

〈制导与对抗〉

基于陆海交界地区特征的红外烟幕干扰性能研究

肖凯涛¹, 宋伟伟¹, 何友金², 王献¹, 王绪宏¹

(1.防化研究院, 北京 102205; 2.海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 讨论了陆海交界地区气象特点, 阐释了红外烟幕干扰原理, 通过开展陆海交界地区红外烟幕干扰野外测试试验, 探讨了陆海交界地区大气稳定度变化规律及红外烟幕干扰性能, 为在陆海交界地区战术使用烟幕提供技术支持。

关键词: 陆海交界地区; 红外烟幕; 干扰性能

中图分类号: TN976 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2012)12-0113-06

Study on Countermeasure Performance of Anti-infrared Smoke Screen Based on the Meteorological Characteristics at the Boundary of Land and Sea

XIAO Kai-tao¹, SONG Wei-wei¹, HE You-jin², WANG Xian¹, WANG Xu-hong¹

(1. Research Institution of Chemical Defense, Beijing 102205, China;

2. Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The paper describes meteorological characteristics at the boundary of land and sea, and introduces the jamming principle of anti-infrared smoke screen. According to the results of tests in the open air, it analysis the law of atmosphere stability and countermeasure performance of anti-infrared smoke screen. It provides technical support for the use of smoke at the boundary of land and sea.

Key words: the boundary of land and sea, infrared smoke screen, countermeasure performance

0 前言

红外侦察和制导装备迅速发展, 对于固定目标或低速目标, 只要被发现就意味着要被摧毁, 如何有效对抗红外探测与制导装备是一个紧迫的研究课题。由于陆海交界地区和陆地动力学特性和热力学特征的不同, 相对于陆地, 陆海交界地区红外烟幕干扰效果更好。陆海交界地区往往是核电站、大型工业企业等重要目标密集的地区, 也是敌方精确制导武器打击的重点。因此研究陆海交界地区大气稳定度变化规律及红外烟幕干扰性能, 对科学使用烟幕、发挥烟幕战术保障效能提供技术支撑, 有重要军事应用前景和现实意义。

1 陆海交界地区气象特点

陆海交界地区的海面和陆面在动力学特性和热力学特征方面存在明显差异, 从而引起了水陆温差

及气压梯度造成的离岸流、向岸流、顺岸流等较大尺度气流形式, 使得该地区形成了不同于平坦开阔地的特殊大气现象, 如海陆风环流和热力内边界层(TIBL)结构等, 支配并确定了气溶胶在大气中的输送与扩散特征^[1]。

1.1 局地海陆风环流

局地海陆风环流是陆海交界地区的特殊大气现象之一, 由下垫面条件热力诱发。它是以日为周期的中小尺度过程, 日间在晴朗、小风、日照强的情况下, 陆地气温高于水面气温, 温度差别形成向岸的压力梯度, 近地面为自海上向陆地的海风, 而上层则有自陆地向海上的陆向气流; 夜间相反, 近地面为自陆地向海上的陆风, 而上层则有自海上向陆地的海向气流。无论海风环流还是陆风环流, 垂直方向上都存在明显的风向切变现象。在海面和陆地上空一定范围内分别存在上升气流区和下沉气流区, 从而构成一种局地环流即海陆风环流。

海风的建立通常伴随明显的风速增大，气温降低和湿度上升，而陆风通常发生于夜间，比海风弱且浅薄，向水面输送后到日出后回岸上。

1.2 陆海交界地区边界层结构

陆海交界地区边界层结构的主要特点是，由稳定的向岸流（包括向岸梯度流和局地海风向岸流）形成陆海交界地区气层分区结构并形成陆上热力内边界层。反之，离岸流情况下亦会在水面上形成热力内边界层。热力内边界层实质上就是对流边界层。夏季，白天陆地温度比水温高得多，当气流从水面吹向陆地的时候，低层的空气很快增温，温度层结自下向上转向超绝热状态，形成热力内边界层。热力内边界层在海岸附近开始形成，在空气向内陆运动的过程中，受地面加温变热和热传导的影响热力内边界层逐渐增厚。因此，热力内边界层顶向内陆逐渐增高。热力内边界层内的空气受地面加热而改变其流动性态，它的温度层结和未受地面影响的上层空气不同。如果原先水面上的层结是稳定的，热力内边界层以上的气流仍维持稳定状态，并保持水面气层的低湍流特性。热力内边界层内的层结则是不稳定的，加上陆地比水面粗糙，故这一层内的湍流交换大为加强。此时，热力内边界层内外气层的特性截然不同。

2 红外烟幕干扰原理

红外烟幕是由许多固体的和液体的微粒悬浮于大气中所形成的烟幕体系。当目标发出的红外辐射入射到烟幕中时，烟幕对其产生吸收和散射，使得入射辐射在原传播方向上的能量减少。理论研究和实验结果表明，烟幕对红外的消光作用是烟幕微粒对红外吸收和散射共同作用的结果^[2-3]，如图1。

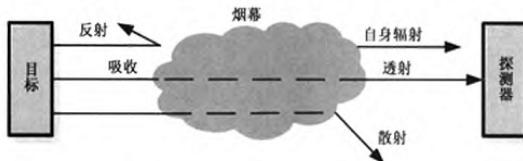


图1 烟幕对红外消光原理示意图

Fig.1 Infrared extinction principle of smoke screen

烟幕由于构成的物质不同，粒子的形状不同，粒子按质量（粒数）的分布不同，其在自然环境下对红外辐射产生的吸收、散射和折射性能不同。对红外辐射的消光能力也不同。所以各种烟幕对红外成像探测与跟踪装备具有不同的遮蔽或干扰效果^[3-4]。

如果红外辐射的强度为 $I(\lambda)$ ，则红外辐射通过

厚度为 dy 的烟幕后便会产生 $dI(\lambda)$ 大小的变化：

$$dI(\lambda) = -I(\lambda)\sigma_e(\lambda, y)dy \quad (1)$$

式中： $\sigma_e(\lambda, y)$ 为介质的线性消光系数。则有：

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\int_{y_1}^{y_2} \sigma_e(\lambda, y) dy] \quad (2)$$

红外辐射被烟幕吸收时的 σ_e 与烟幕浓度 c 成正比，这个比值被称为质量消光系数 α_e 。线性消光系数的增加与烟幕浓度的提高成一定比例。对于单个球形粒子：

$$\alpha_e = G \cdot Q_e / \rho \cdot V \quad (3)$$

对于粒数为 N 的单分散烟幕：

$$\alpha_e = N A_p Q_e = N \pi d_i^2 / 4 = N \pi r^2 Q_e \quad (4)$$

式中： A_p 为粒子的截面，假设它为球形，以 d 表示其直径； Q_e 为米散射因子（几何截面除以电磁消光截面）； G 为粒子的几何截面积； ρ 为质量密度； V 为粒子的体积。

3 试验方法

3.1 布局设置

红外热像仪架设位置：一台热像仪主光轴与烟道（烟流轴线）垂直，架设点与烟道距离 80 m，主光轴与烟道交点距离发烟点 13 m，热像仪架设高度 1.5 m，亦可架设在卡车上，卡车上配发电机，稳压电源。为测试烟幕红外干扰长度，另一套热像仪和靶标架设位置根据试验时施放源强和施放方式的变化，灵活调整。

数码摄像机架设位置：一台摄像机与烟道垂直，距离烟道 200 m，主光轴与烟道交点距离发烟点 100 m，另两台主光轴与烟道平行，与烟道距离各 15 m，两点连线与发烟点垂直距离 40 m，架设高度 1.5 m。标示杆分别立于数码摄像机正前方约 20 m 处。

气象观测点位置：综合气象观测系统架设在发烟点上风方向 50 m 处，两个常规气象观测点分别位于烟道的两个侧面，距离烟道 50 m。

气溶胶采样点位置：10 台采样器分列在红外热像仪主光轴方向，与烟道垂直，间隔 3 m。具体布设如图 2 所示。

3.2 气象观测

试验架设一套综合气象观测系统和两个常规气象观测点。综合气象观测系统架设在施放点上风方向 50 m 处，分 0.5 m、1 m、2 m、4 m 共 4 层，每层均可测试风速、风向和温度，在 4 m 层可测气压和湿度；两个常规气象观测点分别位于烟流的两个侧面，距离烟流中轴线 50 m，高度 2 m，主要是测量

试验场区内的风速、风向及温度的变化。试验地点在附近多处设有气象站，可以对天气气象进行全天候监测，为了了解大范围内的气象情况，记录了当

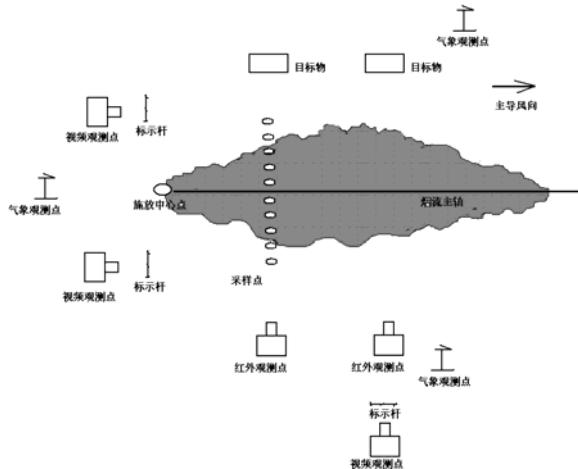


图2 场地布设示意图

Fig.2 Site layout for test

地气象站的气象观测数据。

3.3 红外干扰效果测试

红外热像仪架设点与烟流轴心线垂直距离100 m，主光轴与主导风向垂直，其交点距离发烟点50 m，目标设置在主光轴的延长线上，与测试点相距400 m，每次试验前热像仪录制目标，点火施放后热像仪连续录制烟幕对目标的红外干扰情况，直到烟幕消失。为了估算出红外烟幕的颗粒浓度、线积分浓度与红外干扰效果之间的定量关系，本试验还进行了气溶胶浓度采样，采样器布置在红外热像仪测试光路的地面上，设置10台采样器，每台间距3 m，平均分布在烟流轴线两侧，根据现场烟流传播速度确定采样器开启时间，每次采样1 min，通过对采样膜进行称重，并与采样前的膜重相比，得出重量差即为采样的样品重。

3.4 数据处理方法

1) 大气稳定度计算

大气稳定度的判别采用稳定度比值 S_R 判别法和莱赫脱曼判别法。

稳定度比值 S_R 判别法计算公式^[2]:

$$S_R = \frac{\bar{T}_4 - \bar{T}_{0.5}}{\bar{V}_2^2} \quad (5)$$

式中： S_R 为大气垂直稳定度判据； \bar{T}_4 为4 m高处平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ； $\bar{T}_{0.5}$ 为0.5 m高处平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ； \bar{V}_2 为2 m高处平均风速，m/s。 $S_R > 0.02$ 为稳定； $-0.02 \leq S_R \leq 0.02$ 为等温； $S_R < -0.02$ 为对流。

莱赫脱曼判别法计算公式：

$$n = 1 + \frac{T(2) - T(0.5)}{\bar{u}_1^2} \quad (6)$$

式中： $T(2) - T(0.5)$ 为2 m高处与0.5 m高处的温度差气温， $^{\circ}\text{C}$ ； \bar{u}_1^2 为1 m高处平均风速，m/s。当 $n > 1.05$ ，大气处于稳定状态；当 $n < 0.95$ ，大气处于不稳定状态； $0.95 \leq n \leq 1.05$ ，大气处于中性平衡状态。

2) 干扰烟幕透过率计算^[5-7]

$$T = \frac{L_3 - L_4}{L_1 - L_2} \times 100\% \quad (7)$$

式中： T 为某时刻干扰烟幕的透过率，%； L_1 为烟幕施放前目标的辐射信号值； L_2 为烟幕施放前背景的辐射信号值； L_3 为烟幕施放后目标的辐射信号值； L_4 为烟幕施放后背景的辐射信号值。

4 试验实施

4.1 场地环境

试验区域位于渤海沿岸某岛西南侧一片海陆交界区域上，面积 $1000 \times 500 = 500000 \text{ m}^2$ ，地势开阔平坦，无明显沟坎，植被不高于10 cm，西南侧是大海，东北侧为丘陵。试验现场见图3。

4.2 测试装备及测试仪器

测试装备：某红外烟幕施放装置（装填烟剂为10 kg）；

测试仪器：3~5 μm 红外热像仪；数码摄像机；JZ-06型智能采样器；1/10⁵分析天平；烘干机；综合气象观测系统。



(a)



(b)

图3 红外干扰测试试验现场图
Fig.3 The site of infrared interference test

5 试验结果与讨论

按照烟剂施放量和气象条件的不同，分别进行了红外烟幕干扰效能测试试验，试验结果如下：

1) 大气稳定度观测结果

我们通过气象观测及以往不同的海陆交界地区7、8、9月气象观测数据进行统计分析，得到陆海交界地区大气稳定度观测结果，见表1、表2。

根据以往内陆地区气象观测资料，将7、8、9月份的气象观测数据进行统计分析，得到内陆平坦开阔地区大气稳定度观测结果，见表3、表4。

通过试验的气象观测数据，我们发现夏季陆海交界地区等温情况出现的时间较平坦开阔地早，等温情况基本在17:00~23:30、02:00~08:30左右出现，逆温在23:30~次日02:00的深夜出现，但强度很弱，持续时间很短。分析原因：主要是环流和向岸流因素的影响，海上的中性向岸流风吹向岸边，使岸边上空大气较早形成中性，而岸上表面因向岸流的风作用降温迅速，从而等温现象提前出现，又因为海上中性气流持续向岸边运动，形成较稳定的中性大气层。这一现象特征有待在不同陆海交界处

开展大气边界层扩散试验进一步验证。

2) 烟幕浓度及红外干扰试验结果

烟幕浓度及红外干扰试验结果见图4~图9和表5。从试验结果中可以看出，烟幕对于3~5μm波段的红外辐射有较好的干扰效果，而且风速在1.5 m/s~2.5 m/s之间时，烟幕扩散更充分，烟幕浓度分布更均匀，红外干扰效果最好，另外烟幕浓度随源强增大而增大，烟幕干扰长度随源强增大而变长，但不呈线性递增趋势。分析其原因是由于红外烟幕是一种特殊的气溶胶，其粒径通常在5~10 μm范围内，该粒径范围的气溶胶在风速过小时不易于扩散，在风速过大时烟幕浓度变小，干扰效果减弱，建议最好在风速1.5 m/s~2.5 m/s之间使用红外烟幕。

通过各种试验条件下的测试结果，得出烟幕红外透过率随着烟幕光程上线积分浓度增加而减小，但不呈线性递减关系，两者之间的关系可由以下公式表示：

$$y=0.0001x^4-0.0136x^3+0.4599x^2-6.8271x+50.084 \quad (8)$$

表1 陆海交界地区大气稳定度观测结果(S_R 判别法)

Table 1 Test results for atmospheric stability at the boundary of land and sea(S_R Discriminance)

时间 (夏季7月~9月)	天气 情况	风速 范围	S_R 判别结果
08:43:21~17:19:45	晴	0~4 m/s	对流(不稳定)
17:19:45~23:36:12	晴	0~4 m/s	中性(等温)
23:36:12~02:29:37	晴	0~4 m/s	逆温(稳定，但强度低)
02:29:37~08:43:21	晴	0~4 m/s	中性(等温)

表3 内陆平坦开阔地区大气稳定度观测结果(S_R 判别法)

Table 3 Test results for atmospheric stability in the open land of inland region(S_R Discriminance)

时间 (夏季7月~9月)	天气 情况	风速 范围	S_R 判别结果
05:21:18~19:24:41	晴	0~4 m/s	对流(不稳定)
19:24:41~21:25:37	晴	0~4 m/s	中性(等温)
21:25:37~04:32:29	晴	0~4 m/s	逆温(稳定)
04:32:29~05:21:18	晴	0~4 m/s	中性(等温)

表2 陆海交界地区大气稳定度观测结果(莱赫脱曼判别法)

Table 2 Test results for atmospheric stability at the boundary of land and sea(Laihertoman Discriminance)

时间 (夏季7月~9月)	天气 情况	风速 范围	n 值判别结果
08:15:32~17:12:23	晴	0~4 m/s	对流(不稳定)
17:12:23~00:08:47	晴	0~4 m/s	中性(等温)
00:08:47~01:43:29	晴	0~4 m/s	逆温(稳定，但强度低)
01:43:29~08:15:32	晴	0~4 m/s	中性(等温)

表4 内陆平坦开阔地区大气稳定度观测结果(莱赫脱曼判别法)

Table 4 Test results for atmospheric stability in the open land of inland region(Laihertoman Discriminance)

时间 (夏季7月~9月)	天气 情况	风速 范围	n 值判别结果
05:04:16~19:47:23	晴	0~4 m/s	对流(不稳定)
19:47:23~21:13:44	晴	0~4 m/s	中性(等温)
21:13:44~04:27:12	晴	0~4 m/s	逆温(稳定)
04:27:12~05:04:16	晴	0~4 m/s	中性(等温)

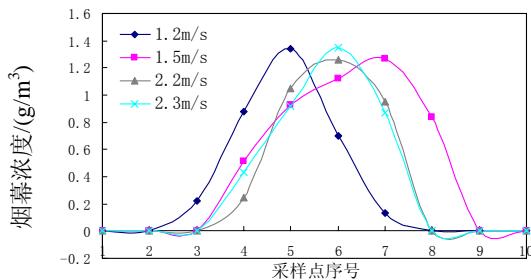


图4 不同风速条件下单源施放烟幕浓度曲线图

Fig.4 Smoke Concentration curve of the single source under different wind speed conditions

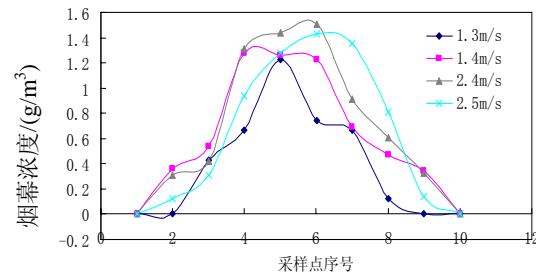


图5 不同风速条件下两源施放烟幕浓度曲线图

Fig.5 Smoke Concentration curve of two sources under different wind speed conditions

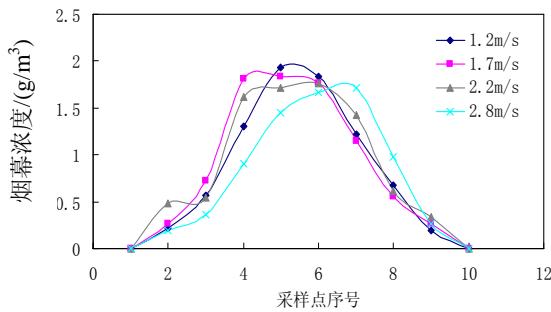


图6 不同风速条件下三源施放烟幕浓度曲线图

Fig.6 Smoke Concentration curve of three sources under different wind speed conditions

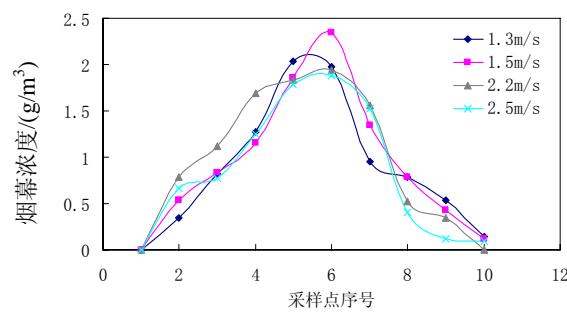


图7 不同风速条件下四源施放烟幕浓度曲线图

Fig.7 Smoke Concentration curve of four sources under different wind speed conditions

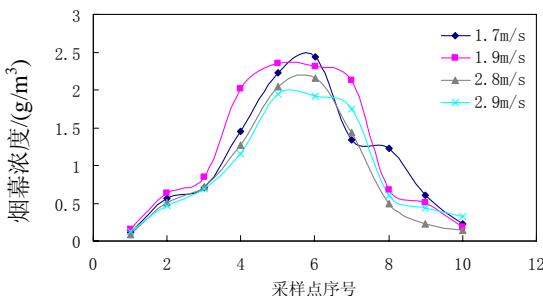


图8 不同风速条件下五源施放烟幕浓度曲线图

Fig.8 Smoke Concentration curve of five sources under different wind speed conditions

6 结论

在多种施放条件下对红外烟幕进行野外试验测量,得到了其红外中波段的消光效果和遮蔽规律,结论如下:

1)发现夏季陆海交界地区等温情况出现的时间较平坦开阔地早,等温情况基本在17:00~23:30、02:00~08:30左右出现,逆温在23:30~次日02:00的深夜出现,但强度很弱,持续时间很短。这一现

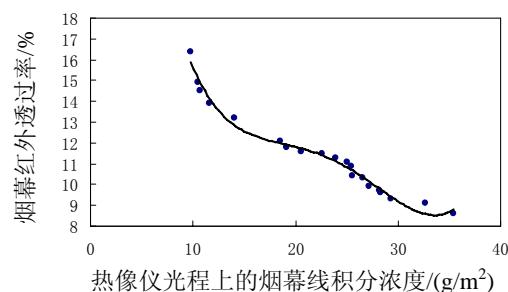


图9 光程上烟幕线积分浓度与红外透过率的关系图

Fig.9 Relationship between infrared transmittance and line integral concentration of smoke on optical path

象特征有待在不同陆海交界处开展大气边界层扩散试验进一步验证。

2)烟幕对于3~5 μm波段的红外辐射有较好的干扰效果,而且风速在1.5 m/s~2.5 m/s之间时,红外干扰效果最好,烟幕干扰长度随源强增大而变长,但不呈线性递增趋势。

3)烟幕红外透过率随着烟幕光程上线积分浓度增加而减小,但不呈线性递减关系。

表5 红外烟幕干扰试验结果

Table 5 Tests results for infrared smoke interference effect

序号	源强/kg	施放方式	风速/(m/s)	大气 稳定性	光程上线积分 浓度/(g/m ³)	烟幕 透过率/%	烟幕红外 干扰长度/m	烟幕红外干扰 平均长度/m
1	10	点源	1.2	C	9.81	16.4	11.9	
2	10	点源	1.5	C	14.01	10.2	13.1	
3	10	点源	2.2	C	10.53	11.1	13.9	13.150
4	10	点源	2.3	D	10.71	14.3	13.7	
5	20	点源	1.3	C	11.58	12.4	14.3	
6	20	点源	1.4	C	18.51	12.3	13.2	
7	20	点源	2.4	D	20.52	11.9	15.6	14.475
8	20	点源	2.5	D	19.14	14.8	14.8	
9	30	点源	1.2	C	23.88	11.9	16.4	
10	30	点源	1.7	C	25.08	11.6	17.6	16.875
11	30	点源	2.2	D	25.47	11.5	17.0	
12	30	点源	2.8	D	22.62	12.5	16.5	
13	40	点源	1.3	D	26.55	12.3	17.2	
14	40	点源	1.5	D	28.2	11.7	17.5	17.675
15	40	点源	2.2	D	29.34	10.3	18.1	
16	40	点源	2.5	D	25.53	12.4	17.9	
17	50	点源	1.7	D	32.64	11.2	19.2	
18	50	点源	1.9	D	35.4	10.6	20.3	19.475
19	50	点源	2.8	D	27.21	12.9	19.5	
20	50	点源	2.9	D	28.26	12.6	18.9	

参考文献:

- [1] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 空气污染气象学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2003.
- [2] 姚禄玖, 高钧麟, 肖凯涛, 等. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [3] 杜石明, 曾凯, 吕相银, 等. 对红外烟幕消光机理及性能的研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(1): 90-93.
- [4] 尹喜凤, 陈于忠, 陈宏达, 等. 铜基红外干扰发烟剂性能影响因素[J]. 火工品, 2003(4): 7-10.
- [5] 肖凯涛, 刘吉平. 铜粉烟幕干扰3~5 μm红外波段性能测试研究[J]. 红外技术, 2008, 30(8): 458-461.
- [6] 刘宝刚. 红外干扰弹干扰性能参数及测试方法[J]. 红外技术, 2006, 28(11): 648-650.
- [7] 李明, 范东启, 康文运, 等. 红外烟幕遮蔽效果测量与评估方法研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 36(7): 599-603.