

DOI:10.16781/j.0258-879x.2017.10.1321

• 技术方法 •

自适应视力检测法的设计与仿真研究

张拥军^{1*}, 王潇潇², 王欢², 林辉³, 胡敏³

1. 蚌埠医学院公共基础学院数理教研室, 蚌埠 233000
2. 中国科学技术大学生命科学学院视觉研究实验室, 合肥 230027
3. 合肥工业大学电子科学与应用物理学院物理系, 合肥 230009

[摘要] **目的** 设计一种新的视力检测方法——自适应视力检测法, 探讨自适应视力检测法的实际应用价值。**方法** 通过计算机仿真实验考察自适应视力检测法的可行性。以仿真实验为基础, 分别用 40 trials、80 trials 的自适应视力检测法及标准对数视力表(随机次序)对 30 名受试者〔(26.1±4.7)岁, 男 18 名、女 12 名〕进行双眼视力检查。用自适应视力检测法检查结果与标准对数视力表检查结果的一致性限度评价其准确性, 用配对样本 *t* 检验评价两种检查方法的相关性和差异性。**结果** 受试者的视力检查结果显示 40 trials 的自适应视力检测法检查结果与标准对数视力表检查结果间差异无统计学意义, 但 80 trials 的自适应视力检测法检查结果与标准对数视力表检查结果间差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。**结论** 在合理的检查次数内(40 trials), 自适应视力检测法与标准对数视力表在成人视力检查中一致性较好。与标准对数视力表相比, 自适应视力检测法有避免视标记忆问题、减小视觉拥挤效应等优势, 具有实际应用价值。

[关键词] 视力测定法; 自适应视力检测法; 标准对数视力表; 视觉

[中图分类号] R 770.421 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2017)10-1321-06

Design and simulation of computerized tumbling E test

ZHANG Yong-jun^{1*}, WANG Xiao-xiao², WANG Huan², LIN Hui³, HU Min³

1. Department of Mathematics and Physics, School of Comprehensive Foundation Studies, Bengbu Medical College, Bengbu 233000, Anhui, China
2. Visual Research Laboratory, School of Life Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China
3. Department of Physics, School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

[Abstract] **Objective** To design a new method for visual acuity test naming computerized tumbling E test, and to explore the application of computerized tumbling E test. **Methods** The feasibility of computerized tumbling E test was investigated by computer simulation experiment. Based on the simulation experiment, a total of 30 subjects (〔26.1±4.7〕 years old, 18 males and 12 females) received binocular vision acuity examination by computerized tumbling E test with 40 trials or 80 trials and standard logarithmic visual acuity chart (random sequence), respectively. The accuracy of computerized tumbling E test was evaluated by comparing the consistency limit with standard logarithmic visual acuity chart. The correlation and difference between the two tests were evaluated by paired samples *t* test. **Results** There was no significant difference between the results of the computerized tumbling E test with 40 trials and standard logarithmic visual acuity chart, while the difference between the results of the 80 trials and standard logarithmic visual acuity chart was statistically significant ($P < 0.05$). **Conclusion** The consistency is good for adult visual test using the computerized tumbling E test with reasonable number of trials (40 trials) and the standard logarithmic visual acuity chart. Compared with the standard logarithmic visual acuity chart, computerized tumbling E test has advantages such as avoiding the problem

[收稿日期] 2017-03-16 **[接受日期]** 2017-05-04

[基金项目] 国家自然科学基金委-加国际合作项目(81261120562), 安徽省自然科学基金(1408085MKL16), 蚌埠医学院自然科学基金重点项目(BYKY1626ZD). Supported by China-Canada International Cooperative Project of National Natural Science Foundation of China (81261120562), Natural Science Foundation of Anhui Province (1408085MKL16), and Key Project of Natural Science Foundation of Bengbu Medical College (BYKY1626ZD).

[作者简介] 张拥军, 硕士, 讲师.

* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 0552-3175261, E-mail: j1609@163.com

of optotype memory and reducing the visual crowding effect, showing practical application value ($P < 0.05$).

[Key words] optometry; computerized tumbling E test; standard logarithmic visual acuity chart; vision

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2017, 38(10): 1321-1326]

视力检查是眼科检查的常规内容,检查结果的可靠性与可重复性对准确进行临床诊断和眼病筛查有着重要意义。目前国内大多用标准对数视力表进行视力检查,该视力表是缪天荣教授^[1]根据 Weber-Fechner 心理物理学法则、利用视标大小及形成的视角以几何级数增减的方法发明的。其记录法可以用于视力统计和疗效的评估,同时记录值表现为视力越好数值越大,符合大众习惯^[2],因而被广泛应用。但其使用局限性也不容回避。例如,上下行视标的大小不相等,不同行视标的列间距不相等,存在边缘效应和视觉拥挤效应;视标开口方向固定,存在记忆视标问题,增加了受试者猜中视标的概率,降低了检查的可靠性;视力表的印刷质量差异、生产规格不统一、灯箱视力表的亮度不均匀、检查人员的经验、检查环境等因素都会对检查结果产生影响。

随着电子设备的日渐普及,近年来有研究者尝试使用 iPad、智能手机等设备进行视力检查,但电子设备目前仍存在照度和亮度不够稳定和标准、视标不标准、测量距离不准确等问题,并且很难消除屏幕大小及屏幕反光现象的制约,直接影响视力检查结果^[3-5]。但用基于计算机的显示器进行视力检查在某种程度上有其独特的优势^[6]。自适应视力检测法是在 Beck 等^[7]发明的 E-ETDRS 视力表的基础上研制出来的,该方法通过计算机程序设计并控制刺激,用显示器呈现刺激进行视力检查,每幅刺激由 9 个大小相同、开口方向不同的 E 视标组成,排列成 3 行 3 列,视标的行、列间距均相等。本研究用自适应视力检测法和标准对数视力表同时进行成人双眼视力检查,以评价自适应视力检测法的准确性和可重复性,探讨自适应视力检测法这一自动化视力检查方法应用于临床的可行性。

1 对象和方法

1.1 自适应视力检测法计算机仿真实验

为了考察实验的可行性,利用 logistic 函数仿真一个理想观察者,根据预先设定好的心理物理学函数及参数判断出相应刺激的正确概率,进而根据该正确概率给出正确或错误的回答。为了最大程度地模拟真实情况,我们选择了具有代表性的执行对比度检测任务的正常人的心理物理学函数^[8]作为理想观察者内在模型。内在“真实”的心理物理学函数采用 logistic 函数形式 $p = (1 - \gamma - \lambda) / (1 + e^{-\beta(x-\alpha)})$, 其中 p 是正确率; x 是输入的刺激强度; α 是感觉阈值,即该理想观察者的 log MAR (logarithm of the minimum angle of resolution) 视力,本研究中定义为 0; β 是斜率,在 logistic 函数中定义为 16.58,从而使得该心理物理学函数的上升段(正确率 29%~85%),即观察者作出不确定性回答的视标宽度为 0.2 log MAR^[9]; γ 表示当刺激强度极低而受试观测不到刺激时的猜测率,在强制 N 选一任务中 $\gamma = 1/N$,本实验采用强制四选一任务,故设定为 0.25; λ 表示因为眨眼、按键错误等原因回答错误的概率,即遗漏率,一般心理物理学实验中遗漏率会控制在 0.02 以下,但考虑到本测试方法会用于不熟练的观察者,故仿真实验中设定为一个较高的遗漏率($\lambda = 0.04$)^[10],以检验本方法应对高遗漏率观察者时的可靠性。仿真实验结果(图 1)表明,测试的偏差(bias)在 25 个 trial 后趋于稳定;测试的标准差(SD)随着 trial 数的增加逐渐降低,30 个 trial 后的标准差趋于稳定,而且 15 个 trial 后测试的标准差即小于 0.1。根据仿真实验结果,自适应视力检测法的测量结果在 30 个 trial 后已被接受(实验中设定 trial 数为 40)。

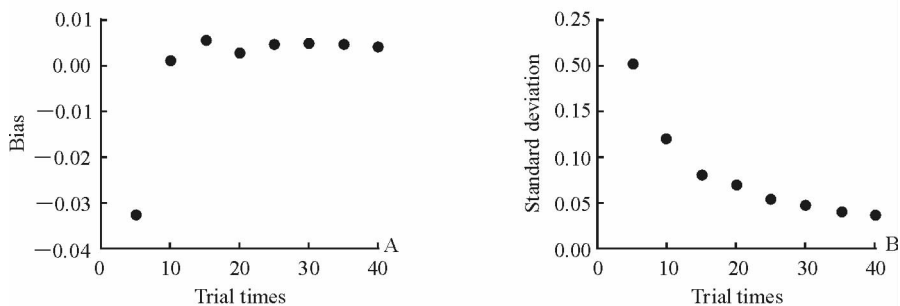


图 1 自适应视力检测法计算机仿真实验结果统计图

Fig 1 Statistical results of simulation experiment for computerized tumbling E test

A: Scatter diagram of trial number and bias; B: Scatter diagram of trial number and standard deviation

1.2 受试者视力检查

1.2.1 检查对象 检查对象共 30 名, 年龄(26.1 ± 4.7)岁, 男 18 名、女 12 名, 其中裸眼视力 24 人、矫正视力 6 人。实验前在某网站论坛发布招募视力检查受试者的信息, 本实验的受试者均为自愿报名, 以在校大学生居多, 该群体的视力发育已经成熟, 且正处于青壮年, 检查结果具有一定的代表性。所有检查对象均无弱视和其他影响视觉功能的眼部疾患。分别用 40 trials、80 trials 的自适应视力检测法以及标准对数视力表(随机次序)对受试者进行双眼视力检查各 1 次。

1.2.2 自适应视力检测法检查过程 自适应视力检测法中视标为三划相等的字母 E, 长、宽均为 $5a$, 每一笔画的长度均为 a (图 2A)。本检查程序中的最大视标大小为 $1.0 \log \text{MAR}$, 最小视标大小为 $-0.3 \log \text{MAR}$ 。对于自适应视力检测法这一类的自适应方法, 由于视标会自适应变化到受试者的可见大小, 每次检查的第 1 个 trial 常常设定略高于阈值^[10], 实验中视标初始大小设定为 $0.3 \log \text{MAR}$ 。每幅刺激包含 3 行 3 列、共 9 个视标, 遵循如下规则: 字体为字母 E, 刺激的高度和宽度比为 1:1, 视标行间距和列间距都等于视标宽度(图 2B)。

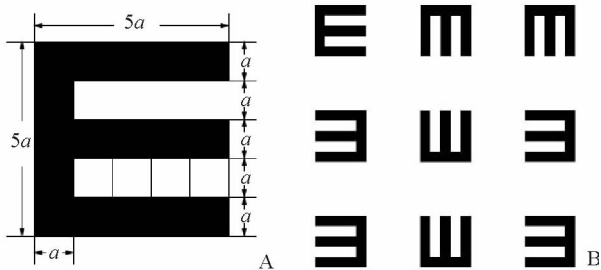


图 2 自适应视力检测法的视标(A)与刺激(B)

Fig 2 Visual object (A) and stimulation (B) of computerized tumbling E test

在软件中输入受试者的姓名、年龄等基本资料后, 由受试者独立完成整个检查过程。正式检查之前让受试者进行 15 个 trial 的练习, 以熟悉检查程序。检查过程中刺激大小的变化遵循 Staircase procedure 中“Weighted up-down method”的原则。按 F10 键开始实验, 屏幕中央出现注视点, 受试者盯着注视点, 按空格键呈现刺激, 耳机中有一个 2 000 Hz 的短提示音, 受试者观察刺激中央 E 视标的开口方向, 通过电脑键盘上相应的方向键对开口

方向做出选择。如果选择正确, 耳机内出现一个 1 000 Hz 的短提示音, 屏幕上再次出现注视点, 再次按空格键, 则下一刺激的视标尺寸会减小 0.05 个对数单位; 如果受试者选择错误, 则耳机内出现一个 500 Hz 的短提示音, 按下空格键后, 下一刺激的视标尺寸会增大 0.1 个对数单位。如果受试者不进行键盘操作, 屏幕上显示的图样不会改变。测试的全部 trial 数完成后, 软件自动记录并保存受试者的检查数据, 用最大似然法进行数据拟合, 得到每名受试者的视力 $\log \text{MAR}$ 值并将检查结果反馈在屏幕上。心理物理学测量中, 为保证测量的精确度, trial 数一般为 80~150^[11-12]。但由本研究的计算机仿真结果可以发现, 因为采用了最大似然估计, 40 个 trial 就可以获得可靠的实验估计。所以本实验中我们选择两种 trial 数(40 和 80), 以检验较短的测量时间下(trial 数为 40)能否得到可靠的测量结果(trial 数为 80)。每次视力检查结束后, 受试者休息 5 min 再进行下一次检查。

在视觉认知领域, 视觉拥挤效应是影响视力检查结果的一个重要因素, 是视觉系统物体识别的瓶颈。视觉拥挤效应是指当视野中的靶目标被周边干扰物环绕时, 原本清晰可辨的靶目标将会变得难以辨认^[13]。对普通人来说, 周边视野更容易受拥挤效应的影响, 而中央视野则基本不受影响^[14-15]。为了有效减小拥挤效应对检查结果的影响, 实验中受试者只观察刺激中心处的视标, 该视标的大小与周围 8 个视标均相等, 与上、下、左、右 4 个视标间距离均为 $5a$, 与左上、左下、右上、右下 4 个视标的斜间距离均为 $5\sqrt{2}a$ 。

本实验的视觉刺激由 MATLAB 软件心理物理工具包生成, 在由 NVIDIA Quadro K600 显卡驱动的 EIZO FlexScan T962 显示器上显示, 显示器大小为 $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。显示器分辨率设定为 $1\ 600 \times 1\ 200$, 屏幕背景亮度为 40 cd/m^2 , 视标亮度为 5 cd/m^2 , 检查距离为 5.0 m。检查结束后, 受试者的基本资料、最终检测结果及每个 trial 中受试者的反应时间、选择正误等信息均被存储到数据库中。软件自动显示检查结果(对数视力值)。

1.2.3 标准对数视力表检查过程 检查者从视力表最上面一行开始, 逐行指每一个视标, 让受试者辨认视标的开口朝向, 当某行的视标辨认错误达到

2个时,则不再辨认下一行视标,用逐行计分法记录受试者的视力值(例如:5.1行视标辨认错误为2个,则记录该受试者的视力为 $5.1 - (2/8) \times 0.1 = 5.075$)。实验所用的标准对数视力表放置于照明灯箱内,灯箱背景亮度为 985 cd/m^2 ,视标亮度为 4.69 cd/m^2 (亮度均由北京师范大学光电仪器厂生产的ST-86LA型屏幕亮度计测得),检查距离为5.0 m。检查环境与自适应视力检测法相同。

1.2.4 最大似然估计 自适应视力检测法的数据拟合用最大似然估计。行为学数据一般是一个伯努利过程,其数据呈现为二项分布,可以直接定义在观察到反应 y 下 θ 参数的似然值,似然值 $l(\theta, y)$ 在数值上和概率 $p(y|\theta)$ (即方程参数为 θ 时观察到反应 y 的概率)相等。但在处理实际数据时,数据一旦被采集,反应 y 即是固定的,而参数是变化的。对于任意的 θ ,因为对数函数是单调的,此时对数似然值也是最大的,并可由下列公式得到:

$$\sum_{i=1}^k \log \binom{n_i}{y_i n_i} + y_i n_i \log \psi(x_i; \theta) + (1 - y_i) n_i \log [1 - \psi(x_i; \theta)]$$

一般来说,可以先寻找 $l(\theta, y)$ 上令其导数为0的 θ 点(局部极值点),从这些局部极值点中找到全局最大点,从而找到估计值。本次实验采用随机逼

近方法来寻找使方程最大的 θ 。

1.3 数据记录与处理 用MATLAB软件将检查结果全部转换成以log MAR为单位进行统计分析。用SPSS 19.0软件对实验数据进行配对样本 t 检验,以衡量检查结果的相关性和差异性,并用一致性限度衡量其一致性。用散点图表示每位受试者检查结果的波动、整体波动幅度(一致性或重复性),以及波动幅度与视力水平的相关性。

2 结果

自适应视力检测法(40 trials)的检查结果为 $(-0.05 \pm 0.14) \text{ log MAR}$,标准对数视力表的检查结果为 $(-0.08 \pm 0.13) \text{ log MAR}$ 。95%受试者2种检查结果的波动为0.13个对数单位(小于视力表2行),且2种检查之间的差异不随受试者视力水平的变化而变化,见图3A。自适应视力检测法(80 trials)的检查结果为 $(-0.04 \pm 0.14) \text{ log MAR}$,与标准对数视力表检查结果相比,95%受试者2种检查结果的波动为0.30个对数单位(大于视力表2行),见图3B。95%受试者自适应视力检测法(40 trials)与自适应视力检测法(80 trials)检查结果的波动仅为0.06个对数单位(小于视力表1行),见图3C。

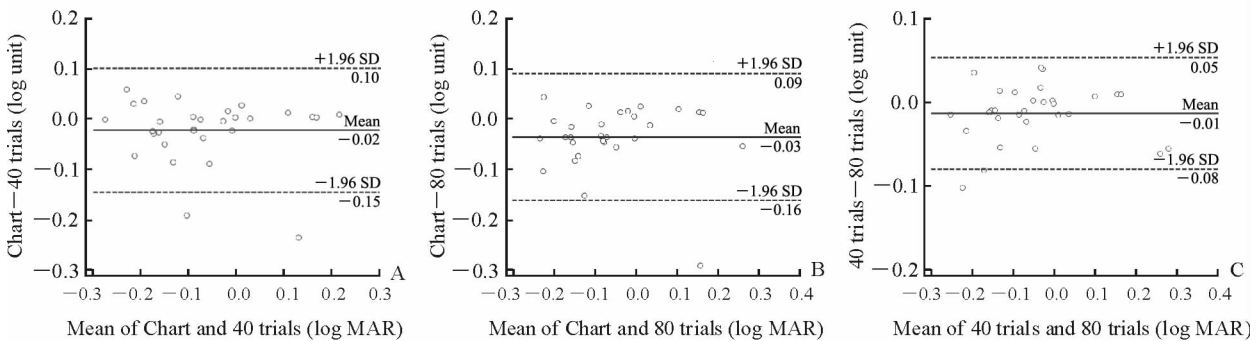


图3 测量结果的Bland-Altman散点图

Fig 3 Bland-Altman scatter plot of measurement results

A: Standard logarithmic visual acuity chart and computerized tumbling E test with 40 trials; B: Standard logarithmic visual acuity chart and computerized tumbling E test with 80 trials; C: Computerized tumbling E test results with 40 trials and 80 trials. SD: Standard deviation

分别将自适应视力检测法(40 trials)、自适应视力检测法(80 trials)及标准对数视力表的测量结果进行配对样本 t 检验,标准对数视力表测量结果和自适应视力检测法(40 trials)测量结果的差异无统计学意义 [$t(29) = -1.970, P > 0.05$];标准对数视力表测量结果和自适应视力检测法(80 trials)测量结果的差异有统计学意义 [$t(29) = -2.937,$

$P < 0.05$],自适应视力检测法(40 trials)测量结果和自适应视力检测法(80 trials)测量结果的差异无统计学意义 [$t(29) = -1.899, P > 0.05$].

3 讨论

Logistic函数是一种关于阈值点左右对称的函数形式,因其数学形式简单而被广泛应用于计算机

科学、大气科学、空间科学等领域。在应用于心理物理学函数估计时,logistic 函数表现出对数据更好的全局拟合精确度以及更强的鲁棒性,成为最常选用的心理物理学模型之一。本研究采用 logistic 函数进行仿真实验,结果表明自适应视力检测法测试的偏差在 25 个 trial 后趋于稳定;测试的标准差随着 trial 数的增加逐渐降低,30 个 trial 后的标准差趋于稳定,而且 15 个 trial 后测试的标准差即小于 0.1。根据仿真实验结果,自适应视力检测法的测量结果在 30 个 trial 后已可被接受,因此实验中设定 trial 数为 40。从测量结果的统计数据来看,40 trials 和 80 trials 测量结果的差异无统计学意义,表明该方法测量结果具有良好的稳定性。自适应视力检测法(40 trials)检查结果与标准对数视力表检查结果的差异无统计学意义,95%视功能正常的成年受试者 2 种方法之间的差异小于视力表 2 行,表明自适应视力检测法与标准对数视力表一致性良好。检查结果与已有类似研究结果^[7,16-17]相比较,得到的一致性限度值相接近。

视力检查是临床实践中对视觉功能进行完整性评价的基本工具,对于受检者而言也是一个复杂的生理和心理过程。影响检查结果的因素较多,有研究表明同一日内视力检查结果的差别达到 12%^[18]。本研究发现自适应视力检测法(80 trials)测量结果和标准对数视力表测量结果的差异有统计学意义,可能与以下因素有关:(1)屏幕亮度的影响。标准对数视力表的灯箱亮度明显比电脑屏幕亮度高,受试者辨认刺激的能力会因亮度的不同而有差异。(2)人为因素的影响。自适应视力检测法是由受试者自主完成检查结果,而标准对数视力表的检查必须要有检查者参与。(3)Trial 数的影响。如果 trial 数太少,结果不能准确反映受试者的视力水平;如果 trial 数太多,受试者眼睛需要长时间注视屏幕,容易疲劳,同样对检查结果造成影响。本研究结果显示 40 trials 用于自适应视力检测法较为合理。

自适应视力检测法和标准对数视力表相比具有以下特点:(1)刺激的设计与呈现方式与标准对数视力表不同,改善了标准对数视力表的局限性。(2)有效减小视觉拥挤效应对检查结果的影响。(3)视标的大小双向变化,根据受试者的反应按“2 up 1 down”逐渐逼近视力阈值,使得检查结果更为准

确,也与受试者的精神生理反应更为契合。(4)自动化操作,自动记录结果,不需要检查者进行指导或判断结果及记录。(5)通过程序设计,可以实现对超常视力的检查。本方法对于需要长期监测视力变化的群体来说,费用与便利性的优势更为明显,更有利于对疾病发展变化的研究。在临床应用,消除了检查者主观因素的影响,减少了技术人员的培训量,实现了检查过程和结果的标准化。结合互联网技术,可对有需要的群体进行远程视力检查,实现医疗服务的互联网化,满足人们个性化医疗的需求;配置到“胶囊诊所”中可为偏远地区的视力检查和眼病筛查带来开创性变革。

自适应视力检查法在实际应用时也存在着一一定的制约因素,例如:(1)购买计算机及辅助设备前期投入成本比标准对数视力表大;(2)刺激的呈现受显示器像素、屏幕尺寸等因素限制;(3)要求受试者具有基本的电脑操作技能,这使得本方法在部分人群中的应用受到限制。随着视频技术的发展,大屏幕、高亮度显示器的应用,尤其是互联网技术和远程技术的逐渐成熟,这些制约因素的影响将逐渐变弱。

[参考文献]

- [1] 缪天荣.《标准对数视力表》中的 5 分记录[J]. 眼视光学杂志,2005,7:217-219.
- [2] 王晨晓,王勤美.从视标增率和记录方法看视力表设计中的核心问题[J]. 眼视光学杂志,2009,11:295-296,302.
- [3] BLACK J M, JACOBS R J, PHILLIPS G, CHEN L, TAN E, TRAN A, et al. An assessment of the iPad as a testing platform for distance visual acuity in adults[J/OL]. BMJ Open, 2013, 3. pii: e002730. doi: 10.1136/bmjopen-2013-002730.
- [4] MANZANO A A, LAGAMAYO M A N. A comparison of distance visual acuity testing using a standard ETDRS chart and a tablet device[J]. Philipp J Ophthalmol, 2015, 40: 88-92.
- [5] BASTAWROUS A, RONO H K, LIVINGSTONE I A, WEISS H A, JORDAN S, KUPER H, et al. Development and validation of a smartphone-based visual acuity test (peek acuity) for clinical practice and community-based fieldwork[J]. JAMA Ophthalmol, 2015, 133: 930-937.
- [6] BAILEY I L, LOVIE-KITCHIN J E. Visual acuity

- testing. From the laboratory to the clinic[J]. *Vision Res*, 2013, 90: 2-9.
- [7] BECK R W, MOKE P S, TURPIN A H, FERRIS F L 3rd, SANGIOVANNI J P, JOHNSON C A, et al. A computerized method of visual acuity testing: adaptation of the early treatment of diabetic retinopathy study testing protocol[J]. *Am J Ophthalmol*, 2003, 135: 194-205.
- [8] WALLIS S A, BAKER D H, MEESE T S, GEORGESON M A. The slope of the psychometric function and non-stationarity of thresholds in spatiotemporal contrast vision[J]. *Vision Res*, 2013, 76: 1-10.
- [9] GARCIA-PEREZ M A. Optimal setups for forced-choice staircases with fixed step sizes[J]. *Spat Vis*, 2000, 13: 431-448.
- [10] LINSCHOTEN M R, HARVEY L O Jr, ELLER P M, JAFEK B W. Fast and accurate measurement of taste and smell thresholds using a maximum-likelihood adaptive staircase procedure[J]. *Percept Psychophys*, 2001, 63: 1330-1347.
- [11] KLEIN S A. Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: a commentary[J]. *Percept Psychophys*, 2001, 63: 1421-1455.
- [12] ZHOU Y, HUANG C, XU P, TAO L, QIU Z, LI X, et al. Perceptual learning improves contrast sensitivity and visual acuity in adults with anisometric amblyopia[J]. *Vision Res*, 2006, 46: 739-750.
- [13] WHITNEY D, LEVI D M. Visual crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition[J]. *Trends Cogn Sci*, 2011, 15: 160-168.
- [14] LEVI D M. Crowding—an essential bottleneck for object recognition: a mini-review [J]. *Vision Res*, 2008, 48: 635-654.
- [15] YEHEZKEL O, STERKIN A, LEV M, POLAT U. Crowding is proportional to visual acuity in young and aging eyes[J/OL]. *J Vis*, 2015, 15: 23. doi: 10.1167/15.8.23.
- [16] MCGRAW P V, WINN B, GRAY L S, ELLIOTT D B. Improving the reliability of visual acuity measures in young children[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2000, 20: 173-184.
- [17] MOKE P S, TURPIN A H, BECK R W, HOLMES J M, REPKA M X, BIRCH E E, et al. Computerized method of visual acuity testing: adaptation of the amblyopia treatment study visual acuity testing protocol[J]. *Am J Ophthalmol*, 2001, 132: 903-909.
- [18] LOUMANN KNUDSEN L. Visual acuity testing in diabetic subjects: the decimal progression chart versus the Freiburg visual acuity test[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2003, 241: 615-618.

[本文编辑] 孙岩