经生物学系统在体育人才培养与专长发展中的应用与展望

专长是能够将专家和新手或较少经验的个体区分开来的特征、技能和知识^[27]。在运动员的选材育才过程中,非常重要的环节就是识别影响运动员专长发展的变量,帮助运动员获得高水准的专家表现。以往针对专长习得的单一学科方法,只是单独考虑到基因或环境约束条件的影响,而对于很多认知领域以外的约束条件,包括基因、社会和自然环境、激励以及这些变量对身心方面的性格影响等等缺乏互动思考和模拟,造成了运动表现识别上的误差和困惑。

专长可以被定义为在专项表现领域当中,对施加在每名个体上独特、交互约束因素的最佳适应度。事实上,尽管有大量的约束条件会对任何给定的系统产生作用,但是总体来看它们还是可以分成机体约束、任务约束和环境约束3大类别,它们是形成个体专长发展轨迹的众多变量。这些大量的变量包括个人特征,诸如经验、学习、发育、形态学和基因等,它们相互作用形成运动表现领域中的专长习得^[28]。

1)神经生物学系统外部因素对专长习得特征的影响研究。

鉴于个体受到一定程度的遗传影响,因此专长研究首先就是要识别,限制专长习得的外部约束条件范围,关注环境约束条件影响技能和遗传型表达的方式。每名个体在接近某个专长状态,并探索不同运动表现的解决方案过程中,他们内在动力性也在多元变化。一项针对任务约束条件影响的研究已经发现,在完成相似任务学习时,个体对新的动作模式学习会更加快速。与之相反,当前后习得任务的动力学特征不尽相同时,如网球和壁球的动作学习任务,就可能造成一个相对较长的学习过程,因为内在动力学特征需要在学习者内部重建^[29]。此外,另一项关注专长发展历史的研究发现,只要施加适宜的技能习得环境,即使并不具备有利基因倾向的运动员仍然可以达到专家级别^[30]。同样,具有天赋的运动员如果缺少丰富的技能学习和实践环境那么也可能无法达到专家级别。当然,丰富的环境并不意味着先进的训练设施,有证据表明冠军运动员都出自最为基本的学习和运动表现环境。

2)神经生物学系统内在特征对专长识别的影响研究。

神经生物学系统内在的兼并以及系统组件之间的非

线性交互作用,使得通向专长的稳定路径不止一个。该特征在动力学系统中被称之为多元稳定性^[31]。从实质来看,多元稳定性呈现的是亚稳定态的特性,即行为或者运动表现的模式具有弱稳定或者弱不稳定状态。就专长习得而言,个体、任务以及环境约束条件之间的丰富交互作用建立起运动表现的“亚稳态”区域,其中约束条件的一个微小变化,例如基因结构微小变化加之训练实践或发育的微小改变,都可能导致系统组织的突变。因此,通过改变其他潜在功能性行为的发生几率,新动作的涌现或者对运动表现问题的反馈会影响到未来系统的行为。在该理论影响下,有学者经研究证明少年儿童发育过程中的确存在技能习得的关键期,它以可被看作是一个短暂的时空窗口期,在这期间复杂系统的组织对于内外部约束条件的变化最为敏感^[32]。一项对英国足球运动员专长发展的追溯性研究也说明处于关键期的发育运动员,他们的动作学习能够得到显著提升^[33]。

所以,这个方向的另一个焦点则集中在对专长发展关键期的研究。根据动力学系统的观点,运动员专长发展路径上的“转折点”或者“临界状态”具有唯一性,每名运动员个体都不相同,因此这就大大增加了对其识别的难度。根据Kauffman^[34]提出的进化过程模型,不同系统之间的彼此施压促成了进化,在这个过程中功能、结构以及组织不断的协同适应。其中次级系统之间对施加在机体上的约束条件的协同适应可能会对人的动作发展产生一生的影响,特别是就专项运动表现而言,诸如力量、速度、灵活性或者比赛阅读能力等各子系统运动员的专长表现都会产生关键的影响。但是,在生长发育期的青少年运动员身上之所以看不到一些特殊行为的原因在于,主导这些行为的特殊子系统作为系统“发展限制器”正在等待其他关键子系统达到临界水平,这也从复杂系统的角度阐明了过早专项化对青少年运动员带来不利影响的原因。

3)天才培养与专长习得的识别路径研究。

针对传统天才识别上过分强调早期识别的作用和生理、结构变量(如生理维度)的作用,以及缺乏青少年成熟率的考虑等问题,当前学者在将天才发展和专长习得看作非线性过程的想法上已经趋于一致。其中,关于天才发展模型的研究一直是大部分学者关注的焦点。Simonton^[35]率先提出了数学方程式用以对天才发展相关的潜在组件进行建模,并根据相关性对组件进行加权,它们包括基因倾向性(如身高或耐力)、环境约束条件(如社会和家庭支持)以及发育约束条件等。随后,Simonton按照遗传性和后生性对模型分别进行了描述,遗传性方面由构成天赋的所有潜在组分构成,

包括所有生理、心理、认知以及在某个领域具有卓越表现的先天性特质。除了个体性差异外, Simonton 将后天性看作是弥补天赋的多样性组分, 它们随着时间缓慢的在个体中出现并分化, 最终决定于潜在的神经、肌肉、骨骼、心理、生理、文化、社会, 以及环境等诸多变量。对于科学人员而言, 该数学模型为天才发展研究开启了又一扇极具价值的大门, 但是从操作层面采用该模型具有极大的难度, 因为模型预测的有效性需要建立在对所有指标测量的基础上。之后, Vaeyens 等^[36]依据天才发展的动力学特征建立富有洞察力的天才识别模型, 将之前研究的动力学理论, 包括亚稳态、非线性、协同适应以及简并作为模型计算的理论支撑, 注重发展的潜力而非早期的识别。

另外, 一些针对专长发展的定量研究, 还发现不同的个体和项目存在不同的发展路径。例如, 一项针对优秀三项赛运动员的研究发现, 专长习得并不需要早期专项训练^[37], 同样的结果在游泳项目中也得到印证^[38]。尽管早期多元化发展的确具有很强的说服力, 但是过早专项化也存在很多潜在的误区。对于一些有潜力的天才, 比如泰格·伍兹(高尔夫球)、塞雷娜·威廉姆斯(网球)等而言, 早期专项化却不失为一个适宜策略。因而, 强调生理约束条件和技术约束条件的运动项目, 对于专长发展结构的配置存在非常大的不同。

综上, 神经生物系统中的复杂性、多效性、简并性特征对天才培养和专长发展提出挑战的同时, 也为该领域的研究提供了线索和方向。近年来, 由专长发展研究衍生出来的另一个命题——是否存在专项表现任务的最优化动作解决方案引起了学者们的热议。一些学者认为神经生物系统具有的上述特性决定了为所有运动员确定一个共同意义的最优化动作方案并不适宜^[39-40], 一些动力学系统的专家甚至认为普适的最优化动作模式可能并不存在, 因为技术动作表现固有的特性就是多变性, 这直接导致了在适应动态环境时表现出灵活性。据此, 未来的研究可以在此基础上, 更进一步运用动力学系统的观点探讨持续的知行耦合所引起的智能行为, 对专项技能行为影响的确切机制。

在天才识别方面, 今后的研究需要将重点放在运动员未来表现的可塑性上, 而不仅仅只是考虑当前运动表现的相关数据测量。当然, 评价和预测运动员未来表现能力时, 必须考虑个体内在动力学特征, 以明确其目前在专长培养路径中处于何种位置。另外, 对运动员最终表现的预测也是未来研究的难点之一, 因为除了需要考虑学习和成长的速率, 以及专长发展路径的个体化成熟进程等方面的复杂性以外, 运动项目本身的变化越加大这种复杂性, 规则变化、新的训练方法和策

略的应用, 以及新的器材和材料的研发等等都使得运动项目正已前所未有的速度向前发展。

体育运动不仅可以看作是人类世界的社会现象, 同时它也是真实人类行为的实验库。尽管现代科学正在以前所未有的速度向前发展, 但是围绕体育运动领域的相关现象的认识, 仍然处于还原论思想的指导之下。在面面对体育领域中的诸多难题时, 行之有效的方法始终无法确定, 探究其根本原因就在于忽视了人体复杂性和社会环境复杂性。因此, 以复杂系统为研究对象的复杂科学从其产生之初, 就为以体育运动为代表的复杂现象研究开启了一扇“光明之窗”, 它丰富了不同层面、不同领域中关于复杂系统的研究。一方面, 它可能推动人体运动表现领域的发展, 从而为球队、教练员以及个体运动员建立一些新的策略。另一方面, 随着对人类社会网络理解的增加, 复杂系统在体育社会学中的应用研究也将进一步得到发展, 包括竞赛的心理驱动和团队参与、针对青少年和边缘化社会群体的体育参与政策与教育促进以及球迷和政治群体中暴力态度等等。

当然, 在复杂系统思想的发展过程中, 完全评估它们在体育领域中的贡献仍然为时尚早, 通常情况下由新方法产生的见解和发现, 旧有的方法也能够适用, 并且使用更加传统的技术可以重复一些已经被发现的结果。但是复杂系统的方法却可以将研究者的注意力集中在新的可能性上。

注释:

① 系统的整体协调运行状态依赖于组件间或子系统的协作, 从宏观角度看它可以由一组状态参量来描述, 这些状态参量随时间变化呈现出快慢不同的特征。当系统逐渐接近于发生显著质变的临界点时, 变化慢的状态参量的数目就会越来越少, 有时甚至只有一个或少数几个。这些为数不多的慢变化参量完全决定了系统的宏观行为并表现出系统的有序化程度, 它们就称之为序参量。序参量属于集合变量, 它是系统相变前后所发生的质的飞跃的最突出标志。

参考文献:

- [1] 李重阳, 李茂青. 软科学研究的复杂性范式[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2009.
- [2] LAMES M, MCGARRY T. On the search for reliable performance indicators in game sports[J]. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 2007, 7(1): 62-79.
- [3] HUGHES M, BARTLETT R. The use of performance indicators in performance analysis[J]. *Journal of*

- Sports Sciences, 2002, 20(1): 739-754.
- [4] BORRIE A, JONSSON G, MAGNUSSON M. Temporal pattern analysis and its applicability in sport: an explanation and exemplar data[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2002, 20(1): 845-852.
- [5] GLAZIER P. Game, set and match? Substantive issues and future direction in performance analysis[J]. *Sports Medicine*, 2010, 40(8): 625-634.
- [6] RICHARDSON M, MARSH K, BARON R. Judging and actualizing intrapersonal and interpersonal affordances[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2007, 33(4): 845-859.
- [7] ARAÚJO D, DAVIDS K, HRISTOVSKI R. The ecological dynamics of decision making in sport[J]. *Psychology of Sport and Exercise*, 2006, 7(6): 653-676.
- [8] DAVIDS K, RENSHAW I, GLAZIER P. Movement models from sports reveal fundamental insights into coordination processes[J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2005, 33(1): 36-42.
- [9] KEITH DAVIDS, ROBERT HRISTOVSKI, DUARTE ARAÚJO, et al. *Complex system in sport*[M]. New York:Routledge, 2014.
- [10] CHALLET D, MARSILI M, ZECCHINA R. Statistical mechanics of systems with heterogeneous agents: minority games[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(8): 1824.
- [11] CHOW J Y, DAVIDS K, BUTTON C, et al. Coordination changes in a discrete multi-articular action as a function of practice[J]. *Acta Psychologica*, 2008, 127(1): 163-176.
- [12] DAVIDS K, BAKER J. Genes, environment and sport performance: why the nature-nurture dualism is no longer relevant[J]. *Sports Medicine*, 2007, 37(11): 961-980.
- [13] EDELMAN G M, GALLY J A. Degeneracy and complexity in biological systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2001, 98(24): 13763-13768.
- [14] HRISTOVSKI R, DAVIDS K, PASSOS P, et al. Sport performance as a domain of creative problem solving for self-organizing performer-environment systems[J]. *Open Sports Science Journal*, 2012, 5(Suppl 1-M4): 26-35.
- [15] HRISTOVSKI R, DAVIDS K, ARAÚJO D. Information for regulating action in sport: metastability and emergence of tactical solutions under ecological constraints, *Perspectives on cognition and action in Sport*[M]. New York: Nova Science Publishers, 2009: 43-57.
- [16] JOLIFFE I T. *Principal component analysis*[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2002.
- [17] ARAÚJO D, DAVIDS K, BENNETT S, et al. *Emergence of sport skills under constraints Skill Acquisition in Sport: Research, Theory and Practice*[M]. Abingdon: Routledge, 2004: 409-434.
- [18] CHOW J Y, DAVIDS K, BUTTON C, et al. *Nonlinear pedagogy: A constraints-led framework to understand emergence of game play and skills*[J]. *Nonlinear Dynamics, Psychology and Life Sciences*, 2006, 10(1): 74-104.
- [19] DAVIDS K, ARAÚJO D, SHUTTLEWORTH R, et al. *Acquiring skill in sport: A constraints-led perspective*[J]. *International Journal of Computer Sciences in Sport*, 2003, 2(1): 31-39.
- [20] DAVIDS K, RENSHAW I, GLAZIER P. *Movement models from sports reveal fundamental insights into coordination processes*[J]. *Exercise and Sport Science Reviews*, 2005, 33(1): 36-42.
- [21] CHOW J Y, DAVIDS K, BUTTON C, et al. *Dynamics of movement patterning in learning a discrete multiarticular action*[J]. *Motor Control*, 2008, 12 (3): 219-240.
- [22] HRISTOVSKI R, DAVIDS K. *Metastability and situated creativity in sport*[C]. Portugal: The 2nd International Congress of Complex Systems in Sport, 2008: 8.
- [23] TORRENTS C, CASTAÑER M, DINUŠOVA M, et al. *Iscovering new ways of moving: observational analysis of motor creativity while dancing contact improvisation and the influence of the partner*[J]. *Journal of Creative Behavior*, 2010, 44(1): 45-61.
- [24] FAJEN B, RILEY M, TURVEY M. *Information, affordances and the control of action in sport*[J]. *International Journal of Sport Psychology*, 2009, 40: 79-107.
- [25] PASSOS P, ARAÚJO D, DAVIDS K, et al. *Information governing dynamics of attacker-defender interactions in youth rugby union*[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2008, 26(13): 1421-1430.
- [26] DRAZIN R, GLYNN M A, KAZANJIAN R K. *Multilevel theorizing about creativity in organizations: a sensemaking perspective*[J]. *Academy of Management Review*, 1999, 24(2): 286-307.
- [27] 王雁. 中国、美国竞技体操运动员专长发展过程

- 的比较研究[J]. 体育科学, 2012, 32(32): 50-56.
- [28] DAVIDS K, BUTTON C, BENNETT S. Dynamics of skill acquisition: a constraints-led approach. *champaign[M]. IL: Human Kinetics, 2008: 56.*
- [29] RENSHAW I, OLDHAM A R, GOLDS T, et al. Changing ecological constraints of practice alters coordination of dynamic interceptive actions[J]. *Journal of Sport Sciences*, 2007, 7(3): 157-167.
- [30] BAKER J, HORTON S. A review of primary and secondary influences on sport expertise[J]. *High Ability Studies*, 2004, 15(2): 211-228.
- [31] ARAÚJO D, DAVIDS K, HRISTOVSKI R. The ecological dynamics of decision making in sport[J]. *Psychology of Sport and Exercise*, 2006, 7(6): 653-676.
- [32] ANDERSON G S, WARD R. Classifying children for sports participation based upon anthropometric measurement[J]. *European Journal of Sport Science*, 2002, 2(3)11: 1-13.
- [33] WARD P, HODGES N J, STARKES J L, et al. The road to excellence: deliberate practice and the development of expertise[J]. *High Ability Studies*, 2007, 18(2): 119-153.
- [34] KAUFFMAN S A. *The Origins of Order : Self-organization and Selection in Evolution[M]. New York: Oxford University Press, 1993.*
- [35] SIMONTON D K. Talent and its development: an emergenic and epigenetic model[J]. *Psychological Review*, 1999, 106(3): 435-457.
- [36] VAEYENS R, LENOIR M, WILLIAMS A M, et al. Talent identification and development programmes in sport: current models and future directions[J]. *Sports Medicine*, 2008, 38(9): 703-714.
- [37] BAKER J, CÔTÉ J, DEAKIN J. Expertise in ultra-endurance triathletes early sport involvement, training structure, and the theory of deliberate practice[J]. *Journal of Applied Sport Psychology*, 2005, 17(1): 64-78.
- [38] 仇乃民, 李少丹, 马思远. 非线性范式——运动训练科学研究的新范式[J]. *体育学刊*, 2011, 18(6): 108-102.
- [38] BARYNINA I I, VAITSEKHOVSKII S M. The aftermath of early sports specialization for highly qualified swimmers[J]. *Fitness and Sports Review International*, 1992, 27(4): 132-134.
- [39] GLAZIER P S, DAVIDS K. Constraints on the complete optimization of human motion[J]. *Sports Medicine*, 2009, 39(1): 15-28.
- [40] GLAZIER P S, DAVIDS K, BARTLETT R M. Dynamical systems theory: a relevant framework for performance-orientated sports biomechanics research[EB/OL]. [http:// www.sportsci.org/2003/index.html](http://www.sportsci.org/2003/index.html), 2015-05-11.

