

人工干扰下重大传染病扩散演化的仿真研究 ——以非典为例

陈之强^a, 马祖军^b

(西南交通大学 a. 交通运输与物流学院; b. 经济管理学院, 四川 成都 610031)

关键词: 重大传染病; 公共卫生事件; 非典(SARS); 隔离措施; 疫情; 系统动力学模型

摘要: 重大传染病发生后若应对不当, 往往会借助自然系统或社会系统之间相互依存和相互制约的关系迅速扩散演化, 产生一系列次生衍生事件。以重大传染病的发生和发展过程为基础构建其扩散模型, 利用系统动力学仿真软件比较不同防控情形下系统演化结果。结果表明: (1) 通过对疾病接触系数、自由传播期、开始防控时间进行控制可以改变重大传染病的扩散演化; (2) 单独限制人口流动虽可降低传染速率但无法抑制重大传染病的扩散, 而同时采取限制人口流动和隔离措施的效果优于单独采取隔离措施。

中图分类号: R184

文献标志码: A

文章编号: 1009-4474(2011)04-0131-06

System Dynamics of Simulation of Spread of Major Infectious Disease

——A Case Study on SARS

CHEN Zhi-qiang^a, MA Zu-jun^b

(a. School of Transportation and Logistics; b. School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Key words: major infectious disease; public health emergencies; Severe Acute Respiratory Syndrome; isolation; epidemic situation; system dynamics model

Abstract: With the interrelated restriction and interaction of natural system or social system, a series of secondary events will derive from major infectious disease if appropriate responses are not made. According to the process of major infectious disease, the diffusion model of the major infectious disease was established, and the results under different prevention and control measures were compared. The results show that: (1) Diffusion evolution of major infectious disease can be affected by changing the value of the N_{fc} , T_{free} , and Time; (2) Although value of variable R_g can be reduced, diffusion of major infectious disease can not be controlled effectively by only limiting population flow. Therefore, limiting the flow of population and isolating the affected simultaneously is better than the act of isolation only.

由于其突发性、传染性和致死性, 重大传染病(如非典、甲流感等)成为近年来在国内影响最为恶劣的突发公共卫生事件。1988 年上海甲肝大流行、2003 年的非典、2004 年的“禽流感”、2005 年四川

猪链球菌感染、2009 年甲型 H1N1 流感和手足口病、2010 年的红眼病等, 这一系列重大传染病一次次暴露出我们对突发公共卫生事件扩散演化机理认识的不足, 同时也给我国的公共卫生事业敲响了

收稿日期: 2011-02-17

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(08JC630067)

作者简介: 陈之强(1982-), 男, 山东泰安人。硕士研究生, 主要从事应急管理物流研究。E-mail: czqls2001@163.

com。

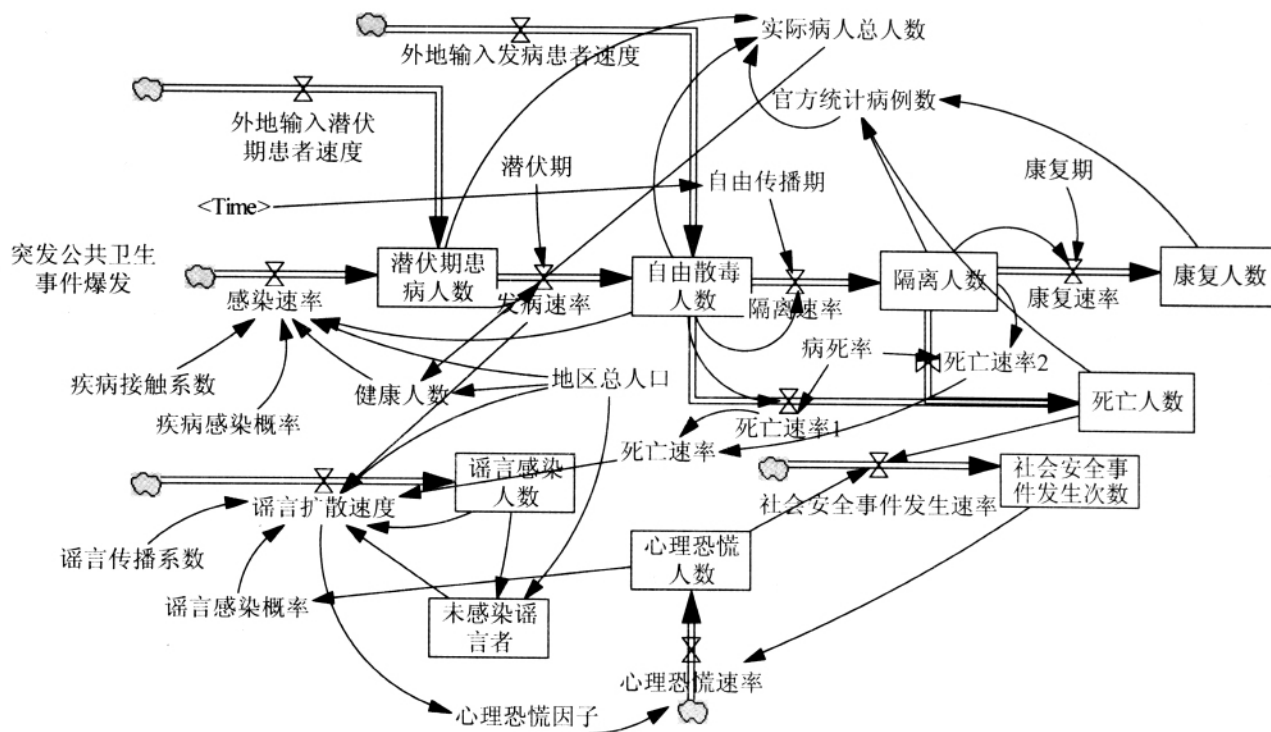


图2 人工干扰下重大传染病扩散演化系统 SD 模型

人数(Ph)在扩散演化过程中是变值,是所有患病者及潜伏期者的补集。感染速率(R_g),平均每天新增潜伏期患者人数。疾病接触系数(NFC),患者平均每天接触易感人数,按照Sars流行病学分析值为3.22^[9]。该参数为政府可控参数,其取值大小与政府防控力度相关,仿真过程中可以根据仿真结果与实际情况的拟合程度做适当调整。疾病感染概率(P_{gr}),每个Sars病人接触易感者后将其感染的概率,根据流行病学分析初期的平均感染概率为7.33%^[9]。发病速率(R_{fb}),平均每天从潜伏期进入发病期的患者人数。潜伏期(T_{qf}),根据流行病学分析设定为7.6,仿真过程中可以根据与实际情况的拟合程度做适当调整。外地输入发病患者速度(R_{sr}),每天向系统边界中输入的外来发病人数,由于初期的输入病例往往是不可控的,本模型中通过调用随机函数RANDOMNORMAL实现。外地输入潜伏期患者人数(R_{srqf}),每天向系统边界输入的外来处于潜伏期内发病人数,由于初期的输入病例往往是不可控的,本模型中通过调用随机函数RANDOMNORMAL实现。自由散毒人数(P_{free}),社会上自由传播疾病的人数,初始值设为0。隔离速率(R_{gl}),平均每天被隔离的发病人数。隔离人数(P_{gl}),政府可控病的病人数。自由传播期

(T_{free})病人在社会上自由传播的平均时间,根据非典的流行病学统计初期设置为14天,该参数是可控参数,可以根据仿真结果适当调整。康复期(T_{kf}),病人从患病到被治愈的时间,不同地区取值不同,全国的平均值为31.8天。康复速率(R_{kf}),平均每天康复的病人数。康复人数(P_{kf}),康复速率的累积值,初始值设定为0。病死率(L_{bs}),根据流行病学分析结果设定。如北京地区取值为6.25%,广东省为3.77%,全国均值为6%。死亡速率1(R_{sw1}),处于自由散毒状态的患者平均每天死亡的病人数。死亡速率2(R_{sw2}),处于被隔离状态的患者平均每天死亡的病人数。死亡人数1(P_{sw}),死亡速率1与死亡速率2的累积值,初始值设定为0。官方统计病例数(P_{total1}),当日隔离人数、康复人数及死亡人数之和。实际病人总数(P_{total2}),自由传播病例与官方统计病例数之和。谣言扩散速度(R_{yy}),平均每天增加的被谣言感染的人数,谣言感染人数(P_{yy}),谣言扩散速度的累积值。未被谣言感染人数(UNP_{yy}),地区总人口与谣言感染人数的差值。社会安全事件发生速率(R_{so}),平均每天发生的社会安全次数。社会安全事件发生次数(Q_{so}),社会安全事件发生速率的累积值。心理恐慌速率(R_h),平均每天发生心理恐慌的人数。心

理恐慌人数(Ph) 心理恐慌速率的累积值。

三、不同防控策略下重大传染病扩散演化结果的比较

(一) 人口自由流动 采取隔离措施

人口自由流动也就是令参数 $NFC = 3.22$,采取隔离措施意味着对参数 T_{free} 进行干扰 ,假设干扰

强度最大限度可以使得病人 T_{free} 缩短至 2 天 ,干扰方式为令 $T_{free} = SMOOTH(IF THEN ELSE(Time > = x \ 2, 14), 10)$,也就是当仿真时间 x 天后开始采取隔离措施 ,使得病人的自由传播期由原来的 14 天降至 2 天。为了模拟政府的控制力的逐渐增强 ,本文利用了系统动力学仿真软件 Vensim 中信息延迟函数来拟合政府的控制力度的逐渐增强 ,通过仿真(见图 3) 我们可以得出以下结论:

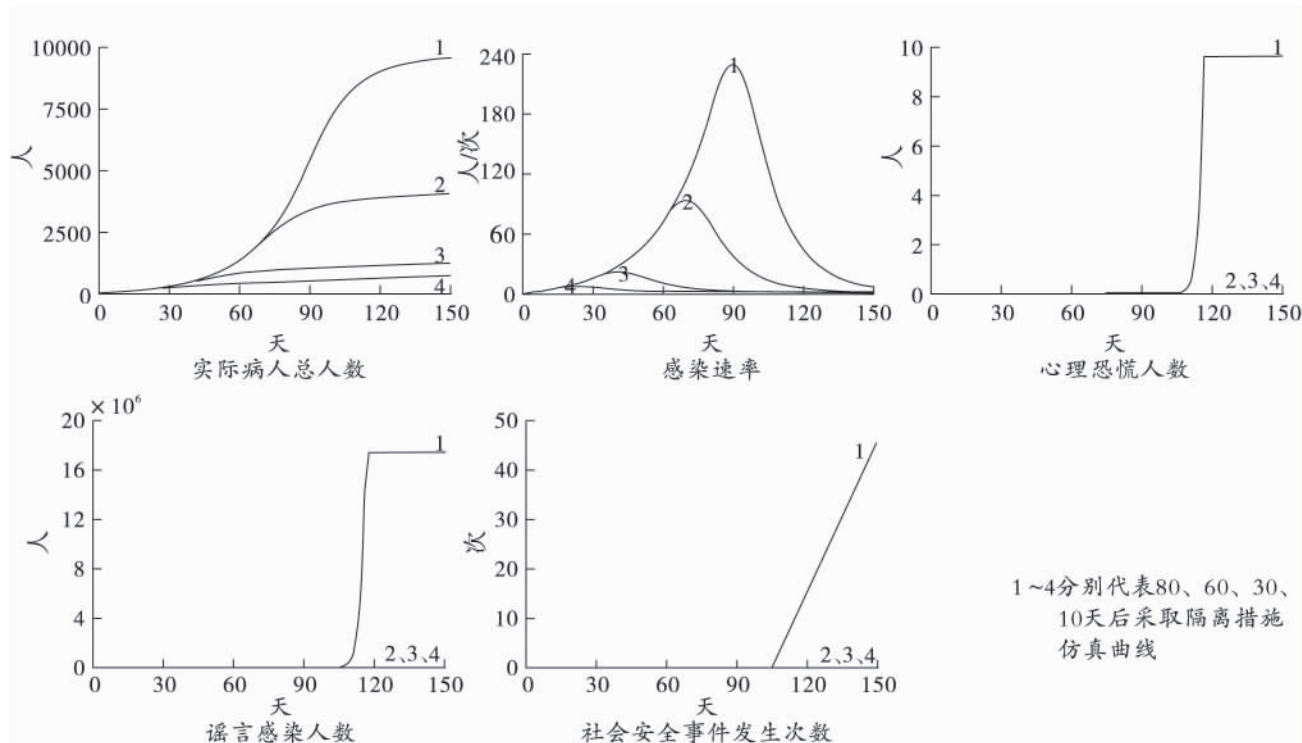


图3 不同时间采取隔离措施仿真结果

(1) 通过加强隔离措施可以控制疫情 ,但是政府的控制力必须达到一定的强度 ,通过仿真我们发现如果政府的努力可以使得病人的自由传播期缩短至两天 ,那么疫情将可以被控制 ,但是需要尽早地采取隔离措施。

(2) 隔离措施具有延迟的效果 ,即政府采取隔离措施后不能立即控制疫情 ,感染速率在一段时间内仍呈增长趋势 ,通过表 1 仿真数据可以看出 ,延

迟时间约为 10 天左右。

(3) 疫情爆发后 10 天后开始采取控制措施比起 30 天、60 天、80 天 ,感染速率的峰值分别提前了 16 天、44 天、64 天 ,而 80 天后采取控制措施比起 60 天、30 天、10 天后再采取措施 ,实际病人总数分别多了 1 倍、5.4 倍、10 倍。因此 ,如果政府能够越早采取隔离措施 ,防控效果就越好(见表 1)。

表1 不同防控策略下仿真结果对比

开始采取防控措施的时间	控制延迟时间	Rg 峰值时间	Rg 峰值(人/天)	Ptotal2 峰值(人)	Pyy 开始演化时刻	Ph 开始演化时刻	Qso 开始演化时刻
80	8	88	232	8761	73	77	105
60	8	68	94	4536	不演化	不演化	不演化
30	10	40	22	1366	不演化	不演化	不演化
10	14	24	7.4	777	不演化	不演化	不演化

(二) 限制人口流动 不采取隔离措施

不采取隔离措施也就是令 $T_{free} = 14$ 天,而限制人口流动则通过对参数 NFC 进行干扰来实现, $NFC = SMOOTH(IF THEN ELSE(Time > = x , y , 3.22) , 10)$ x 值代表开始限制人口流动的时间, y 值是通过限制人口流动使得疾病接触系数变化的值。

通过仿真(见图 4) 可以看出:

(1) $Time > = x = 80 , y = 2: NFC = SMOOTH(IF THEN ELSE(Time > = 80 , 2 , 3.22) , 10)$ 。不采取隔离措施 80 天开始限制人口流动,虽然可以降低扩散的速度但是无法控制控制系统的演化,疫情将大规模地爆发。

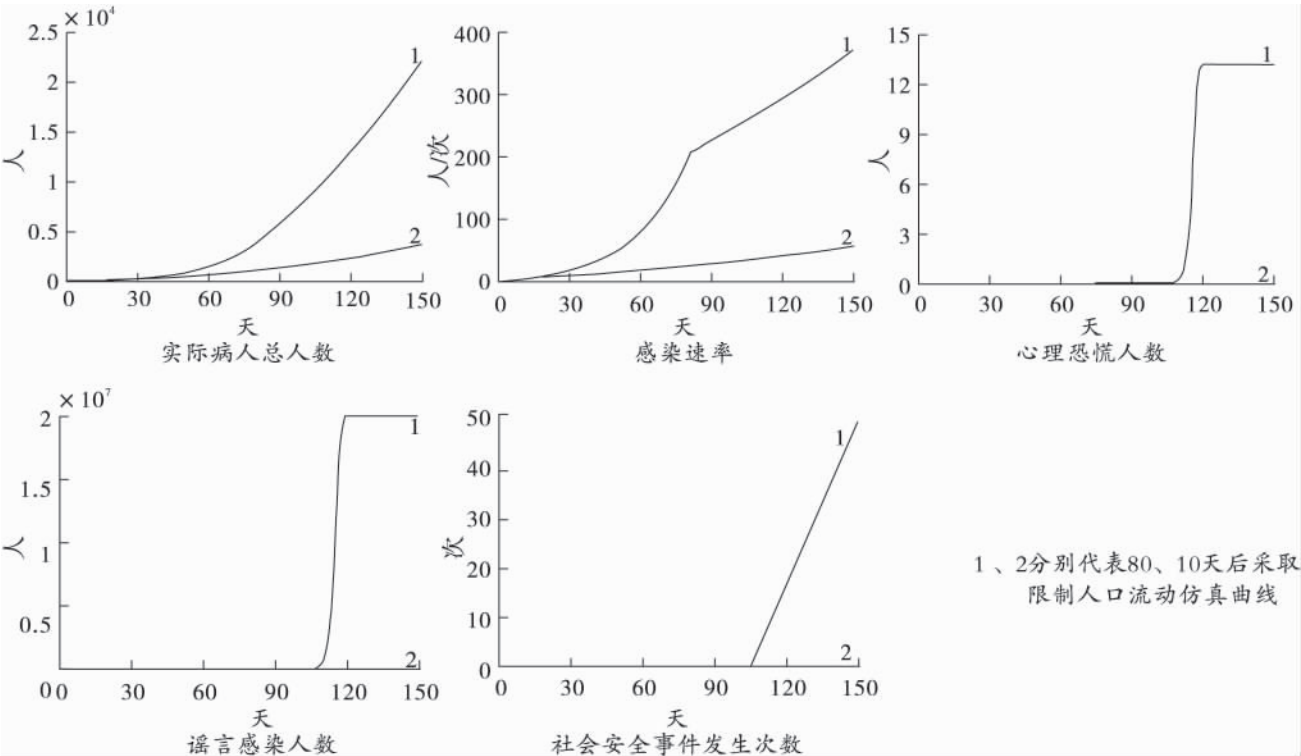


图 4 不同时间采取限制人口流动仿真结果

(2) $Time > = x = 10 , y = 2$: 疾病接触系数 $NFC = SMOOTH(IF THEN ELSE(Time > = 10 , 2 , 3.22) , 10)$ 。如采取隔离措施,尽管很早限制人口流动,仍然无法控制疫情。随着时间的推移,疫情将在人群中爆发,谣言、大众心理恐慌、社会安全事件将在人群中扩散。

(三) 限制人口流动 采取隔离措施

同时采取限制人口流动、隔离措施,也就是对参数 NFC 及 T_{free} 同时进行干扰,设定方法为 $NFC = SMOOTH(IF THEN ELSE(Time > = x , y , 3.22) ,$

$10)$, $T_{free} = SMOOTH(IF THEN ELSE(Time > = x , 2 , 14) , 10)$ 。通过仿真结果(见图 5) 可以得出以下结论:

(1) 如果防控措施实施得太晚,如疫情爆发 80 天后才开始采取控制措施,即使同时采取隔离以及限制人口流动措施也无法有效的遏制疫情,实际病人总数在第 5 个月将会达到 8099 人(见表 2)。

(2) 同时采取两种措施,要比单独采取隔离措施效果要好,疫情得到控制的时间比单独采取隔离措施由 10 天左右缩短至 3 天左右。

表 2 同时采取两种措施仿真结果 (天)

开始采取防控措施的时间	Rg 峰值时间	Rg 峰值 (人/天)	Ptotal2 峰值 (人)	Pyy 开始演化时刻	Ph 开始演化时刻	Qso 开始演化时刻
80	82	192	8099	76	77	105
60	63	77.5	3368	不演化	不演化	不演化
30	34	17.5	1012	不演化	不演化	不演化
10	14	5	587	不演化	不演化	不演化

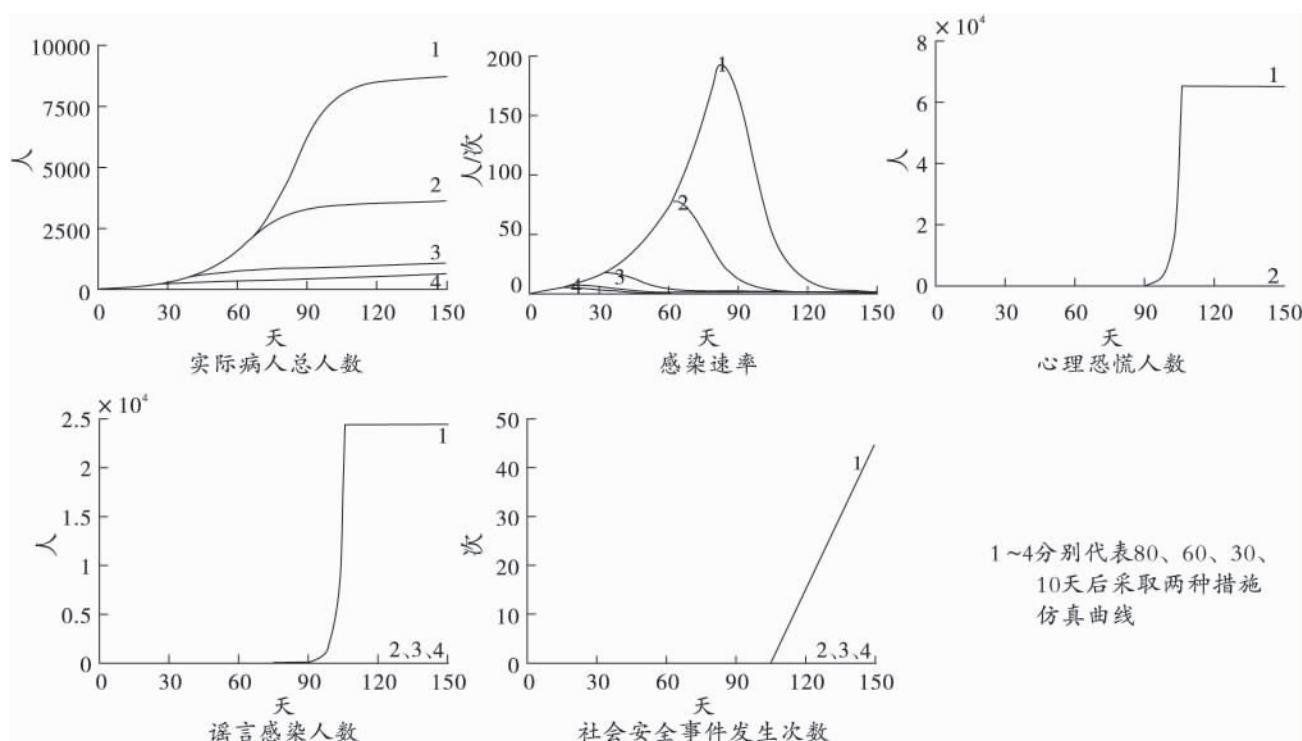


图5 不同时间采取两种措施仿真结果

四、结论

通过仿真可以得出几个重要结论: (1) 参数 NFC 、 T_{free} 、 $Time$ 为突发公共卫生事件扩散演化系统的脆弱性参数,通过对三个变量进行干扰,就可以改变突发公共卫生事件的演化速率; (2) 单靠采取限制人口流动可以降低感染速率,但无法抑制突发公共卫生事件的扩散,随着时间的推移,疫情将在人群中爆发; (3) 在一定防控强度下,同时采取限制人口流动、隔离措施效果优于单独采取隔离措施,后者比起前者,疫情扩散得到控制的时间由 10 天左右缩短至 3 天左右; (4) 政府开始防控的时间,对于疫情的控制具有重要影响,通过仿真可以发现政府越早进行防控,疫情就越易被控制,所需防控的力度越小。

参考文献:

- (1) Merle Jacob, Tomas Hellstrom. Policy Understanding of Science Public Trust and the BSE-CJD Crisis (J). Journal of Hazardous Materials 2000 78(3):303-317.

- (2) 张齐鹏. 甲型 H1N1 流感在预防控制措施下的传播数学模型构建 (J). 湖南文理学院学报(自然科学版) 2009, 21(4):16-18.
- (3) 王议峰. 非典数学模型的建立与分析 (J). 工程数学学报 2003 20(7):45-52.
- (4) 曹志冬. 广州市 SARS 流行的数学建模与干预措施的定量评估 (J). 复旦学报(自然科学版) 2009 48(6):793-799.
- (5) 余雷. 传染病传播模型研究 (J). 计算机仿真 2003 24(4):57-60.
- (6) 郭晓梅. 流行病学模型 (J). 黑龙江科技信息, 2004 (20):25.
- (7) 石耀霖. SARS 传染扩散的动力学随机模型 (J). 科学通报 2003 48(13):1373-1377.
- (8) 程卫生. 传染病动力学偏微分方程模型的数值解法 (J). 数理医学杂志 1995 8(4):289-293.
- (9) 杨楠. SARS 流行病学仿真分析及防控策略研究 (D). 济南: 山东大学公共卫生学院 2008:11-12.

(责任编辑: 叶光雄)