肌电生物反馈治疗不同程度尺神经损伤疗效研究

李贝贝¹, 徐义明², 李力行³, 白跃宏^{2*}

1 同济大学附属东方医院, 上海 200120;

2 上海交通大学附属第六人民医院, 上海 200233;

3 上海市第八人民医院, 上海 200235

* 通信作者: 白跃宏, E-mail: aibyh@126.com

收稿日期: 2019-09-11; 接受日期: 2019-12-20

基金项目: 上海市卫生计生系统重要薄弱学科建设计划(2015ZB0403)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2020.03006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

摘要 目的:通过对肌电生物反馈治疗不同程度尺神经损伤的疗效进行评价,探讨尺神经损伤程度分级与肌电生物反馈治疗之间的相关性。**方法:**将 96 例不同程度尺神经损伤患者按 McGowan 分级法分为 1、2、3 级各 32 例,并采用分层随机化分组法分为对照组和治疗组各 48 例。对照组给予药物、运动疗法和激光治疗,治疗组在此基础上加肌电生物反馈治疗,每次 15 min,每日 1 次,共治疗 8 周。治疗后再次进行 McGowan 分级并对数据分析以评定疗效。**结果:**治疗 8 周后,与治疗前的症状相比,2 组 McGowan 1 级提高率均为 75.00%,分级情况均有改善($P < 0.05$);对照组 McGowan 2 级提高率为 18.75%,分级情况改善不明显($P > 0.05$),而治疗组 McGowan 2 级提高率为 75.00%,分级情况改善具有统计学意义($P < 0.05$);对照组 McGowan 3 级提高率为 6.25%,而治疗组 McGowan 3 级提高率为 12.50%,2 组分级情况改善均不明显($P > 0.05$)。**结论:**肌电生物反馈对尺神经损伤 McGowan 1 级患者治疗作用不突出;对 McGowan 2 级患者具有显著的治疗作用,联合治疗效果明显优于单纯传统治疗;而对 McGowan 3 级患者疗效不佳。

关键词 尺神经损伤; McGowan 分级; 肌电生物反馈; 损伤程度; 相关性

尺神经损伤是临床最常见的周围神经损伤之一,损伤部位多位于腕部、肘部及前臂近段^[1],致病原因多为锐器伤、挤压伤、局部缺血、牵拉伤以及电击伤等^[2]。临床上治疗尺神经损伤的方法较多,肌电生物反馈疗法因其治疗简单、疗效可靠、易被患者接受^[3]等特点受到康复医师的青睐。然而,目前虽有较多生物反馈治疗尺神经损伤方面的研究,但却鲜有关于损伤程度的思考。基于此,本研究对尺神经损伤程度分级与生物反馈治疗之间的相关性进行探讨,现报道如下。

1 临床资料

共收集 2016 年 1—12 月于上海市第六人民医院就诊的 96 例尺神经损伤患者,排除糖尿病、尿毒症、药物中毒原因导致。将受损尺神经按 McGowan 分级法^[4]分为 McGowan 1 级 32 例,2 级 32 例,3 级

32 例;其中男 52 例,女 44 例;年龄 18~60 岁;病程 30~75 d;致伤原因包括骨折移位 42 例,内植物压迫 20 例,局部组织卡压 34 例;左侧 42 例,右侧 54 例。采用分层随机化分组法将每一级研究对象随机分对照组和治疗组各 48 例,对照组中 McGowan 1 级 16 例,2 级 16 例,3 级 16 例;男 28 例,女 20 例;平均年龄(44.13 ± 9.13)岁;平均病程(46.08 ± 14.18)d。治疗组中 McGowan 1 级 16 例,2 级 16 例,3 级 16 例;男 24 例,女 24 例;平均年龄(43.54 ± 13.02)岁;平均病程(48.17 ± 13.46)d。2 组在性别、年龄、病程、损伤分级方面差异无统计学意义($P > 0.05$)。

2 方法

2.1 治疗方法

2.1.1 对照组 采用药物、运动疗法、激光联合治疗。①口服药物治疗:甲钴胺片,每次 0.5 mg,每日

引用格式:李贝贝,徐义明,李力行,等. 肌电生物反馈治疗不同程度尺神经损伤疗效研究[J]. 康复学报,2020,30(3):197-201.

LI B B, XU Y M, LI L X, et al. Effect of electromyographic biofeedback therapy on ulnar nerve injury in different degrees [J]. Rehabilitation Medicine, 2020, 30(3): 197-201.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2020.03006

3 次;维生素 B₁ 片,每次 10 mg,每日 3 次;维生素 B₆ 片,每次 10 mg,每日 2 次。② 运动疗法:肩、肘、腕、指关节的全关节活动范围主、被动活动和渐进性抗阻肌力训练,每次治疗 30 min,每日 1 次。③ 激光治疗:半导体激光治疗仪 810 nm 激光损伤处照射,剂量 6×200 mW,每次治疗 10 min,每日 1 次。以上治疗持续 8 周。

2.1.2 治疗组 在对照组基础上加肌电生物反馈治疗。患者取坐位,采用 SA9800 型生物刺激反馈仪(南京伟思医疗科技股份有限公司),将 2 片电极片置于受累肌肉的肌腹处。选择表面肌电触发电刺激下的“激励”模式及“机器自动设定阈值”模式,该模式下机器会将治疗中前 3 次测定并计算的平均肌电值设为该次治疗的阈值并显示于屏幕。治疗开始后当患者主动收缩受累肌肉达到阈值时治疗仪屏幕会显示达到目标,并发出“嘀、嘀”声反馈给患者,随后触发 1 次正反馈电刺激,此为 1 个循环。每个循环治疗时间 10 s,休息时间 10 s,不断反复。每次

治疗 15 min,每日 1 次,治疗持续 8 周。

2.2 评定方法

在治疗前、后采用 McGowan 分级法对受损尺神经进行分级^[4],所有评定均由同一医师完成。① 1 级:仅有单纯的主观症状和感觉减退,无可检测到手固有肌无力;② 2 级:感觉缺失和手固有肌无力,伴或不伴轻度肌肉萎缩;③ 3 级:严重的感觉运动功能障碍,伴一个或多个尺神经支配的手固有肌完全无力。

2.3 统计学方法

采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析。计量资料服从正态分布以($\bar{x} \pm s$)表示,采用独立样本 *t* 检验,计数资料比较采用 χ^2 检验,总疗效比较采用 Wilcoxon 秩和检验,每级治疗前后组间比较采用符号秩和检验。*P* < 0.05 为差异有统计学意义。

3 结 果

3.1 2 组总疗效比较

见表 1。

表 1 2 组总疗效比较

Table 1 Comparison of total efficacy between two groups

组 别	<i>n</i>	McGowan 3 级	McGowan 2 级	McGowan 1 级	正常	<i>Z</i> 值	<i>P</i> 值
对照组	48	15	14	7	12	-0.826	0.409
治疗组	48	14	6	16	12		

3.2 2 组 McGowan 1 级患者治疗前后分级情况比较

见表 2。

表 2 2 组 McGowan 1 级患者治疗前后分级情况比较

Table 2 Comparison of McGowan 1 before and after treatment between two groups

组 别	<i>n</i>	时间	McGowan 1 级	正常	提高率/% ¹⁾	<i>Z</i> 值	<i>P</i> 值	χ^2 值	<i>P</i> 值
对照组	48	治疗前	16	0	—	-3.464	0.001	0.000	1.000
		治疗后	4	12	75.00				
治疗组	48	治疗前	16	0	—	-3.464	0.001		
		治疗后	4	12	75.00				

注:1) 提高率为 McGowan 分级情况向上一级变化,即症状好转的患者所占比率。
Note: 1) Increase rate refers to McGowan grading being better, or proportion of patients whose symptom turn better.

3.3 2 组 McGowan 2 级患者治疗前后分级情况比较

见表 3。

表 3 2 组 McGowan 2 级患者治疗前后分级情况比较

Table 3 Comparison of McGowan 2 before and after treatment between two groups

组 别	<i>n</i>	时间	McGowan 2 级	McGowan 1 级	提高率/% ¹⁾	<i>Z</i> 值	<i>P</i> 值	χ^2 值	<i>P</i> 值
对照组	48	治疗前	16	0	—	-1.731	0.083	10.165	0.001
		治疗后	13	3	18.75				
治疗组	48	治疗前	16	0	—	-3.464	0.001		
		治疗后	4	12	75.00				

注:1) 提高率为 McGowan 分级情况向上一级变化,即症状好转的患者所占比率。
Note: 1) Increase rate refers to McGowan grading being better, or proportion of patients whose symptom turn better.

3.4 2组 McGowan 3 级患者治疗前后分级情况比较

见表 4。

表 4 2 组 McGowan 3 级患者治疗前后分级情况比较
Table 4 Comparison of McGowan 3 before and after treatment between two groups

组 别	n	时间	McGowan 3 级	McGowan 2 级	提高率/% ¹⁾	Z 值	P 值	χ ² 值	P 值
对照组	48	治疗前	16	0	—	-1.000	0.317	0.368	0.544
		治疗后	15	1	6.25				
治疗组	48	治疗前	16	0	—	-1.414	0.157		
		治疗后	14	2	12.50				

注:1)提高率为 McGowan 分级情况向上一级变化,即症状好转的患者所占比率。
Note: 1) Increase rate refers to McGowan grading being better, or proportion of patients whose symptom turn better.

3.5 2 组 McGowan 分级提高率比较

见表 5 和表 6。

表 5 对照组 McGowan 3 级与 McGowan 1 级、
McGowan 2 级提高率比较

Table 5 Comparison between increase rate of
McGowan 1, McGowan 2 and McGowan 3
in the control group

项 目	未提高	提高	提高率	χ ² 值	P 值
McGowan 3 级	15	1	6.25%	1.143 ¹⁾	0.285 ¹⁾
McGowan 2 级	13	3	18.75%		
McGowan 1 级	4	12	75.00%		

注:1)与 McGowan 3 级比较。
Note: 1) Compared with McGowan 3.

表 6 治疗组 McGowan 3 级与 McGowan 1 级、
McGowan 2 级提高率比较

Table 6 Comparison between increase rate of
McGowan 1, McGowan 2 and McGowan 3
in the treatment group

项 目	未提高	提高	提高率	χ ² 值	P 值
McGowan 3 级	14	2	12.50%	12.698 ¹⁾	0.000 ¹⁾
McGowan 2 级	4	12	75.00%		
McGowan 1 级	4	12	75.00%		

注:1)与 McGowan 3 级比较。
Note: 1) Compared with McGowan 3.

4 讨 论

尺神经损伤程度不同,对治疗的反应也存在较大差异。在对不同损伤程度的尺神经恢复情况进行分析之前,首先要了解受损周围神经的再生过程。周围神经损伤后,存活的胞体会出现与损伤-再生相关的一系列变化,包括胞体的肿胀,细胞核由中心偏移至周边,尼氏体缩小至消失,神经元细胞的树突突触末梢减少等^[5]。损伤处的神经纤维则发生崩解,与胞体连接的近侧端神经纤维发生逆行性溃

变,由断裂处向神经元胞体方向进行,一般到邻近断端的第一个侧支处/或第一个郎飞结终止,而远侧端神经纤维则发生华勒变性而导致全长溃变。然后,近端胞体轴突会重新生成生长锥,其表面的特异性受体能够从外界环境刺激中识别出特定的导向信号,信号经过转导从而介导其自身的一系列反应,指导轴突生长。但是该生长过程的进行情况要取决于损伤的性质与程度,其中神经内膜管的状况起关键作用,Schwann 细胞提供的修复微环境也至关重要^[6]。

McGowan 1 级患者仅有单纯的主观症状和感觉减退,对应周围神经损伤 Sunderland 5 度分级法^[7],考虑其为 1~2 度损伤,该类损伤神经内膜管未受影响,能够保证神经轴突生长通道的完整性,使再生轴突较快通过损伤处,避免其相互之间的交错;另一方面,McGowan 1 级患者多为轻度的神经局部受压,是因神经微血管受压闭合造成局部缺血缺氧而导致快速的、可逆性的局部代谢、引流受阻^[8]。当受压因素去除,局部缺血缺氧状况改善,并给予适当治疗促进神经轴突再生,神经功能即可基本恢复。本次研究结果表明,对于 McGowan 1 级患者而言,2 组的治疗提高率均为 75.00%,提示肌电生物反馈对该类患者并不存在显著的补充治疗作用。其可能的原因:① 甲钴胺对损伤神经具有较好的营养作用,可以加快损伤轴突的生长速度^[9];激光治疗可以防止神经损伤处疤痕形成,减轻神经变性,并能通过多种分子生物学机制来促进神经元轴突的萌芽及断端轴突生长^[10]。以上两者结合对于 McGowan 1 级神经轴突的再生已有较强的促进作用,加用肌电生物反馈治疗并不能很好地发挥其补充治疗作用。② 肌电生物反馈能够加速 McGowan 1 级患者损伤的恢复,但本研究并未在治疗过程中选取多个时间点进行评定,故未能记录到其加速 McGowan 1 级损伤恢复的整体过程,而治疗 8 周后,2 组的损伤神经都已有了显著的恢复,故最终的比较并无显著差异。

McGowan 2 级患者有感觉缺失和手固有肌无力,伴或不伴轻度肌肉萎缩,可推测该类损伤涉及感觉与运动 2 种神经纤维,而损伤后的再生神经轴突多表现为无目标生长,只有部分轴突能够穿过损伤处与远侧端正确连接,大多数都是无目标生长并逐渐消失^[8];另一方面,该类患者出现肌肉去神经支配现象,并且神经周围炎症反应一般也较 McGowan 1 级严重。因此,对于该类损伤,治疗中除了需要促进神经轴突生长外,还需引导再生轴突的正确生长方向,并控制、延缓肌肉萎缩。对照组的治疗措施中,激光除了可以促进轴突生长外,并无另外 2 点作用;甲钴胺虽能促进周围神经损伤后运动终板的修复,延缓骨骼肌萎缩^[11],但其单独作用,效果有限;运动疗法是以患者主动参与为主的治疗方法,同时在被动运动时,可给受累关节一定的压力,在促进神经、肌肉功能恢复及局部血液循环方面具有重要的作用^[12],但对引导轴突正确生长方向无显著效果。而肌电生物反馈的电刺激作用可以加速神经营养因子及其受体以及施万细胞的合成,并增加它们的数量^[13],施万细胞可以分泌诱导轴索生长与定向的趋化性营养物质基膜素和纤维连结素,调控轴突的再生和髓鞘形成^[14],也就是说肌电生物反馈可以间接促进轴突的生长与定向趋化。除此之外,对于治疗周围神经损伤而言,肌电生物反馈还有诸多优势。顾文钦等^[15]认为,肌电生物反馈治疗通过反复肌电刺激可兴奋细胞(如神经、肌肉)的去极化和复极化过程,不仅有抗炎消肿、改善循环的作用,还可促进中枢神经系统内源性类吗啡样物质释放,后者有加强肌肉张力的作用,刺激可使兴奋和不可兴奋细胞中产生细胞内分子和离子振荡,并形成持续去极化状态,均有促进神经肌肉功能恢复的作用。马彩云等^[16]研究表明,肌电生物反馈治疗可以促进运动神经轴突与肌肉连接的重新建立并增加其数量,具有加速神经功能恢复的作用,可使患者肌张力提高,肌力增强。生物刺激反馈仪通过易化快速收缩运动单位以增强肌力,防止肌肉失用性萎缩外,肌电刺激可以改善神经血供,促进轴突再生,使神经轴突平均密度增大,新生血管数量增多^[17-18]。本研究结果表明:对照组 McGowan 2 级患者症状改善不明显,而治疗组 McGowan 2 级患者症状有所改善。一方面可能与肌电生物反馈能够通过促进神经轴突生长、定向趋化及控制、延缓肌肉萎缩 3 个方面来促进损伤神经再生有关;另一方面可能由于传统的药物、运动疗法、激光治疗对于 McGowan 2 级损伤的治疗效果下降明显,远不像治疗 McGowan 1 级损伤一样疗效显著,从而突出了肌电生物反馈对 Mc-

Gowan 2 级患者的疗效。本研究另一统计学结果显示,对照组 McGowan 2 级患者治疗提高率与 McGowan 3 级患者比较差异无统计学意义($P>0.05$),而治疗组 McGowan 2 级患者治疗提高率明显高于 McGowan 3 级患者,也侧面说明了肌电生物反馈对 McGowan 2 级患者具有显著治疗作用。

McGowan 3 级患者有严重的感觉运动功能障碍,伴一个或多个尺神经支配的手固有肌完全无力,该类患者多为神经内膜、神经束膜乃至神经干及神经外膜的损伤、断裂,局部的炎症反应往往非常强烈,瘢痕形成也较为明显。而过多的瘢痕组织会妨碍轴突的出芽,误导再生轴突长入功能不相关的神经内膜,并影响再生神经纤维的成熟,而且如果再生的轴突进入功能不相关的神经内膜管,即使能够到达靶器官也不会进一步成熟和发生髓鞘再生,而是最终被纤维结缔组织取代^[19]。另一方面,该类损伤多伴有周围组织,尤其是血管等的严重损伤。而缺血除了增加神经损伤后的修复与治疗难度外,还会导致肢体血流量降低而造成局部坏死物质增加,加重缺血再灌注损伤,延缓神经再生,降低神经功能恢复率^[20]。与此同时,失神经支配的肌肉蛋白质降解加速,乙酰胆碱受体和肌酸激酶减少,肌肉功能也发生明显降低,包括肌肉质量减少和形态学及物理特点的巨大变化。而再生神经长期不能到达萎缩的肌纤维以建立成熟的神经-肌肉连接,导致肌肉功能不断降低^[21]。如此便形成一个恶性循环。此类损伤大多需要手术缝合重建神经、血管连续性,并修复周围损伤组织才能促进功能恢复,而保守治疗,无论是传统药物、激光、运动疗法,还是肌电生物反馈均无明显疗效,本研所得结果也验证了这一点。

本研究在设计 and 实施过程中存在几处不足:

① 因时间限制,入组研究对象数量不足;② 未在治疗过程中选取多个时间点对患者进行评定,故未能记录到肌电生物反馈促进各级尺神经损伤恢复的整体趋势;③ 治疗周期仅为 8 周,治疗的远期疗效尚待进一步验证。

5 结 论

本研究在以往研究的基础上,探讨肌电生物反馈结合常规药物、运动疗法和激光治疗尺神经损伤的治疗效果。结果表明肌电生物反馈对尺神经损伤 McGowan 1 级患者治疗作用不突出;对 McGowan 2 级患者具有显著治疗作用,联合治疗效果明显优于单纯传统治疗;而对 McGowan 3 级患者疗效不佳。尤其推荐肌电生物反馈联合传统治疗用于治疗 McGowan 2 级尺神经损伤患者。

参考文献

- [1] 王斌,李康华,邵新中,等. 骨间前神经旋前方肌支移位在高位尺神经损伤中的应用[J]. 中华手外科杂志,2007,23(3):153-154.
- [2] SIEMIONOW M,BRZEZICKI G. Chapter 8:Current techniques and concepts in peripheral nerve repair [J]. Int Rev Neurobiol,2009,87:141-172.
- [3] 施少云,卢惠苹,宋林,等. 肌电生物反馈治疗臂丛神经损伤的临床研究[J]. 世界复合医学,2015,1(1):58-62.
- [4] MCGOWAN A J. The results of transposition of the ulnar nerve for traumatic ulnar neuritis [J]. J Bone Joint Surg Br,1950,32-B(3):293-301.
- [5] LIEBERMAN A R. The axon reaction;a review of the principal features of perikaryal responses to axon injury [J]. Int Rev Neurobiol,1971,14:49-124.
- [6] MADDURI S. Schwann cell delivery of neurotrophic factors for peripheral nerve regeneration [J]. J Peripher Nerv Syst,2010,15(2):93-103.
- [7] SUNDERLAND S. Rate of regeneration I:sensory nerve fiber and II: motorfiber [J]. Arch Neu Psyc,1947,58:1-14.
- [8] 何旭,张元信,屈志刚,等. 周围神经损伤与再生的研究进展[J]. 山西医药杂志,2013,42(8):397-400.
- [9] 王东强,郭义,李志军,等. 甲钴胺促进周围神经再生的实验研究[J]. 天津医药,2010,38(3):223-225.
- [10] WOLLMAN Y,ROCHKIND S. In vitro cellular processes sprouting in cortex microexplants of adult rat brains induced by low power laser irradiation [J]. Neurol Res,1998,20(5):470-472.
- [11] 温瑞. 甲钴胺对周围神经损伤后运动终板再生修复的影响[D]. 郑州:河南大学,2010:1-10.
- [12] 刘敏,李嵩,刘春辉,等. 肌电生物反馈和运动疗法治疗桡神经损伤的效果[J]. 中国康复理论与实践,2013,19(2):167-169.
- [13] MICHAEL P,MAY A N,GREGORY H,et al. Electrical stimulation to promote peripheral nerve regeneration [J]. Neurorehabil Neural Repair,2016,30(5):490-496.
- [14] 李继峰,艾珣,胡韶楠,等. 神经再生室中神经修复过程的超微结构研究[J]. 中华手外科杂志,2001,17(1):59-60.
- [15] 顾文钦,陆立威,杨海玲,等. 肌电生物反馈技术在脑卒中偏瘫患者社区康复中的疗效研究[J]. 中国全科医学,2011,14(6B):1886-1889.
- [16] 马彩云,尚清. 肌电生物反馈治疗婴儿臂丛神经损伤的疗效[J]. 中华实用儿科临床杂志,2010,25(16):1282-1283.
- [17] 田野,胡可慧,杨欢,等. 呼吸肌训练联合肌电生物反馈训练对脑卒中后吞咽功能及吸入性肺炎的影响[J]. 康复学报,2018,28(1):41-44.
- [18] CHEN Y S,HU C L,HSIEH C L,et al. Effects of percutaneous electrical stimulation on peripheral nerve regeneration using silicone rubber chambers [J]. J Biomed Mater Res,2001,57(4):541-549.
- [19] DE RUITER G C,SPINNER R J,VERHAAGEN J,et al. Misdirection and guidance of regenerating axons after experimental nerve injury and repair [J]. J Neurosurg,2014,120(2):493-501.
- [20] RENAULT M A,CHAPOULY C,YAO Q,et al. Desert hedgehog promotes ischemia-induced angiogenesis by ensuring peripheral nerves survival [J]. Circ Res,2013,112(5):762-770.
- [21] SHIMON R,ASHER S. Muscle response to complete peripheral nerve injury:Changes of acetylcholine receptor and creatine kinase activity over time [J]. J Reconstr Microsurg,2017,33(5):352-357.

Effect of Electromyographic Biofeedback Therapy on Ulnar Nerve Injury in Different Degrees

LI Beibei¹, XU Yiming², LI Lixing³, BAI Yuehong^{2*}

¹ Shanghai East Hospital Affiliated to Tongji University, Shanghai 200120, China;

² Shanghai Jiao Tong University Affiliated Sixth People's Hospital, Shanghai 200233, China;

³ Shanghai Eighth People's Hospital, Shanghai 200235, China

* Correspondence: BAI Yuehong, E-mail: aibyh@126.com

ABSTRACT Objective: To evaluate the effect of electromyographic biofeedback treatment on ulnar nerve injury in different degrees, and explore the correlation between ulnar nerve injury classification and electromyographic biofeedback therapy. **Methods:** A total of 96 patients with different degrees of ulnar nerve injury were divided into grade 1, 2, 3 (a=b=c=32) according to the McGowan classification, then they were randomly divided into control group (n=48) and treatment group (n=48). The control group was treated with medicine, kinesiotherapy and laser physiotherapy, while the treatment group received electromyographic biofeedback therapy in addition, 15 minutes per time, once a day, treated lasted for 8 weeks. The ulnar nerve function was regraded and analyzed to evaluate the effect after treatment. **Results:** After 8 weeks' treatment, patients of McGowan grade 1 in both groups were improved ($P<0.05$), and the improvement rate both were 75.00%. Patients of McGowan grade 2 had little improvement in the control group ($P>0.05$), and the improvement rate was 18.75%, while an obvious improvement in the treatment group ($P<0.05$), and the improvement rate was 75.00%. Patients of McGowan grade 3 in both groups had little improvement ($P>0.05$), and the improvement rate of the control group and the treatment group was 6.25% and 12.50% respectively. **Conclusion:** Electromyographic biofeedback therapy is not effective in treating ulnar nerve in McGowan grade 1, highly effective in McGowan grade 2, and combined treatment is significantly better than traditional therapy alone; but it is not effective in McGowan grade 3.

KEY WORDS ulnar nerve injury; McGowan classification; electromyographic biofeedback; degree of injury; correlation

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2020.03006