

•运动人体科学•

## 竞走运动员功能内稳态的脑电 $\alpha$ 波分析

黄贝君<sup>1, 2</sup>, 梁东梅<sup>1, 3</sup>, 曹伟<sup>1</sup>, 刘承宜<sup>1</sup>, 董广新<sup>2</sup>, 李捷<sup>4</sup>

(1.华南师范大学 体育科学学院, 广东 广州 510006; 2.广州体育学院 研究生部, 广东 广州 510500;  
3.华南师范大学 教育科学学院, 广东 广州 510631; 4.广东省体育局 科教宣传与交流处, 广东 广州 510105)

**摘 要:** 为了解不同水平竞走运动员的脑电  $\alpha$  波特点, 探讨其项目内稳态的 EEG 信号特征, 利用高级运动训练监控仪采集 5 名健将级竞走运动员不同训练阶段 56 个样本的 EEG  $\alpha$  波数据, 采用主成分分析和序参量理论提取竞走运动员 SpSH 所隐含的竞技水平信息进行统计分析。结果发现: 状态优秀运动员 SpSH 品质明显高于状态一般运动员。说明竞走运动员 EEG  $\alpha$  波的序参量(优势频率 10 Hz)可以表征其 SpSH 品质。

**关 键 词:** 运动生理学; 项目内稳态; 脑电  $\alpha$  波; 序参量水平; 信息熵; 主成分分析  
中图分类号: G804.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2013)02-0119-05

### An EEG $\alpha$ wave analysis of the function-specific homeostasis of race walkers

HUANG Bei-jun<sup>1, 2</sup>, LIANG Dong-mei<sup>1, 3</sup>, CAO Wei<sup>1</sup>, LIU Cheng-yi<sup>1</sup>, DONG Guang-xin<sup>2</sup>, LI Jie<sup>4</sup>

(1.School of Physical Education, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

2.Graduate Department, Guangzhou Sports University, Guangzhou 510500, China;

3.School of Education Science, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

4.Communication Department, Sports Agency of Guangdong Province, Guangzhou 510105, China)

**Abstract:** In order to understand the EEG  $\alpha$  wave characteristics of race walkers at different levels, and to probe into the EEG signal characteristics of their sport-specific homeostasis, the authors collected the EEG  $\alpha$  wave data of 56 specimens of 5 master race walkers at different stages of training by using an advanced sports training monitor, extracted competitive performance information implied in the SpSH of the race walkers, did a statistical analysis by means of principal component analysis and order parameter theory, and revealed the following finding: the SpSH quality of a race walker in excellent condition is significantly higher than that of a race walker in ordinary condition, which means that the order parameter (dominant frequency at 10 Hz) of the EEG  $\alpha$  wave of a race walker may represent his/her SpSH quality.

**Key words:** sports physiology; sport-specific homeostasis; electroencephalogram  $\alpha$  wave; order parameter level; information entropy; principal component analysis

内稳态是生理学和运动生理学的经典概念之一, 但表征方法的缺乏妨碍了其广泛深入的应用。刘承宜等<sup>[1-4]</sup>将其发展为功能内稳态(function-specific homeostasis, FSH), 提出了项目内稳态(sport-specific homeostasis, SpSH)概念, 建立了运动训练的 SpSH 理论。FSH 是维持功能充分稳定发挥的负反馈机制, 具有简洁、经济和容易量化研究等特征。FSH 的品质包括功能的复杂性和功能发挥的稳定性, 两种品质相辅相

成<sup>[2]</sup>; SpSH 维持运动成绩的充分稳定发挥<sup>[2]</sup>。运动成绩表征了功能的复杂性; 不同时间不同地点的比赛成绩的变异系数(coefficient of variation, CV)则表征了功能发挥的稳定性<sup>[5]</sup>。运动成绩越好, 比赛成绩的 CV 越低, SpSH 的品质越高。我们发现 SpSH 可以用代谢组学<sup>[5]</sup>和功能磁共振成像(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)<sup>[6]</sup>来表征。本研究探讨 SpSH 的脑电波(electroencephalogram, EEG)表征方法。

收稿日期: 2012-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(60878061)。

作者简介: 黄贝君(1989-), 男, 硕士, 研究方向: 运动员脑电图的内稳态分析。

自组织是内稳态的特征之一。Hake<sup>[7]</sup>用描述一个系统的宏观有序程度的序参量和信息熵来表征大脑的自组织特征。李捷等<sup>[8]</sup>将序参量和信息熵用于竞技状态的研究,提出运动技能形成的机制是主体目标导向下的泛脑网络自组织过程。EEG的 $\alpha$ 波反映了认知水平<sup>[9]</sup>、学习能力<sup>[10]</sup>、情感状态<sup>[11]</sup>和竞技水平<sup>[12]</sup>。李捷<sup>[13]</sup>对不同项目运动员的研究结果表明,不同项群高级运动员EEG $\alpha$ 波优势频率呈现了归一化的趋势。周传岱等<sup>[14]</sup>对261名歼击机飞行员EEG $\alpha$ 波的分析结果亦显示其频率涨落竞争结构中存在一主涨落成分。李捷<sup>[13]</sup>结合多年研究经验,将运动员EEG $\alpha$ 波10 Hz频段的相对功率值作为表征运动员实时运动技能的序参量,发现优秀运动员具备较高的序参量水平(order parameter level, OPL)。近年来,这种方法得到进一步应用与发展<sup>[15-16]</sup>。

运动员EEG $\alpha$ 波频段数据可以用序参量和信息熵分析。在此基础上,本研究利用主成分分析(principal component analysis, PCA)的方法<sup>[5, 17]</sup>,用CV表征SpSH的稳定性,同时结合逐步判别分析提取竞走运动员EEG的竞技状态信息,发现10 Hz确实为状态优秀运动员的优势频率,OPL确实可以表征SpSH,支持了序参量理论与SpSH理论的相容性。本研究还进一步根据表征SpSH的主成分(principal component, PC)发现了状态优秀运动员的优势脑区,为用EEG表征SpSH提供了理论基础。

## 1 实验对象与方法

### 1.1 实验对象及测试时间

本实验被测者为5名优秀竞走运动员,均达到运动健将或国际运动健将标准。运动员身体健康,无严重的神经系统疾病史和精神病药物服用史。2006年2月14日至2008年8月18日期间,在不同阶段(指比赛前训练期、重要比赛前1 d、比赛后训练期)对5名受试对象共进行了56次测试。

### 1.2 测试方法及步骤

EEG信号采集方法及实验操作步骤与文献<sup>[13, 15-16]</sup>一致。

### 1.3 数据处理

将仪器自动采集的测试数据转换到个人电脑上,用Excel 2003进行管理,并使用SPSS 17.0 (Chicago, USA, 2008)对实验数据进行统计分析,在Matlab 6.5 (MathWorks, USA, 2002)平台上绘制相关图形。运动员的OPL与熵值的相关性统计采用Pearson相关分析,对比分析采用Student's *T*检验,显著性水平为 $P < 0.05$ ,非常显著性水平为 $P < 0.01$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 运动员EEG $\alpha$ 波序参量水平与频率涨落熵特征

本研究结合前人多年来的研究<sup>[13, 15-16]</sup>,选取世界优秀运动员EEG $\alpha$ 波的优势频率10 Hz作为反映其竞技状态的序参量,其所对应的相对功率值即为OPL。

结果显示,从整体情况看来,5名健将级、国际健将级运动员的优势频率为10 Hz(仅运动员H的优势频率为11 Hz)。10 Hz在频率涨落竞争过程中出现功率最大值的几率最高,是频率涨落的优势成分,11 Hz排在第2位,是准优势成分,它通过竞争可以发展成优势成分,也可能因其它成分竞争而变成为辅助涨落成分。优势频率代表了自组织系统中最有价值的信息,序参量和支配原理更说明系统中占优势地位的序参量支配所有子系统的行为<sup>[14]</sup>。以运动员L为例,其EEG $\alpha$ 波的频率竞争,表现出了顺应于运动员竞技状态的实时特点,反映了OPL的动态特性。

物理学用熵的概念来描述系统的无序程度。Shanon<sup>[18]</sup>将熵的概念引入到信息论中,Hake<sup>[7]</sup>进一步将其引入到协同学中。EEG $\alpha$ 波信号经快速傅里叶变换后得到信号的功率谱,功率谱的信息熵就称为功率谱熵。本研究采用相对信息熵值。对运动员OPL与熵值的相关性进行分析( $N=55$ ,其中1次测试数据缺失),得出其线性相关系数 $R=-0.898(P < 0.01)$ ,其拟合线性方程为: $Y=114.0503-89.4944X$ 。由此可知,运动员OPL和熵值之间表现出很明显的相关规律,即熵值越高,大脑有序度越低,OPL越低。

### 2.2 运动员序参量水平的主成分分析

每位被试者每个导联有6个功率百分比值(8~13 Hz),12个导联共有72个变量。5名运动员不同时间段测试的56份数据作为56个状态(样本),构成 $56 \times 72$ 矩阵。PCA获得的前9个PC反映了原始变量91.861%的信息,它们分别主要由18、18、10、12、9、3、1、1和1个变量决定。本研究针对这9个PC展开分析。

SpSH的典型特征之一是稳定。反映运动员SpSH的PC应该具有一定的稳定性,可以用同一对象不同时间测试的EEG $\alpha$ 波数据的PC得分的CV来表征。

$$CV = |s/\bar{x}|$$

式中, $s$ 为标准差, $\bar{x}$ 为平均数。CV反映的是数据的离散程度,分别将同一PC上不同实验对象分数的CV相加,求出每个PC得分的平均CV,运动员得分最稳定的是PC3,其它依次为第5、1、2、9、6、4、7、8。

对状态优秀运动员(OPL $\geq 60\%$ )和状态一般运动员(OPL $< 60\%$ )各个PC得分的统计(见表1)显示,其PC2

与 PC3 得分之间存在非常显著性差异( $P<0.01$ ),与 PC4 得分之间存在显著性差异( $P<0.05$ )。以 PC3 得分为纵轴,PC2 得分为横轴进行搭配,做 PC 得分图。图 1 显示将 PC3 与 PC2 搭配时,状态优秀运动员( $OPL\geq 60\%$ 与  $OPL\geq 65\%$ )和状态一般运动员之间( $OPL<60\%$ 与  $OPL<65\%$ )出现了明显的分界线,状态优秀运动员集中于第 3 象限,状态一般运动员散布于另外 3 个象限。且 PC3 与 PC2 提取出运动员全脑区除枕叶(O1、O2)、后颞叶(T5、T6)外其它脑区为 OPL 的主要信息(96.64%)。

表 1 运动员 PC 得分

主成分	优秀运动员	一般运动员	F	P
PC1	-0.247 0	0.148 2	10.198	0.076
PC2	-0.613 1	0.367 9	2.619	0.000 <sup>2)</sup>
PC3	-0.574 8	0.344 9	11.271	0.000 <sup>2)</sup>
PC4	-0.383 5	0.230 1	2.855	0.025 <sup>1)</sup>
PC5	-0.081 8	0.049 0	0.066	0.640
PC6	0.065 3	-0.039 2	0.967	0.709
PC7	0.054 8	-0.032 9	2.774	0.754
PC8	0.114 3	-0.068 6	3.448	0.513
PC9	-0.075 8	0.045 5	1.787	0.665

1)PC2 与 PC4 比较  $P<0.05$ ; 2)PC2 与 PC3 比较  $P<0.01$

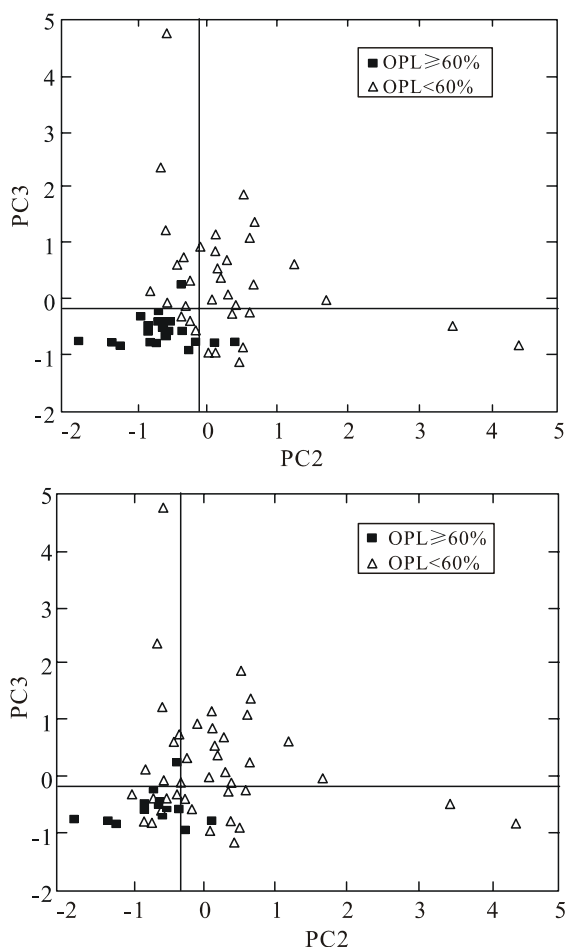
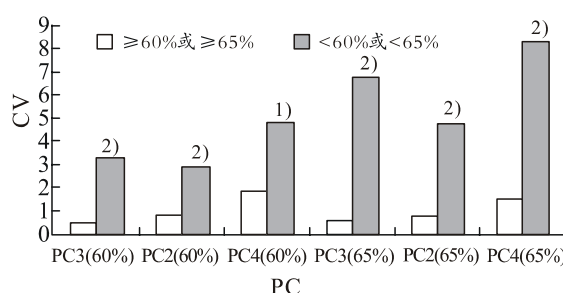


图 1 运动员的 PC 得分图

通过上面的分析可知,PC3 和 PC2 反映了运动员的竞技水平。同样我们可以用每个运动员在 PC3 和 PC2 得分的 CV 来反映运动员 SpSH 的稳定性差异。在图 2 中,状态优秀运动员在 PC3(60%)得分的 CV 明显低于状态一般运动员,PC2(60%)、PC4(60%)得分的结果也类似。因此,状态优秀运动员竞技状态的稳定性明显比状态一般运动员好,或者说,状态优秀运动员的 SpSH 品质高于状态一般运动员。PC3(65%)、PC2(65%)与 PC4(65%)的数据进一步证实了状态优秀运动员( $OPL\geq 65\%$ )竞技状态的稳定性也好于状态一般运动员。这一结果说明 OPL 确实可以表征 SpSH。



( $\geq 60\%$ 或 $\geq 65\%$ 与 $< 60\%$ 或 $< 65\%$ 指序参量水平 OPL 值, 1) $P<0.05$ , 2) $P<0.01$ )

图 2 状态优秀运动员与状态一般运动员竞技内稳态品质比较

以  $OPL\geq 60\%$ 和  $OPL<60\%$ 来区分状态优秀运动员与状态一般运动员,对上述 9 个 PC 数据做逐步判别分析,得到判别函数:  $Y=0.382 PC1+0.847 PC2+0.808 \times PC3+0.576 PC4$ 。依据所得判别函数,由 PC 矩阵还原到原始矩阵,检验相应导联相应频段的功率值在区别运动员等级上的差别,得到判别函数判误率为 10.7%、正确率为 89.3%,正确率较高。

由上述分析可知,竞走运动员 SpSH 品质主要在 PC2、PC3、PC4 中得以体现,即这 3 个 PC 提取了竞走运动员的主要竞技信息的状态信息。PC2、PC3、PC4 所主要解释的变量数分别为 18、10、12 个,选取其共同度大于 0.7 的变量,即提取的 3 个 PC 对主要解释变量的方差做出了 70%以上的贡献。

结果显示,状态优秀运动员( $OPL\geq 60\%$ )与状态一般运动员( $OPL<60\%$ )在额叶(F3、F4)、中央区(C3、C4)、顶叶(P3、P4)、前颞叶(F7、F8)的 OPL 具有非常显著性差异( $P<0.01$ );在 8 Hz 频段,状态优秀运动员( $OPL\geq 60\%$ )在各个脑区的功率值百分比均低于状态一般运动员( $OPL<60\%$ ),且具有显著性或非常显著性差异( $P<0.05$ 或  $P<0.01$ );在 9 Hz 频段,状态优秀运动员在各个脑区的功率值百分比大多低于状态一般运动员,且在右侧中央区(C4)、右侧顶叶(P4)、右侧前颞叶(F8)具有显著性差异( $P<0.05$ );在 11 Hz 频段,状态优秀运

动员在各脑区的功率值百分比低于状态一般运动员,且除枕叶(O1、O2)、左侧后颞叶(T5)外,均具有非常显著性差异( $P<0.01$ )。

### 3 讨论

1)通过 PCA 的方法,提取竞走运动员 EEG  $\alpha$  波中表征运动员竞技水平的 PC2、PC3 与 PC4。结果显示,在 10 Hz 频段,状态优秀运动员在各个脑区的功率值百分比均高于状态一般运动员,且具有非常显著性差异( $P<0.01$ ),而在 8、9 和 11 Hz 频段,各个脑区的功率值百分比均低于普通运动员,从而进一步证实了 10 Hz 为状态优秀运动员 EEG  $\alpha$  波的优势频率。这一结果支持李捷<sup>[13]</sup>的研究发现,并证明 OPL 确实可以表征 SpSH 的品质。OPL 描述了一个系统的宏观有序程度,具有非常特殊的生理意义。

研究报道,经常参加体育锻炼可以促进认知水平<sup>[9]</sup>、学习能力<sup>[10]</sup>及情感状态<sup>[11]</sup>。规律的体育锻炼会引起  $\alpha$  波功率增高<sup>[9]</sup>。Dustman 等<sup>[20]</sup>认为经常参加有氧运动者具有良好的认知功能且  $\alpha$  波(8~10 Hz)的活动增强。Lardon 等<sup>[21]</sup>发现高频率运动者  $\theta$  波功率降低,  $\alpha-1$  波(9.5~12.5 Hz)的功率明显增高。经常参加太极拳运动的中年妇女其  $\alpha$  波功率的增高幅度也明显高于初学者<sup>[22]</sup>。由此可见,长期不同形式的体育锻炼均出现一致的 EEG 变化。

运动员 EEG  $\alpha$  波优势频率(10 Hz)的形成在其功率变化中起到极其重要的作用,其振幅(OPL)显著升高<sup>[23]</sup>。 $\alpha$  波段频率的功率分布可以用信息熵来表征,OPL 越高,信息熵越小,统计学表明 OPL 与信息熵之间存在高度负相关( $P<0.01$ )。 $\alpha$  波 OPL 越高,认知水平越高、学习能力越强、情感状态越佳。

2)本研究支持了序参量理论与 SpSH 理论的相容性,还根据表征 SpSH 的 PC2 和 PC3 发现了状态优秀运动员的优势脑区。由上所述,在额叶(F3、F4)、中央区(C3、C4)、顶叶(P3、P4)、前颞叶(F7、F8),状态优秀运动员(OPL $\geq$ 60%)与状态一般运动员(OPL $<$ 60%)相比,其 EEG  $\alpha$  波的 OPL 具有非常显著性差异( $P<0.01$ )。运动员经过长期的运动训练,会形成与运动技能相关的脑结构与脑功能活动模式。

本研究用 PCA 对运动员神经生理学的研究发现,用于描述大脑宏观有序程度的序参量可以表征运动员的 SpSH 品质。状态优秀运动员的 OPL 明显高于状态一般运动员,且其 OPL 的稳定性亦显著好于状态一般运动员,即其 SpSH 品质高。综上所述,用运动员 EEG  $\alpha$  波序参量(优势频率 10 Hz)反映其实时训练适应状态及表征其 SpSH 品质是可行的。这一研究结果是否同

样适用于其他运动项目,尚有待于进一步研究。

本研究不但验证了序参量理论与内稳态理论的相容性,还根据表征 SpSH 的 PC2 和 PC3 发现了状态优秀运动员的优势脑区,为用 EEG 表征 SpSH 提供了重要理论依据。

### 参考文献:

- [1] Liu TCY, Liu Y Y, Wei EX, et al. Photobiomodulation on Stress[J]. Int J Photoenergy, 2012: 628-649.
- [2] 刘承宜,袁建琴,付德荣,等.以赛带练的内稳态研究[J].体育学刊,2008,15(5):81-84.
- [3] 刘承宜,朱平.低强度激光鼻腔内照射疗法[M].北京:人民军医出版社,2009:384-413.
- [4] 刘承宜,任占兵.生理经济学[J].华南师范大学学报:自然科学版,2011(2):1-6.
- [5] 李江华,刘承宜,徐晓阳,等.2006年多哈亚运会短距离游泳男运动员代谢组学研究[J].体育科学,2008,28(2):42-46.
- [6] 梁东梅,刘承宜,邱丽华,等.不同级别中国象棋运动员脑功能成像研究[J].体育科学,2010,30(8):69-72.
- [7] Hake H. Principles of brain functioning: a synergetic approach to brain activity, behavior and cognition[M]. Berlin: Spriger-Verlag, 1996.
- [8] 李捷,梁慈民,李鹏,等.运动技能形成的神经生理机制新探[J].体育科学,1993,13(6):84-87.
- [9] Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis[J]. Brain Res Rev, 1999, 29(2-3): 169-195.
- [10] Schabus M, Hödlmoser K, Gruber G, et al. Sleep spindle-related activity in the human EEG and its relation to general cognitive and learning abilities[J]. Eur J Neurosci, 2006, 23(7): 1738-1746.
- [11] Petruzzello S J, Landers D M. State anxiety reduction and exercise: does hemispheric activation reflect such changes?[J]. Med Sci Sport Exer, 1994, 26(8): 1028-1035.
- [12] Travis F, Blasdel K, Liptak R, et al. Invincible Athletics program: aerobic exercise and performance without strain[J]. Int J Neurosci, 1996, 85(3-4): 301-308.
- [13] 李捷.运动技能形成自组织理论的建构及其实证研究[D].北京:北京体育大学,1999.
- [14] 周传岱,翟怡娟,刘月红,等.261名歼击机飞行员脑波  $\alpha$  频段涨落图特征的研究[J].航天医学与医学

工程, 1998, 11(1): 11-14.

[15] 林丽雅, 李捷, 张莉. 高原训练对运动员赛前自组织状态影响的神经生物学分析[J]. 北京体育大学学报, 2004, 27(9): 1206-1208.

[16] 王晓军, 李捷. 不同水平射击运动员脑电 $\alpha$ 波测试结果的比较[J]. 体育科研, 2009, 30(1): 89-91.

[17] Ringnér M. What is principal component analysis?[J]. Nat Biotechnol, 2008, 26(3): 303-304.

[18] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell Syst Tech J, 1948, 17: 379-423, 623-656.

[19] Hatfield B D, Vaccaro P, Brown E, et al. Electrocardiac (EEG) relaxation response in high and low cognitively anxious persons as a result of cardiovascular exercise stress[C]//Proceedings of the 1984 Olympic Sci-

entific Congress, Eugene, OR, 1984.

[20] Dustman R E, Emmerson R Y, Shearer D E. Physical activity, age, and cognitive neuropsychological function[J]. J Aging Phys Activ, 1994(2): 143-181.

[21] Lardon M T, Polich J. EEG changes from long-term physical exercise[J]. Biol Psychol, 1996, 44: 19-30.

[22] Liu Y, Mimura K, Wang L, et al. Physiological benefits of 24-style Taijiquan exercise in middle-aged women[J]. J Physiol Anthropol Appl Human Sci, 2003, 22: 219-225.

[23] Intriligator J, Polich J. On the relationship between background EEG and the P300 event-related potential[J]. Biol Psychol, 1994, 37(3): 207-218.

## 《体育网刊》2013年第2期题录

### 探索与争鸣

- 中国体育将回归正常轨道.....胡小明  
 学涯小悟——对卢老师2011年提出问题的回应.....林文贤  
 一场关于体育纳入高考的对话实录.....Wfengzi

### 体育人文社会学

- 意外结局 无尽猜想——国际奥委会核心项目选择结果的分析.....易剑东  
 围观有罪.....王苏杭  
 体育的“终结”(一)——重建形而上学的体育本质何以必须和可能.....张震

### 民族传统体育

- 回应武术能不能打的问题.....易剑东  
 藏族节庆体育游戏的调查与研究  
 ——以康北民间民俗节庆中的石头游戏“掩呱”为例.....何小军, 曾伟, 蒲西安  
 国际旅游岛建设的价值研究  
 ——基于海南民族休闲体育的社会学角度.....李慧, 胡富松

### 运动人体科学

- 孙子兵法与负反馈.....刘承宜  
 观察摩托车专业选手适应噪声对血清中丙二醛含量变化的研究.....闻博, 闻天扬, 房晓华