

文章编号:2095-6134(2015)02-0200-07

基于自然控制论的核化事故应急优化控制理论框架^{*}

黄顺祥^{1,2,3}, 曾庆存¹, 胡 非^{1†}, 王自发¹, 刘 峰³

(1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 防化学院, 北京 102205)

(2014 年 4 月 14 日收稿;2014 年 5 月 9 日收修改稿)

Huang S X, Zeng Q C, Hu F, et al. Optimal control theory framework for nuclear and chemical disaster emergency based on the natural cybernetics[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015,32(2):200-206.

摘 要 核化事故应急是一个典型的自然规律与人类活动相互作用的问题. 以自然环境的合理或最优利用和调控为最终目标的自然控制论是解决核化事故应急优化控制问题的有效方法. 核化事故应急优化控制是自然控制论新的发展方向和应用领域. 本文给出核化事故应急优化控制问题一般提法的理论方程, 建立核化事故应急优化控制数学模型, 提出应急行动代价和事故损失函数的具体表达式, 将应急行动代价和事故损失定量化, 并给出事故源控制、警戒、疏散、防护、洗消、人员伤亡、医学救治等计算方法. 本文为核化事故最优应急控制方案提供了计算理论框架.

关键词 自然控制论; 核化事故; 大气环境; 优化控制; 应急

中图分类号:P427 **文献标志码:**A **doi:**10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2015. 02. 008

Optimal control theory framework for nuclear and chemical disaster emergency based on the natural cybernetics

HUANG Shunxiang^{1,2,3}, ZENG Qingcun¹, HU Fei¹, WANG Zifa¹, LIU Feng³

(1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract Nuclear and chemical disaster emergency is a typical problem associated with interactions between the nature and human activities. Natural cybernetics, aiming at optimal and reasonable use of natural resources, is an effective method to resolve this problem. We develop a mathematical model by providing equations for optimal control of the nuclear and chemical accident emergency with the specific expressions of control costs and disaster losses. It also gives the calculation method for the control costs related to accident source control, security alert, evacuation, protection, decontamination, casualties, medical treatment, and so on. This model provides a suitable theoretical basis for solving the nuclear and chemical disaster emergency problem.

Key words natural cybernetics; nuclear and chemical disaster; atmospheric environment; optimal control; emergency

^{*} 国家自然科学基金(41375154)和财政部\科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106033)资助

[†] 通信作者, E-mail: hufei@mail. iap. ac. cn

核化事故将造成放射性、剧毒物质泄漏到大气中,对大气造成严重污染,并随着大气运动而扩散,对较大范围内人员和生态环境构成危害^[1-3]。历史上发生了一些有着重大影响的核化事故,如1986年前苏联切尔诺贝利核电站泄漏事故^[4-5],造成31人当场死亡,数万人受到高剂量放射性照射伤害,由于大气扩散和沉降,20多万 km^2 土地遭到污染,放射性烟云漫延整个欧洲,造成深远的影响。2011年日本福岛核电站由于地震引发的海啸受到损毁,造成大量核物质泄漏,对大气、海洋和生态造成的危害仍在继续^[1,3,6]。1984年印度博帕尔化工厂剧毒化学品泄漏事故^[7-9],当场造成3000人死亡,30万人中毒,是历史上后果最悲惨的化学灾难。2013年11月22日,青岛石油爆炸事故,造成62人死亡、136人受伤,直接经济损失75172万元^[10-11],受到国家安监局责问。显然,没有有效进行应急控制是本次特大事故造成严重后果的直接原因。事实上,一旦发生重大核化事故,如何采取有效应急行动?既是一个应急管理问题,更是一个科学问题。

对核化事故危害的防控主要体现在核化事故危害预测和控制两方面。要实施有效控制,首先要进行核化事故危害预测,根据预测结果和事故现状开展应急控制。关于核化事故危害预测,自切尔诺贝利、福岛核泄漏和印度博帕尔剧毒化学品泄漏等特大事故以来,取得了一系列优秀成果^[12],例如 RODOS^[13]、ARAC^[14]、SPEED^[15]、CHARM^[16]、CDM^[17-18]等均可以有效地对核化事故危害进行预测。但关于核化事故优化控制的成果鲜有报道,有少数成果涉足应急优化控制,比如 RODOS 系统具有决策子系统模块,但它只是对专家设定的有限条件进行优选。对于核化事故优化控制比较系统的理论仍未见到公开报道,尤其是基于动力学原理的核化事故优化控制还只是一个抽象概念。

核化事故危害后果不仅与源项的性质、泄漏的强度有关,也与当时当地的气象条件、社会、经济等因素密切相关^[19-20]。本文旨在通过对核化事故造成的大气污染过程进行模拟,从而预测所造成的危害,并在此基础上研究如何采取最优的措施和策略,有效防范和降低可能造成的危害。

在模拟核化事故的基础上,需要发展危害控

制的理论和技术。核化危害控制包括防范风险和降低危害。降低危害是在核化事故一旦发生时,采取适当的措施,减少人员伤亡和经济损失,如组织人员疏散和防护、处置危险源、对污染现场进行洗消等。由于降低核化危害涉及到气象和地理等自然因素,也涉及到社会经济政治等人文因素,要综合考虑这些因素对于核化危害控制过程的影响,需要建立新的研究方法论,将宏观的控制目标和微观的控制机理结合起来,使这类研究建立在科学的基础上。自然控制论^[21-22]正是一个这样的研究方法论,它整体研究自然-社会-经济复合宏观系统,在优化控制模型中引入自然因素和人文因素两类变量,通过调整敏感性高的人文因素变量,影响整个系统的演变,在满足各种自然和人文约束条件的前提下,实现整体最优(经济效益最优或控制效果最好)。自然控制论在大气环境、气候、水利、人工影响天气等领域都得到了广泛的应用^[22-26]。本文提出基于自然控制论的核化事故应急优化控制理论框架。

1 问题的一般提法

核化事故的发生及其危害的蔓延过程,与自然条件和人类活动密切相关,因此必须从自然和人类活动两方面的控制变量入手。如果说核化事故危害预测是从已知的原因(风险源、自然条件等)计算核化事故对受体的危害程度,属于正问题,那么核化事故应急控制就是根据需要的结果反过来对源或受体进行调控(如事故源控制、警戒、疏散、防护、洗消、监测、医学救治等),属于反问题。由于核化事故时,大量有毒有害物质泄漏,为了减小危害,需要对事故进行控制^[27]。显然,控制强度越大,事故本身造成的人员伤亡和环境影响就越小。反之,控制强度越小,需要控制的代价相对较小,但事故本身造成的危害势必较大。这中间有一个平衡点,即在满足事故控制目标的前提下,控制代价和事故损失之和为最小^[28]。该问题的数学描述如下:进行核化事故应急控制时,设与自然环境(如气象、地形等因素)相关的变量为 $D(r,t)$,它随空间点 r 与时刻 t 改变。与人文社会(如应急行动代价、事故损失等因素)相关的变量为 $E(r,t)$,这些变量通过影响事故源又作用在 $D(r,t)$ 上,自然环境 $D(r,t)$ 的演变同时受其自

身以及自然过程变量 $V(r, t)$ 和人文社会变量 $E(r, t)$ 影响, 可由微分方程描述如下

$$\frac{\partial D}{\partial t} = L(D, V, E, t), \quad (1)$$

初始条件可描述为

$$D(r, t) \big|_{t=t_0} = D^0(r), \quad (2)$$

边界条件可描述为

$$\Lambda(D, G, t) \big|_{\partial\Omega} = G(D, U, t), \quad (3)$$

其中, D^0 是有毒有害物质在空间上的初始剂量, D 是有毒有害物质不同时刻在空间上的剂量, 由扩散模式计算得出, 包括传输、沉积、转化等过程; t_0 为核化事故造成危害的初始时刻, L 是空间微分算子; $\partial\Omega$ 为核化事故所在区域空间 Ω 的边界; Λ 是边界条件算子; 函数 G 除了依赖边界上的 D 还依赖于核化事故的源或其控制率 U , 以及从经济或管理代价考虑的措施, 这里我们设源及措施均在边界 (如地面) 上. 构造出 2 个函数 $G_1(U)$ 和 $G_2(D)$, $G_1(U)$ 反映控制的经济代价, $G_2(D)$ 考虑事故本身的损失. 显然, 核化事故应急控制受到社会能力的限制, 比如应急分队的数量、专业水平和所在位置, 应急装备的数量和先进程度, 应急物资的种类和数量等, 可以将这些限制条件表示为

$$\|E(r, t)\|_e \leq D_c, \quad (4)$$

其中, D_c 为限制条件, 这里取为一系列常数. 同时, 在核化事故应急中, 必须把人员生命健康放在首位, 尽可能对事故源进行控制, 对污染区域的洗消必须彻底, 即洗消后剂量需达到一定的环境健康标准, 人员撤离时尽量避免高剂量区, 如果必须经过高剂量区尽可能做好防护等. 针对这些要求, 我们把这些环境健康限制条件 D_p 统一表示为

$$\|D - D_p\|_p \leq D_0, \quad (5)$$

其中, D_0 为剂量阈值, D_p 可以认为是剂量本底值. 核化事故应急优化控制就是在式 (4) 和 (5) 的限制条件下, 寻找最优控制方案, 使应急行动代价和事故损失整体最小, 就是取 G_1 和 G_2 的某个函数 J 为最小:

$$J(G_1, G_2) = \min$$

$$\text{s. t. } \frac{\partial D}{\partial t} = F(D, V, T, \dots) + Q(1 - U), \quad (6)$$

其中, L 又可以写成 2 部分, 其一为描述有毒有害物质平流扩散过程的算子 F , 其二为 Q 泄漏源强度 $Q(1 - U)$.

2 核化事故应急优化控制模型

核化事故应急优化控制模型理论框图如图 1 所示. 气象预报模式的气象场驱动平流扩散模式, 同时调用边界条件和事故源项, 对有毒有害物质扩散进行过程模拟, 根据危害指标体系和毒性计量方法, 对核化事故危害进行预测. 根据预测结果, 计算出人员伤亡、财产损失和生态环境损失等, 再提出应急分队、应急装备和应急物质等初步应急行动方案, 及相应的应急行动代价, 今取事故损失和应急行动代价的组合 G_1 和 G_2 作为目标函数, 应用自然控制论和优化算法, 对应急行动进行优化, 得出最优的应急控制方案. 应急优化控制过程中, 应急控制方案与事故损失和应急行动代价本是相互反馈的, 今用分布计算法, 将事故源控制反馈给扩散模式的事故源项, 由此计算出新的控制方案下事故危害的发展态势. 整个优化控制过程是在反映核化事故实际状况的复杂系统中, 基于动力学和经济学原理, 既考虑应急人员、装备、物质及技术等限制条件, 同时考虑社会经济影响, 针对使事故损失和应急行动代价整体最小的目标函数, 求解最优实时应急行动方案.

虽然气象场预报和扩散模拟 (包括扩散、沉积和转化过程) 的准确性直接影响剂量场的分布, 进而影响事故损失计算结果和优化控制参数取值, 但鉴于这部分已有很多成熟的理论和技术, 本文不再详细讨论. 下面给出在气象预报和扩散模拟的基础上核化事故应急优化控制模型的具体理论方程.

核化事故损失可分为 2 个方面: 1) 应对核化事故时应急行动代价; 2) 核化事故本身造成的损失. 我们把应急行动代价变量分为应急分队、应急装备、应急消耗物质等 3 个方面. 考虑到边界条件算子 Λ 常是直接反映排放源的强度, 于是应急行动代价函数可以描述为

$$G_1(Eu, Eq, Em) = \sum_{i=1}^{N_1} t_i Eu_i + \sum_{i=1}^{N_2} \tau_i Eq_i + \sum_{i=1}^{N_3} Em_i, \quad (7)$$

其中, $G_1(Eu, Eq, Em)$ 为行动代价; Eu_i 为第 i 支应急分队单位时间的成本, $1 \leq i \leq N_1$, N_1 为大于等于 1 的正整数; t_i 为第 i 支应急分队出动人员时间, 以小时或天为单位; Eq_i 表示第 i 类装备单位时间的成本, $1 \leq i \leq N_2$, N_2 为大于等于 1 的正

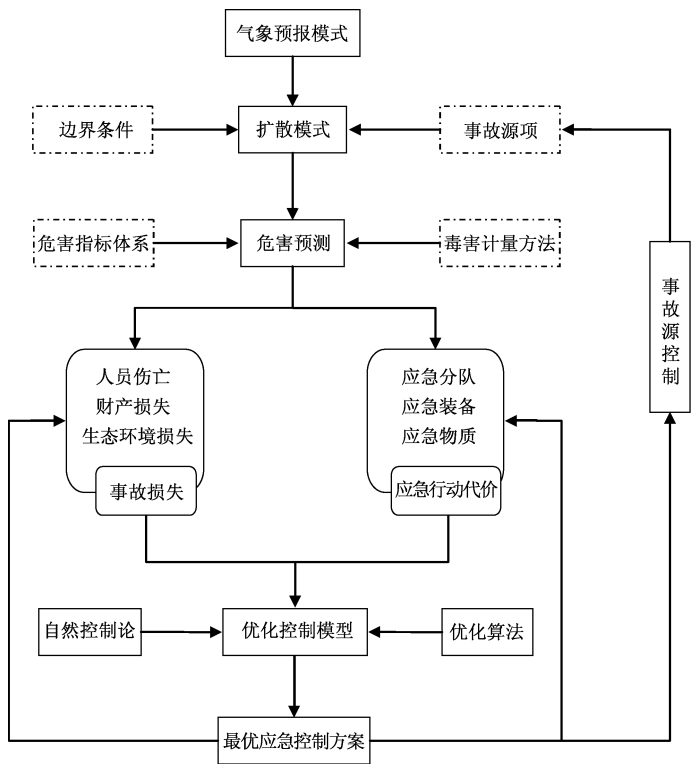


图 1 核化事故应急优化控制模型理论框图

Fig. 1 Theoretical chart of optimal control model for nuclear and chemical disaster emergency

整数; τ_i 为第 i 类装备使用的时间,以小时或天为单位; Em_i 表示第 i 类应急消耗物质的价值, $1 \leq i \leq N_3$, N_3 为大于等于 1 的正整数。

可以把核化事故自身的损失分为被污染区内财产损失、人员伤亡和生态环境危害等 3 个方面,则事故损失函数可以描述为

$$G_2(Bd, Pd, En) = \sum_{j=1}^N s_j \lambda_j Bd(j) + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \eta_k Pd(j, k) + \sum_{i=1}^N s_j En_j, \quad (8)$$

其中, $Bd(j)$ 为被污染的第 j 个区域财产聚集度, $1 \leq j \leq N$, N 为大于等于 1 的正整数; λ_j 为被污染的第 j 个区域内财产的损失系数; s_j 为被污染的第 j 个区域的面积; $Pd(j, k)$ 为被污染的第 j 个区域遭受到第 k 级危害的人数; η_k 为每个 k 级危害的人员需要赔偿的费用(包括医疗费、抚恤金、精神赔偿金等); En_j 为被污染的第 j 个区域内单位面积的生态环境损失。

因此,核化事故总损失的目标函数 J 为 $J = G_1(Eu, Eq, Em) + G_2(Bd, Pd, En)$. (9) 需要控制的目标是使在所控制的区域内最后剂量达到某一阈值 d_0 时,核化事故总损失的目标

函数 J 最小,即: $\min J = \min [G_1(Eu, Eq, Em) + G_2(Bd, Pd, En)]$ s. t. $d(x_j, y_j, z_j) \leq d_0, j = 1, 2, \dots, N$, (10) 其中, (x_j, y_j) 为第 j 个地理区域的水平坐标; z_j 为垂直坐标。

采用罚函数法构造针对核化事故损失及应急行动代价的优化控制模型

$$J_{\text{new}} = G_1(Eu, Eq, Em) + G_2(Bd, Pd, En) + \gamma \sum_{j=1}^N w[d(x_j, y_j) - d_0], \quad (11)$$

其中, $w(p) = \begin{cases} p^2, & p \geq 0, \\ p^2 \exp(-p^2/\beta), & p < 0, \end{cases}$ (12) γ 、 β 为系数,其取值可根据实际情况进行调整。

应用伴随方法求解此模型,就可获得最优控制方案^[28-31]。

3 模型参量计算方法

3.1 事故源控制效率计算

对事故源的控制包括对泄漏源的封堵、洗消和其他措施(如对可能发生泄漏的反应堆进行冷却等),不同性质的源控制措施不同,但总体遵循控制力度越大事故源强就越小的规律。当对源项

控制到一定程度时,控制代价可能急剧上升,且控制收效甚微,这就要对控制因子进行敏感性分析,提取关键控制因子,并求解关键影响因子最佳取值. 根据关键影响因子及取值,量化所需的应急分队、应急装备和应急消耗物质等应急行动代价. 同时,将事故源控制参数反馈给源项模式,得出新的事故源强,即可求出式(6)中的 U , 通过求解平流扩散方程,得到在对事故源进行控制的基础上毒害剂量 $d(x, y)$ 的分布,进而得出受危害区域的面积 S_H 和受影响人数 N_p :

$$S_H = \iint_{\partial\Omega} s(x, y) dx dy, \quad (13)$$

$$N_p = \text{int}(\iint_{\partial\Omega} s(x, y) \rho(x, y) dx dy), \quad (14)$$

式中, $s(x, y) = \begin{cases} 1, & d(x, y) \geq d_0, \\ 0, & d(x, y) < d_0, \end{cases} \rho(x, y)$

为人口密度分布, d_0 为剂量阈值.

3.2 事故损失参量计算

事故损失参量中,最重要的就是伤亡人员数量. 对于化学事故,有毒化学品的毒害效果与诸多因素有关^[30],定义毒害剂量与某一毒害剂量级的比值为毒害剂量指数

$$P_N(x, y) = \frac{1}{R_d} \int_0^t c(x, y, t) dt, \quad (15)$$

式中, R_d 是某一剂量等级,如致死剂量、失能剂量等, $c(x, y, t)$ 指某一平面上(通常为人们活动的平面) t 时刻的浓度, x, y 为平面坐标. 记 $\frac{1}{R_d} = \xi_d$ 表示,考虑到人的耐伤害程度与受影响时间长度有关, ξ_d 随 t 而变,故有:

$$P_N(x, y) = \int_0^t \xi_d c(x, y, t) dt. \quad (16)$$

大量的实战或试验结果表明,杀伤率或伤害率与毒害剂量指数有密切的内在关系. 致死概率的表达式为

$$R_i(x, y) = \frac{1}{1 + P_N(x, y)^{-[\alpha + \beta P_N(x, y)]}}, \quad (17)$$

这里, $P_n(x, y)$ 为半致死毒害剂量指数,为无量纲化剂量在空间上的分布. α, β 为伤害率方程的参数. 试验表明,也可以用半致死毒害剂量指数来近似地描述重度伤害、中度伤害、轻度伤害的伤害率方程,其通用表达式为

$$R_i(x, y) = \frac{1}{1 + [P_N(x, y) + \lambda]^{-[\alpha + \beta P_N(x, y)]}}, \quad (18)$$

式中, $i = s, m, t$ 分别表示重度伤害率、中度伤害率和轻度伤害率, λ 定义为伤害位移参数,根据实验数据拟合获得.

根据伤害区域的人口密度计算伤亡状况的方法如下:

$$N_j = \iint_S R_d(x, y) \rho_p(x, y) dx dy, \quad (19)$$

其中, $\rho_p(x, y)$ 为目标区域内的人口密度,伤亡人数 N_j : N_1 对应死亡人数、 N_2 对应重伤以上人数、 N_3 为中度伤以上人数、 N_4 为轻度伤以上人数,据此重伤人数为 $(N_2 - N_1)$, 中度伤人数为 $(N_3 - N_2)$, 轻伤人数为 $(N_4 - N_3)$.

对于核事故,则需隐蔽的人数为

$$N_{\text{cov}} = \text{int}(\iint_{\partial\Omega} s(x, y) \rho(x, y) dx dy), \quad (20)$$

式中, $s(x, y) = \begin{cases} 1, & d(x, y) \geq D_{\text{cov}}, \\ 0, & d(x, y) < D_{\text{cov}}, \end{cases}$ 其中,

D_{cov} 为隐蔽阈值剂量. 同理,可求出需撤离人数 N_{eva} 和最大服碘人数 N_{iod} .

此外,根据人员伤亡数量和危害范围内财产、生态环境分布状况,可以计算出事故本身的总损失.

3.3 应急行动代价参量计算

将待疏散区域划分为若干个待疏散点^[31],定义疏散当量长度为

$$L = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n K_i l_i (1 + \lambda C), \quad (21)$$

其中, m 为待疏散点的总数, n 为该疏散方案中路段个数; K_i 为第 i 条路段的通行难易程度系数,由于多辆车同时行驶,道路通行难易程度系数与途经同一路段的车辆数成正比; l_i 为第 i 条路段的长度; λC 为罚函数.

根据危害范围、危害时间和式(21)的计算结果等数据,计算在疏散过程中需要防护洗消的人员和装备以及警戒、疏散、监测等需要的应急人员和装备. 防护和解除防护时间计算方法如下:

有毒有害物质到达后开始一段时间对人员不会造成危害,当剂量达到某一阈值时,才会对人员造成伤害. 因此,防护时间 t_p 为剂量达到危害阈值所需要的时间. 理论表达式为

$$d(x, y, t_p) = D_{\text{cov}} \quad (22)$$

其中, d 为毒害剂量,单位 $\text{g} \cdot \text{s}/\text{m}^3$; D_{cov} 为危害阈值剂量. 式(22)是扩散模式理论方程的变量,通

过求解扩散模式,可得到毒害剂量达到危害阈值剂量所需要的时间,即防护时间 t_p . 解除防护时间是针对防护人员而言的,当空气中有毒有害物质的浓度低于某一阈值浓度 C_{DP} 时,可以认为不再对暴露人员或无防护人员造成更大的伤害. 因此,解除防护时间为空气中有毒有害物质浓度低于阈值浓度 C_{DP} 的时间 t_{DP} . 理论表达式为

$$c(x,y,t_{DP}) = C_{DP}, \quad (23)$$

其中, c 为浓度,单位 g/m^3 ; C_{DP} 为无危害阈值浓度,单位 g/m^3 . 通过式 (23),可得到空气中有毒有害物质浓度低于无危害阈值浓度所需要的时间,即解除防护时间 t_{DP} .

通过应急处置参量的求解,进一步可计算出应急分队、应急装备、应急消耗物质等应急行动代价的大小. 对于特别重大的核化事故,常用通信设施可能难以满足应急需求,还需应急通信设备.

总之,根据对人员和环境的危害预测,制定合理的事事故源控制、警戒、疏散、监测、防护、洗消、医学救治等应急处置方案,同时将这些关键数据反馈给应急行动代价函数 G_1 , 确认应急分队、应急整备、应急消耗物质等要素的种类和数量,计算应急行动代价. 同样,将人员伤亡和污染区域及其程度计算结果反馈给事故损失函数 G_2 , 为计算事故损失提供关键数据.

4 结束语

核化灾难事故是人类面临的重大威胁之一,如何应对核化灾害是众多学者和社会共同关注的问题. 大气污染核化事故的危害是一个自然科学问题,而应急处置是一个人类活动问题. 自然控制论恰好是将自然规律和人类活动很好地联系在一起的理论方法,也是将预测问题和控制问题统一为一个系统工程问题. 本文针对核化事故应急,给出核化事故应急优化控制的理论框架,建立核化事故优化控制模型,给出优化控制模型参量计算方法,提出事故源控制效率、应急行动代价和事故损失的参数函数具体表达式,进一步给出疏散、防护、人员伤亡等计算方法,将应急控制和事故损失定量化,得出核化事故应急整体最优的控制方案.

参考文献

[1] Chino M, Nakayama H, Nagai H, et al. Preliminary estimation of release amounts of 131I and 137Cs accidentally

discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2011, 48(7):1 129-1 134.

[2] Morino Y, Ohara T, Nishizawa M. Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011 [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38, L00G11, doi: 10. 1029/ 2011GL048689.

[3] Galmarini S, Stohl A, Wotawa G. Fund experiments on atmospheric hazards[J]. Nature, 2011, 473: 285.

[4] 周永增. 切尔诺贝利事故与居民健康[J]. 辐射防护通讯, 1996, 16(4):42-44.

[5] Stone R. Inside Chernobyl [R/OL]. Washington (DC): National Geographic Society, 2006, [2014 -05 -06]. <http://ngm.nationalgeographic.com/2006/04/inside-chernobyl/stone-text.html>.

[6] Yasunaria T J, Stohl A, Hayano R S, et al. Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident [J]. PNAS, 2011, 108(49): 19 530-19 534.

[7] Boybeyi Z, Raman S, Zannetti P. Numerical investigation of possible role of local meteorology in Bhopal gas accident[J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(4): 479-496.

[8] Sharan M, Gopalakrishnan S G. Bhopal gas accident: a numerical simulation of the gas dispersion event [J]. Environmental Modeling & Software, 1997, 12 (2/3): 135-141.

[9] Gupta J P. The Bhopal gas tragedy: could it have happened in a developed country? [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 15: 1-4.

[10] 赵灵敏. 青岛爆炸事故的应急之殇[N]. 华夏时报, 2014, 23:1-2.

[11] 侯瑞宁. 四问爆燃事故[J]. 工程科技 I·安全科学与灾害防治, 2013, 23:26-29.

[12] 黄顺祥,胡非,王自发. 大气扩散在防化领域中的研究进展[J]. 安全与环境学报,2015, 15(1):183 -187.

[13] Claudia L, Jurgen P S, Wolfgang R. The decision support system RODOS[R]. The Risks of Nucled Energy Technology Science Policy Reports, 2014:337-348.

[14] Thomas J S, James S E, Connee S F, et al. Atmospheric release advisory capability: real-time modeling of airborne hazardous materials [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(12): 2 343-2 361.

[15] Imai K, Chino M, Ishikawa H, et al. SPEEDI: a computer code system for the real-time prediction of radiation dose to the public due to an accidental release[R]. JAERI-1297, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokyo, Japan, 1985.

[16] Thatcher M, Robson M, Henriquez L R, et al. User guide version 1.4: chemical hazard assessment and risk management (CHARM) [M]. Charm Implementation

Network, 2005.

[17] Huang S X, Liu P, Chen H P. The potential risk assessment of JACWs based on the monte carlo model[C] //Progress in Safety Science and Technology (Vol. VI), Beijing: Science Press, 2006; 1 362-1 365.

[18] 黄顺祥,陈海平,刘峰,等. 大气污染化学事故危害预测数值模拟(CDM)与验证[J]. 北京大学学报:自然科学版. 2011,47(4):664-670.

[19] Huang S X, Liu F, Liu P. Study on a chemical hazard early warning technology platform[C] //Progress in Safety Science and Technology (Vol. VII), Beijing: Science Press, 2008; 394-398.

[20] Huang S X, Liu F, Zeng Q C, et al. Modeling and optimal control of atmospheric pollution hazard in nuclear and chemical disasters[C]. IUTAM Symposium on the Dynamics of Extreme Events Influenced by Climate Change, Lanzhou, China, Sep. 23-25, 2013.

[21] Zeng Q C. Silt sedimentation and relevant engineering problem—an example of Natural Cybernetics[C] //ICIAM-95 Proceedings of the Invited Lectures Including Prandte Memorial Lecture, Akademik Veclag, Berlin, 1995.

[22] 曾庆存. 自然控制论[J]. 气候与环境研究, 1996, 1(1): 11-20.

[23] Zhu J, Lin C Y, Wang Z F. Dust storm ensemble forecast experiments in East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26 (6): 1 053-1 070, doi: 10.1007/s00376-009-8218-0.

[24] 曾庆存, 吴琳, 洪钟祥. 控制论与人工影响天气 III: 自然控制论在人工增雨作业中的应用框架[J]. 气候与环境研究, 2012, 17 (6):986-990.

[25] 雷恒池, 魏蕾, 曾庆存. 控制论与人工影响天气 I: 人工增雨作业中的正反问题及最优调控[J]. 气候与环境研究, 2012, 17 (6):968-978.

[26] 吴琳, 曾庆存, 洪钟祥. 控制论与人工影响天气 II: 工程控制论在人工增雨作业中的应用与建模[J]. 气候与环境研究, 2012, 17 (6):979-985.

[27] 刘峰, 黄顺祥. 大气环境风险控制的优化理论与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2011.

[28] Marchuk G I. Mathematical models in environmental problems [M]. Holland: Elsevier Science Publishers B V, 1986.

[29] Marchuk G I. Adjoint equations and analysis of complex systems[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.

[30] 黄顺祥, 陈海平, 周学志, 等. 有毒化学品的毒害效果度量方法: 中国, CN1709875-A [P]. 2013-01-02.

[31] 刘峰, 黄顺祥, 陈海平, 等. 一种针对化学风险源的危害事故优化控制方法: 中国, CN101667325B [P]. 2010-12-08.

(continued from page 157)

[4] Rosenberg J. Algebraic K-theory and its applications [M]. Grad Texts in math. New York: Springer-Verlag, 1994: 147.

[5] Alperin R C, Dennis R K, Oliver R, et al. SK_1 of finite abelian groups. II [J]. Invent Math, 1987, 87: 253-302.

[6] Gao Y B, Tang G P. K_2 of finite abelian group algebras [J]. J Pure Appl Algebra, 2009, 213: 1 201-1 207.

[7] Milnor J. Introduction to algebraic K-theory [J]. Annals of math Studies, Princeton Univ Press, Princeton, 1971: 72.

[8] Magurn B A. Explicit K_2 of some finite group rings [J]. J Pure Appl Algebra, 2007, 209: 801-811.

[9] Low R M. On the units of the integral group ring $Z[G \times C_p]$ [J]. Journal of Algebra and its Applications, 2008, 7 (3): 393-403.

[10] Guin W D, Loday J L. Obstruction a l'excision en K-theorie algebrique [J]. Lect Notes Math, 1981, 854: 179-216.

[11] Akhmet'ev P M. K_2 for the simplest integral group rings and topological applications [J]. Sbornik: Mathematics. 2003, 194: 1, 21-29.