

# 基于灰色近优模型远红外压力袜 缓解运动疲劳性能评价

吕笛笛, 李艳梅\*

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

**摘要:**为探讨远红外纤维的保健性能,扩大其应用范围,设计10双不同远红外纤维质量分数和组织结构不同的压力袜,将表面肌电信号、血压、心率、主观评价作为测试指标,在相同条件下进行人体实验,研究远红外压力袜缓解运动疲劳的效果。单一的指标对比不能综合评价10双压力袜性能的优劣,因此采用灰色近优模型对4个指标进行综合评价。结果表明:10双试样中,试样10#缓解运动疲劳性能最好;相同组织结构下,织物缓解运动疲劳的效果会随着远红外纤维质量分数的增加而提升。

**关键词:**远红外压力袜;组织结构;灰色近优模型;运动疲劳

**中图分类号:**TS 186.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2022)06-0493-05

## Evaluation of Alleviating Sports Fatigue Performance of Far-Infrared Compression Stockings Based on Grey Optimal Model

LYU Didi, LI Yanmei\*

(College of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to explore the health care performance of far-infrared fiber and expand its application field, 10 kinds of compression stockings with different far-infrared fiber content and tissue structure were designed. Under the same conditions, human body tests using different test index were carried out, namely surface electromyography, blood pressure, heart rate and subjective evaluation, to study the effect of compression stockings on alleviating sports fatigue. Single index comparison cannot comprehensively evaluate the performance of the 10 compression stockings, and the grey near-optimal model was used to comprehensively evaluate the 4 indexes. The results showed that among the 10 samples, sample 10# has the best performance in alleviating sports fatigue, and under the same structure, the performance of the fabrics to alleviate sports fatigue will increase with the increase of far-infrared fiber content.

**Key words:** far-infrared compression stockings, organization structure, grey optimal model, sports fatigue

远红外纤维作为功能材料,过去主要利用其保暖抗菌功能,随着科技的发展,其保健功能也得到了应用。远红外纤维可以使机体产生温热效应,改善人体微循环,促进新陈代谢,减少机体乳酸的堆积,起到调节代谢、消炎、缓解肌肉疲劳、镇痛的作用<sup>[1-2]</sup>。NUNES R F H等<sup>[3]</sup>通过对比远红外运动裤和普通运动裤的生化指标,监测延迟性肌肉酸痛,

认为穿着远红外服装可以缓解运动疲劳,尤其在强化训练早期阶段效果明显。李萱等<sup>[4]</sup>研究了远红外骑行裤缓解疲劳的效果,发现不同远红外纤维质量分数的骑行裤具有不同的效果,远红外纤维质量分数为25%,50%的骑行裤缓解疲劳效果相似,作用较弱;远红外纤维质量分数为75%,100%的骑行裤缓解疲劳效果相近,作用较明显。同时,还发现

收稿日期:2022-07-27; 修订日期:2022-10-10。

作者简介:吕笛笛(1997—),女,硕士研究生。

\*通信作者:李艳梅(1974—),女,教授,博士生导师。主要研究方向为高性能服装材料及产品研发、数字化纺织服装技术。

Email:lym0350@126.com

组织结构对骑行裤缓解运动疲劳具有一定的影响。文中选择远红外锦纶和普通锦纶为原料,开发出不同远红外纤维质量分数和组织结构的压力袜,并对其进行递增负荷实验,使用灰色近优法对测试指标进行综合评价<sup>[5]</sup>,选出效果最优的试样,为压力袜的开发与应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

1.1.1 原料 普通锦纶和远红外锦纶(线密度均为 7.8 tex),锦氨包覆纱(规格为 3070),均为东莞高速纺织品有限公司生产;乳胶橡筋(规格为 120#),诸暨捷栋化纤有限公司生产。

1.1.2 仪器 MP615 单针筒织袜机,圣东尼(上海)针织机器有限公司制造;h/p/cosmos 跑台,德国 h/p/cosmos 公司制造;Delsys Trigno Mobile 无线表面肌电测试仪,美国 Delsys 公司制造;Tango M2 血压运动监护仪,美国 Sun Tech 公司制造;Ergoline 心率带,德国 Ergoline 公司制造。

1.2 织物规格参数

运动压力袜产生作用的部位主要是袜筒,因此实验针对袜筒进行远红外纤维质量分数设计。通过单针筒织袜机调节面纱比例,使远红外锦纶在面纱中的质量分数分别为 0,25%,50%,75%,100%;组织结构设定为平针衬垫组织,衬垫比分别为 1:1 和 3:1。压力袜规格见表 1。

表 1 压力袜规格  
Tab.1 Pressure socks specifications

试样编号	锦纶与远红外锦纶 质量比(面纱)	组织结构
1 <sup>#</sup>	100/0	1:1 平针衬垫组织
2 <sup>#</sup>	75/25	
3 <sup>#</sup>	50/50	
4 <sup>#</sup>	75/25	
5 <sup>#</sup>	0/100	
6 <sup>#</sup>	100/0	3:1 平针衬垫组织
7 <sup>#</sup>	75/25	
8 <sup>#</sup>	50/50	
9 <sup>#</sup>	75/25	
10 <sup>#</sup>	0/100	

1.3 测试方案

受试者:有运动习惯的 5 名女性,身高(162.5±2.5) cm,体质质量(57±3) kg,年龄(21.5±0.5)岁,小腿围度(34±2) cm。每次实验均在相同时间段进行,每双压力袜测试时间最少间隔 24 h。

测试部位:内外腓肠肌<sup>[6]</sup>。

测试过程:实验在温度为 25℃、湿度为 60% 的恒温恒湿实验室进行。测试前,受试者身穿实验压力袜静坐 30 min。运动方案见表 2,受试者运动过程如图 1 所示。

表 2 运动方案  
Tab.2 Movement process

阶段	速度/(km/h)	坡度/%	时间/min
0	2.7	0	2
1	2.7	5	2
2	4.0	10	4
3	5.5	12	8



图 1 受试者运动过程

Fig.1 Subject exercise process

1.4 实验指标

1.4.1 表面肌电信号 文中使用幅频联合分析法,结合时域指标均方根振幅(RMS)和频域指标中值频率(MF),对肌肉状态等级展开分析。幅频联合分析示意如图 2 所示。幅频联合分析法评判肌肉状态原则为:第 1 象限中,横纵坐标数值同时升高时,表明肌肉力量增大;第 2 象限中,横坐标数值下降但纵坐标数值升高时,表明肌肉处在力量恢复阶段;第 3 象限中,横纵坐标数值同时下降时,表明肌肉力量减小;第 4 象限中,横坐标数值升高但纵坐标数值下降,代表肌肉处在疲劳阶段<sup>[4]</sup>。选用无线表面肌电测试仪对受试者进行肌电信号采集。

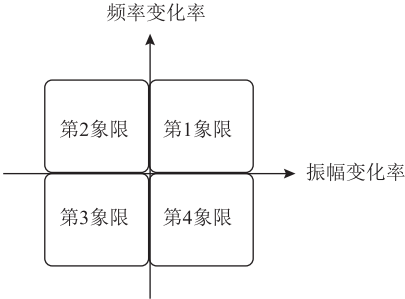


图 2 幅频联合分析示意

Fig.2 Amplitude-frequency joint analysis schematic

**1.4.2 血压** 伴随着运动时间的增加,脉压差增大,血流量增多。运动结束时,脉压差回到稳定状态所需时间越短,身体状态越好,运动产生的疲劳越微弱。受试者血压的采集选择运动血压监护仪。脉压差的恢复效果定量表示为运动结束前后脉压差下降速率。脉压差下降速率( $V$ )的公式为:

$$V=(\Delta f-\Delta e)/\Delta e$$

式中: $\Delta f$ 为运动结束即刻的脉压差; $\Delta e$ 为运动达到力竭状态的脉压差<sup>[7]</sup>。

**1.4.3 心率** 运动初期,伴随着血液输出量的增加心率出现增大,促使机体较快进入运动状态;运动中后期,血液输出速度加快使得心率上升。“绝对心率”可定量表示为运动过程中实时心率与运动前安静心率的差值,体现了运动过程中机体的运动状态<sup>[7]</sup>。受试者心率的采集选择心率带。

**1.4.4 主观评价** 受试者穿着压力袜进行运动,选用主观体力感觉等级量表(RPE)进行测试,按照疲劳程度将评价等级分为轻松、稍费力、费力、很费力及非常费力 5 个等级,主观疲劳评价为非常费力时表明受试者处于力竭阶段<sup>[7]</sup>,记录此时的时间,将其作为评价指标。

2 结果与分析

2.1 测试结果

10 双试样测试结果见表 3。依据幅频联合分析法可知,表面肌电评分数值越小,评价越优,缓解运动疲劳效果越好。10 双试样的评分排序依次为 5<sup>#</sup><10<sup>#</sup><8<sup>#</sup><3<sup>#</sup><9<sup>#</sup><4<sup>#</sup><7<sup>#</sup><2<sup>#</sup><6<sup>#</sup><1<sup>#</sup>,整体而言,试样 10<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>的缓解效果最好,试样 6<sup>#</sup>和 1<sup>#</sup>的缓解效果最差。在 1:1 平针衬垫组织试样中,试样 5<sup>#</sup>的缓解效果最好,试样 1<sup>#</sup>的缓解效果最差。因此,表面肌电评分与压力袜远红外纤维质量分数呈负相关。

表 3 运动疲劳评价指标测试结果

Tab.3 Results of sports fatigue evaluation index test				
试样编号	表面肌电评分	脉压差下降速率	绝对心率/(次/分)	主观疲劳时间/min
1 <sup>#</sup>	3.12	0.10	54.20	9
2 <sup>#</sup>	2.81	0.19	59.82	10
3 <sup>#</sup>	2.43	0.18	62.49	11
4 <sup>#</sup>	2.49	0.21	65.96	13
5 <sup>#</sup>	2.18	0.29	67.80	15
6 <sup>#</sup>	3.02	0.06	56.58	9
7 <sup>#</sup>	2.65	0.11	58.40	12
8 <sup>#</sup>	2.37	0.14	61.13	11
9 <sup>#</sup>	2.45	0.23	65.10	14
10 <sup>#</sup>	2.22	0.33	63.47	16

脉压差下降速率越大,评价越优。10 双试样的脉压差下降速率依次为 10<sup>#</sup>>5<sup>#</sup>>9<sup>#</sup>>4<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>>8<sup>#</sup>>7<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>>6<sup>#</sup>,可以看出试样 10<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>的下降速率最快,试样 1<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>的下降速率最慢。在 3:1 平针衬垫组织试样中,试样 10<sup>#</sup>的下降速率最快,可知脉压差下降速率与压力袜远红外纤维质量分数呈正相关。与不含远红外纤维的试样 1<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>相比,其余含有远红外纤维试样的脉压差下降速率均出现不同程度的上升。由此可以看出,加入远红外纤维的压力袜可以加速机体的脉压差回落至稳定状态。

绝对心率数值越大,评价越优。10 双试样的绝对心率依次为 5<sup>#</sup>>4<sup>#</sup>>9<sup>#</sup>>10<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>>8<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>>7<sup>#</sup>>6<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>,可以看出,受试者穿着试样 5<sup>#</sup>时的机体状态最好。在组织结构为 1:1 平针衬垫组织试样中,机体绝对心率数值随着远红外纤维质量分数的增加而增大。

主观疲劳时间越长,评价越优。10 双试样的主观疲劳时间依次为 10<sup>#</sup>>5<sup>#</sup>>9<sup>#</sup>>4<sup>#</sup>>7<sup>#</sup>>8<sup>#</sup>=3<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>=6<sup>#</sup>,可知,受试者穿着试样 10<sup>#</sup>时,疲劳感觉出现最晚。对比相同远红外纤维质量分数的试样,可以看出,受试者穿着 3:1 平针衬垫组织试样时,出现疲劳感觉的时间整体大于穿着 1:1 平针衬垫组织试样的时间。

2.2 灰色近优系统的建立

依据衡量运动疲劳指标,选用灰色近优综合评价法对 10 双试样缓解运动疲劳的优劣进行评价。该方法具有样本需求量少、计算工作量少、各指标无权重、定量与定性分析结果相同等特点<sup>[8]</sup>,在纺织服装性能评价中得到了广泛应用。

首先,建立灰矩阵  $R_{n \times m}$ <sup>[9]</sup>,

$$R_{n \times m} = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & \cdots & R_{nm} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: $R_{n \times m}$ 是试样  $m$  的第  $n$  个测试指标的灰元值; $A_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为试样的评价指标; $m$ 为测试样品个数。

将各测试指标的数据代入式(1),得到白化灰矩阵  $R'_{n \times m}$ ,即

$$R'_{n \times m} = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R'_{11} & \cdots & R'_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R'_{n1} & \cdots & R'_{nm} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: $R'_{n \times m}$ 是试样  $m$  的第  $n$  个测试指标的白化灰元值。

由于  $\mathbf{R}'_{n \times m}$  之间量纲存在区别,首先要进行无量纲处理,将  $\mathbf{R}'_{n \times m}$  映射到区间  $[0,1]$  上,通过单点效果测度得到近优白化灰矩阵  $\mathbf{R}''_{n \times m}$ ,即

$$\mathbf{R}''_{n \times m} = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R''_{11} & \cdots & R''_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R''_{n1} & \cdots & R''_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{R}''_{n \times m}$  是试样  $m$  的第  $n$  个测试指标的近优白化灰元值。

其中单点效果测度共有 3 种方式,分别为:上限、中限、下限效果测度,分别适用于指标越大越优型、指标适中型和指标越小越优型<sup>[10]</sup>。

上限效果测度:

$$R''_{ij} = \frac{R'_{ij}}{\max \{R'_{ij}, u_{\max}\}} \quad (4)$$

式中:  $\max \{R'_{ij}, u_{\max}\} = \max \{R'_{i1}, R'_{i2}, \cdots, R'_{im}, u_{\max}\}$ ;  $u_{\max}$  为最大最优值。

中限效果测度:

$$R''_{ij} = \frac{\min \{R'_{ij}, u_0\}}{\max \{R'_{ij}, u_0\}} \quad (5)$$

式中:  $u_0$  为评价指标的均值。

$$\mathbf{R}'_{4 \times 10} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3.12 & 2.81 & 2.43 & 2.49 & 2.18 & 3.02 & 2.65 & 2.37 & 2.45 & 2.22 \\ 0.10 & 0.19 & 0.18 & 0.21 & 0.29 & 0.06 & 0.11 & 0.14 & 0.23 & 0.33 \\ 54.20 & 59.82 & 62.49 & 65.96 & 67.80 & 56.58 & 58.40 & 61.13 & 65.10 & 63.47 \\ 9.00 & 10.00 & 11.00 & 13.00 & 15.00 & 9.00 & 12.00 & 11.00 & 14.00 & 16.00 \end{bmatrix}$$

文中压力袜主要用于缓解机体运动过程中的肌肉疲劳,不同测试指标对应不同效果测度:表面肌电评分值越小,性能越好,选择下限效果测度;脉

$$\mathbf{R}''_{n \times m} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.71 & 0.78 & 0.90 & 0.88 & 1.00 & 0.72 & 0.82 & 0.92 & 0.89 & 0.98 \\ 0.30 & 0.58 & 0.55 & 0.64 & 0.88 & 0.18 & 0.33 & 0.42 & 0.70 & 1.00 \\ 0.80 & 0.88 & 0.92 & 0.97 & 1.00 & 0.83 & 0.86 & 0.90 & 0.96 & 0.94 \\ 0.56 & 0.63 & 0.69 & 0.81 & 0.94 & 0.56 & 0.75 & 0.69 & 0.88 & 1.00 \end{bmatrix}$$

将数值代入式(7),得到 10 双试样的综合近优度,即

$$\mathbf{R}''_s = S_j [0.59 \quad 0.72 \quad 0.77 \quad 0.83 \quad 0.96 \quad 0.57 \quad 0.69 \quad 0.73 \quad 0.86 \quad 0.98]$$

对 10 双试样的综合近优度按从大到小顺序进行排列,得到其缓解运动疲劳效果的优劣顺序为  $10^\# > 5^\# > 9^\# > 4^\# > 3^\# > 8^\# > 2^\# > 7^\# > 1^\# > 6^\#$ 。

依据综合近优度及表 2 可知:组织结构为 3:1 平针衬垫组织、远红外纤维质量分数为 100% 的压力袜缓解运动疲劳效果最好,组织结构为 3:1 平针衬垫组织、远红外纤维质量分数为 0 的压力袜缓解运动疲劳效果最差;试样  $9^\#$  和试样  $4^\#$  只存在组织结

下限效果测度:

$$R''_{ij} = \frac{\min \{R'_{ij}, u_{\min}\}}{R'_{ij}} \quad (6)$$

式中:  $\min \{R'_{ij}, u_{\min}\} = \min \{R'_{i1}, R'_{i2}, \cdots, R'_{im}, u_{\min}\}$ ;  $u_{\min}$  为最小最优值。

通过公式(3)已经得出各测试指标的近优度,为了全面得出各试样的综合近优度,对式(3)的近优白化灰量进行处理,得到近优度白化灰元行矩阵  $\mathbf{R}''_s$ ,即

$$\mathbf{R}''_s = S_j [S_1, S_2, \cdots, S_m] = S_j \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R''_{i1}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R''_{i2}, \cdots, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R''_{im} \right] \quad (7)$$

根据公式(7)对所有试样的综合近优度进行计算排序,综合近优度的范围为  $0 \sim 1$ ,数据越大表明试样的性能越好<sup>[11,12]</sup>。

2.3 压力袜缓解运动疲劳性能综合评价

选用 2.1 测得指标:表面肌电信号、血压、心率、主观疲劳时间(分别记为  $A_1, A_2, A_3, A_4$ ) 对不同远红外质量分数和组织结构压力袜缓解运动疲劳效果进行评价,将测得结果代入式(1),得到白化灰矩阵  $\mathbf{R}'_{4 \times 10}$ ,即

压差下降速率、绝对心率、主观疲劳时间值越大,性能越好,选择上限效果测度。各测试指标按照对应公式,将近优白化灰元值代入,得到矩阵  $\mathbf{R}''_{n \times m}$ ,即

构的差别,二者近优度数据相似,且各指标测试结果基本一致,这表明当压力袜远红外质量分数为 75% 时,组织结构对其缓解运动疲劳效果影响不大;就远红外纤维质量分数而言,压力袜缓解运动疲劳效果随着远红外纤维质量分数的增加而增大。

3 结 语

为了客观合理评价压力袜的远红外纤维质量分数和组织结构对运动疲劳的影响,测试受试者穿着 10 双试样的表面肌电信号、血压、心率、主观评价,运用灰色近优综合评价法得到试样性能的综合

评价。结果表明,随着远红外纤维质量分数的增加,织物可有效缓解运动疲劳。因此,提高远红外纤维在压力袜中的质量分数,有利于压力袜更好地发挥缓解运动疲劳的作用。利用灰色近优综合评价法对试样缓解运动疲劳性能进行综合评价,试样10#的综合性能最好,更适合于开发具有缓解运动疲劳的压力袜。

## 参考文献:

- [1] 张璐,刘茜,吴湘济. 理疗保健功能纺织品的研究与开发现状[J]. 产业用纺织品,2020,38(8):1-6.  
ZHANG Lu, LIU Qian, WU Xiangji. Research and development status of physiotherapy and health care functional textiles[J]. Technical Textiles, 2020, 38(8):1-6. (in Chinese)
- [2] 乔辉,沈忠安,孙显康,等. 功能性服装面料研究进展[J]. 服装学报,2016,1(2):127-132.  
QIAO Hui, SHEN Zhongan, SUN Xiankang, et al. Research for functional garment material[J]. Journal of Clothing Research, 2016, 1(2):127-132. (in Chinese)
- [3] NUNES R F H, CIDRAL F F J, LORES L J F, et al. Effects of far-infrared emitting ceramic materials on recovery during 2-week preseason of elite futsal players. [J]. Journal of Strength and Conditioning Research, 2020, 34(1):235-248.
- [4] 李萱,阎玉秀,金子敏,等. 远红外面料骑行裤对运动疲劳的影响[J]. 丝绸,2020,57(3):51-56.  
LI Xuan, YAN Yuxiu, JIN Zimin, et al. Effect of riding pants with far-infrared fabric on sports fatigue[J]. Journal of Silk, 2020, 57(3):51-56. (in Chinese)
- [5] 代萌婷,屠晔. 新型絮料与传统絮料服用舒适性的灰色近优评价[J]. 毛纺科技,2020,48(11):83-87.  
DAI Mengting, TU Ye. Evaluation on wearing comfort of new types of wadding and traditional types of wadding based on grey nearly optimal method[J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(11):83-87. (in Chinese)
- [6] 韩烨,衣卫京,郭瑞良. 基于运动疲劳调查分析的紧身跑步裤设计[J]. 针织工业,2020,(1):63-66.  
HAN Ye, YI Weijing, GUO Ruiliang. Design of running tight pants based on sport fatigue investigation and analysis[J]. Knitting Industries, 2020, (1):63-66. (in Chinese)
- [7] 李萱. 远红外面料骑行裤对运动疲劳及疲劳恢复的影响[D]. 杭州:浙江理工大学,2020.
- [8] CHEN Y P, YAN Y X, WU B J, et al. Summer sportswear fabrics research of jade fiber and comprehensive evaluation [N]. Proceedings Paper, 2015(1):12-13.
- [9] 苏德保,李红霞. 基于灰色近优法的蜂窝涤纶混纺针织物服用性能评价[J]. 毛纺科技,2014,42(2):57-61.  
SU Debao, LI Hongxia. Evaluation on wearing performance of honeycomb PET blended knitted fabric based on gray nearly optimal method[J]. Wool Textile Journal, 2014, 42(2):57-61. (in Chinese)
- [10] 蔡薇琦,马崇启,阚永霞,等. 灰色聚类分析在织物热学性能评价中的应用[J]. 纺织学报,2016,37(11):64-67,74.  
CAI Weiqi, MA Chongqi, KAN Yongjia, et al. Application of grey clustering analysis in evaluation of fabric thermal performance[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(11):64-67,74. (in Chinese)
- [11] 马顺彬. 竹浆/棉交织物力学性能的灰色聚类分析[J]. 现代丝绸科学与技术,2011,26(3):84-86,114.  
MA Shunbin. Gray cluster analysis of the mechanical properties of bamboo pulp / cotton doublets[J]. Modern Silk Science and Technology, 2011, 26(3):84-86,114. (in Chinese)
- [12] 郑鹏程,汪学骞,陈翟. 双模型互证法在评判休闲西裤外观保持性中的运用[J]. 纺织学报,2007(3):79-83,99.  
ZHENG Pengcheng, WANG Xueqian, CHEN Zhai. Application of two models certificating each other to evaluating the appearance retention of leisure trousers[J]. Journal of Textile Research, 2007(3):79-83,99. (in Chinese)

(责任编辑:卢杰)