

# 露天矿边坡安全管理 SEA 模式及其应用研究

孙厚广<sup>1</sup> 李世海<sup>2,3</sup> 冯春<sup>2,3</sup> 潘鹏飞<sup>1</sup> 郭汝坤<sup>2,3</sup> 乔继延<sup>2,3</sup>

(1. 鞍钢集团鞍千矿业有限责任公司 辽宁 鞍山 114043; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 3. 流固耦合系统力学重点实验室 北京 100190)

**摘要** 提出了工程科学研究者(S)、现场工程师(E)及矿山管理者(A)相结合,借助信息技术共同进行露天矿边坡安全管理的新模式。工程科学研究者主要负责矿区边坡灾害隐患点的排查、监测方案的制定、边坡稳定性的评价及边坡工程治理方案的确定。现场工程师负责矿区边坡的安全巡视、爆破震害的观测、边坡监测仪器的布设及各类现场数据的汇总。矿山管理人员负责组织协调、监督决策及应急抢险工作。基于SEA管理模式,形成了“监测为主、概率分级、状态跟踪、条件预测及成灾模拟”的露天边坡安全防治新理念,并详细阐述了上述理念的科学内涵。在鞍千矿进行了SEA模式的初步尝试,通过现场工程师、科研人员及矿山管理人员的密切配合及无间合作,提升了鞍千矿在边坡安全管理、灾害预测预警及科学防护方面的能力。

**关键词** 露天矿边坡 安全管理 SEA 模式 监测 爆破

中图分类号 TD854.6 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2016)-03-151-05

## Study on SEA Safety Management Mode and Its Application in Open-pit Slope

Sun Houguang<sup>1</sup> Li Shihai<sup>2,3</sup> Feng Chun<sup>2,3</sup> Pan Pengfei<sup>1</sup> Guo Rukun<sup>2,3</sup> Qiao Jiyan<sup>2,3</sup>

(1. Anshan Iron and Steel Group Anqian Mining Co. Ltd. Anshan 114043, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Beijing 100190, China)

**Abstract** A new safety management mode for open-pit slope is proposed. In this mode, scientists of engineering sciences, field engineers and mining administrators are connected together to manage the open-pit slope according to information technology. Scientists of engineering sciences are mainly responsible for the potential risks searching, monitor scheme designing, slope stability evaluation and treatment plan of slope engineering determination. Field engineers are in charge of slope safety inspection, blasting hazards observation, slope monitoring equipment layout and various types of field data collection. Mining administrators preside over the organization and coordination, supervision and decision-making and emergency rescue. Based on such SEA management mode, a new concept for controlling open-pit slope is proposed and the scientific connotation of this concept is introduced in detail. The new concept could be summarized as "monitoring headed, following probabilistic classification, status tracking, forecasting based on conditions, and disaster region simulating". SEA mode is practised preliminary in Anqian mine. According to the close and seamless cooperation among field engineers, scientists and mining administrators, the abilities about slope safety management, disaster early warning and scientific protection are enhanced.

**Keywords** Open-pit slope, Safety management, SEA mode, Monitoring, Blasting

露天矿边坡是露天矿场的构成要素之一,主要指露天矿场四周的倾斜表面,即由许多已经结束采掘工作的台阶所组成的总斜坡<sup>[1]</sup>。随着我国露天矿山开采技术的飞速发展,露天矿的开采境界不断扩大,深度不断增加,边坡的高度和面积也不断加大,由此造成边坡的不稳定因素逐渐增多。

国内外的专家学者通过理论建模、现场监测、原位实验、数值模拟等多种手段对露天矿边坡的稳定

性、潜在失稳模式及工程治理措施进行了大量的研究,取得了丰硕的成果<sup>[2-9]</sup>。爆破是诱发露天矿边坡出现失稳破坏的主要原因,大量学者开展了相关的研究,如谢永生等<sup>[10]</sup>研究了爆破振动对卢安夏穆利亚希铜矿边坡稳定性的影响,并针对性地提出了边坡的防护措施;费鸿禄等<sup>[11]</sup>探讨了爆破能量传播方向与边坡夹角对露天矿边坡稳定性的影响规律;郑炳旭等<sup>[12]</sup>提出了一种露天金属矿山边坡缓冲爆破技术,

收稿日期 2015-12-16

基金项目 国家自然科学基金青年基金项目(编号:11302230) 鞍钢矿业集团项目(编号:2014-科C12)。

作者简介 孙厚广(1982—),男,硕士,工程师。通讯作者 李世海(1958—),男,博士,研究员,博士研究生导师。

可以有效降低爆破对保留区岩体的损伤破坏,维护边坡稳定。

然而,对露天矿边坡安全管理模式的系统研究却少见报道。从目前来看,露天矿边坡安全管理的模式仍然以矿山的相关职能部门为主,这些部门担负着边坡设计参数的确定、边坡安全巡视、边坡稳定性的评价、不稳定斜坡体的监测及治理等多种工作,扮演着设计师、现场工程师、科研人员及工程管理者等多重角色。只有当矿区内出现了较大规模的不稳定斜坡体或发生了较大规模的边坡灾害时,相关职能部门才会聘请相关领域的科研专家进行联合攻关,给出边坡发生失稳破坏的原因,提出补救措施。这些临时性的科研攻关从某种程度上可以解决一些“燃眉之急”,但却无法对矿山边坡的安全进行科学化及常态化的跟踪及管理。相关职能部门兼管理、技术于一身,责任过于集中,往往造成上述部门在应对矿山突发边坡灾害时力不从心。

李世海<sup>[13]</sup>在研究三峡库区自然滑坡的安全管理模式时,提出了专群结合的 CAS 防灾模式,为自然边坡的科学管理指明了方向。本研究以 CAS 模式为基础,结合露天矿的生产实际,提出了工程科学研究者、现场工程师、矿山管理人员相互结合的 SEA 边坡安全管理模式,以期通过责任分离、各挥所长,建立科学、高效、可靠的矿山边坡安全管理体系。

### 1 SEA 模式简介

SEA 模式将露天矿边坡安全管理部门的职责一分为三,由工程科学研究者、现场工程师、矿山管理人员分别承担(如图 1)。工程科学研究者负责矿区边坡灾害隐患点的排查、监测方案的制定、边坡稳定性的评价及边坡工程治理方案的确定,现场工程师负责矿区边坡的安全巡视、爆破震害的观测、边坡监测仪器的布设及各类现场数据的汇总,矿山管理人员负责组织协调、监督决策及应急抢险工作。同时,SEA 模式以信息技术为传输纽带,借助无线通信技术及矿山边坡安全管理系统,将上述力量三合一,充分调动各方面的力量进行边坡安全管理,实现各部分的优势互补,真正做到“分责不分离”。正如 SEA 模式的英文原意,要用“人海战术”实现矿山边坡的无缝管理,真正做到让所有潜在的边坡安全威胁完全暴露在“人民群众的汪洋大海中”。

(1) 工程科学研究者(S: Scientists of engineering sciences)长期从事地学、力学、地理学、信息技术和工程技术的研究,具有综合分析的能力和长期研究经验的积累,并掌握了科学前沿的分析技术和方法。借助现场的大量实测信息及先进的力学分析手段,研究人

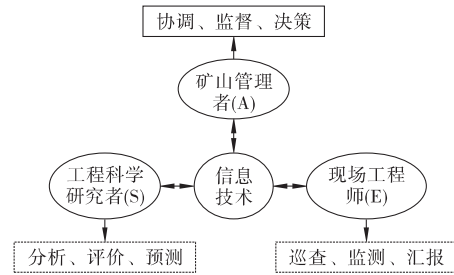


图 1 SEA 模式

Fig. 1 Description of SEA mode

员可以准确给出爆破开采对边坡的影响范围及影响程度、边坡的当前状态及未来的发展趋势,为管理者的决策提供足够的科学依据。

(2) 现场工程师(E: field Engineers)是长期从事露天矿现场工作的技术人员及技术工人,其中包括生产管理人员、技术员、钻机司机、爆破作业人员、电铲司机、汽车司机等。他们的工作地点在矿区现场,与露天矿边坡朝夕相处,能够直接观察到露天矿边坡的变化,提供客观的数据;他们又是边坡灾害的直接受害者,是自己生命财产安全的直接责任人。借助信息技术,可以将现场工程师观测到的各类边坡变形迹象及失稳前兆(如裂缝、局部垮落、滚石、地声等)传输至露天矿边坡安全管理系统,供科研人员及管理部门进行分析决策。

(3) 矿山管理者(A: mining Administrators)包括主管矿山生产安全的经理、生产技术部等。矿山管理者具有调动相关资源进行边坡防护、监测、治理及救灾的能力,具有丰富的边坡安全现场管理经验及多方联合进行边坡防护的协调能力。然而,面对复杂的边坡灾害问题,管理者没有足够的时间和相应的知识结构去分析、认识和掌握灾害发生与发展的规律;遇到问题临时求助于专家的工作程序,无法实现边坡灾害防治的科学化及常态化。

### 2 基于 SEA 的矿山边坡防治新理念

露天矿边坡一旦发生失稳滑坡,轻则导致作业区域掩埋、设备损毁,影响开采进度;重则导致人员伤亡,整个采区停工。因此,对露天矿边坡的安全管理,应本着“以防为主,防大于治”的原则,要确保将潜在的威胁扼杀于萌芽状态。

SEA 管理模式倡导通过现场工程师、科技工作者及矿山管理者的三方配合,共同完成对矿山边坡的安全管理。基于 SEA 的基本模式,逐渐形成了“监测为主、概率分级、状态跟踪、条件预测及成灾模拟”的边坡安全防治新理念。

(1) 监测为主。边坡灾害的发展演化过程,伴随着大量宏观可测物理信息的改变,如地表裂缝、地表

位移、深部位移、地表倾角、岩土体压力、声发射等。通过实时捕捉上述物理信息,可以建立其与边坡成灾演化阶段的映射关系,进而为边坡灾害的预测预报提供必要的基础数据。监测为主,即通过在矿区现场布设大量的人工测量点及一定数量的专业仪器测量点,掌握不同位置边坡的基本状况,捕捉爆破开采对周边岩体及边坡稳定性的影响,并将监测获得的大量数据汇总至矿山边坡安全管理系统。

(2) 概率分级。传统的边坡灾害危险度等级是一个确定的值,“一是一,二是二”。然而,地质体内部的复杂性及不确定性,不可能用一个确定的值对灾害体的危险度等级进行度量。概率分级,即在确定地质体危险度等级时,结合地质体所处地质环境的不确定度及力学指标的不确定度,给出地质体处于该等级的概率范围。经过概率分级,地质体的危险度不再是一个确定的值,而是一个范围。

(3) 状态跟踪。传统边坡灾害的危险度评价往往基于初次勘察获得的岩土力学参数,事实上,随着时间的推移,边坡体内的岩土力学参数将会发生演化。状态跟踪,即根据信息化技术及量化的监测设备,实时获取所监测地质体的各类数据,并采用力学分析系统进行实时反演分析,实时给出地质体当前的岩土力学参数,进而分析出当前的边坡稳定性状态。

(4) 条件预测。传统的边坡灾害预测往往以监测数据为基础,根据各种数学模型或经验公式,直接给出地质体出现失稳成灾的具体日期。由于露天矿边坡失稳成灾往往受外界因素(爆破、降雨、地震等)的影响,如不确认上述因素何时发生以及发生的程度如何,而仅从监测数据的变化趋势进行地质体稳定性的判断,往往会造成漏判、误判现象,难以实现边坡灾害的科学预测。条件预测,即根据给定的外界条件进行地质体稳定性的预测。条件预测的目的并不是给出发生边坡灾害的具体日期,而是给出在什么样的条件下会发生边坡灾害,发生什么样类型的边坡灾害,边坡灾害的程度如何。

(5) 成灾模拟。传统的边坡灾害分析方法(极限平衡法、有限元法等)往往以求取地质体的安全系数为最终目标,安全系数大于 1,地质体即处于稳定状态,安全系数小于 1,地质体即处于非稳定状态。然而,根据国内发生的大量露天矿滑坡,成灾规模的预测是更为重要的。同样是安全系数小于 1 的不稳定地质体,由于成灾规模的不同,造成的人员伤亡及财产损失将会完全不同。成灾模拟,即借助高效的力学分析手段,给出地质体在失稳后的运移解体特性,运移过程中对采场、设备、人员等的破坏作用及灾害体

的最终堆积范围。

### 3 SEA 模式的初步应用

2014 年 4 月以来,鞍钢集团鞍千矿业有限责任公司(以下简称鞍千矿)与中国科学院力学研究所开展了密切合作,双方以“爆破诱发周边岩体损伤破裂及边坡失稳的机理与评价方法研究”项目为依托,以鞍千矿哑巴岭采区为试验场,开展了 SEA 模式的初步尝试,并进行了大量的现场监测、原位试验、室内实验、理论分析及数值模拟等工作。

#### 3.1 边坡稳定性的实时监测

为了分析爆破对边坡稳定性的影响,在哑巴岭采区 36 平台布设了 2 套深部位移监测系统(12 个监测点)及 1 套地表位移监测系统(4 个监测点)。上述监测设备的安装由现场工程师完成,监测数据的分析处理由中国科学院力学研究所完成,鞍千矿生产技术部负责组织、协调工作。

整个监测系统采用太阳能电板及蓄电池联合供电,采用 GSM/GPRS 网络实现数据的远程无线传输,数据自动发射周期为 3 h,数据接收端暂时设在中国科学院力学研究所的监测预警中心。现场设备的安装如图 2 所示。



(a) 深部位移测量管拼接及 MEMS 传感器安装



(b) 自动采集传输设备安装

图 2 现场设备的安装

Fig. 2 Installation of field equipments

#### 3.2 爆破对周边岩体及边坡损伤破裂的影响规律

爆破作用下,周边岩体及边坡将出现不同程度的损伤破坏。中国科学院力学研究所通过钻孔注水现场试验及 CDEM 数值模拟,给出了铁矿的损伤破裂范围为 14 m、岩石的损伤破裂范围为 20 m 的结论,并建立了岩体强度、爆破距离与岩体损伤因子的函数关系,为鞍千矿生产技术部合理制定边坡的安全防护措施提供了依据。

图 3 为钻孔注水试验现场数据采集照片,图 4 为爆破作用下顺层台阶边坡发生失稳破坏的数值模拟

结果。



图 3 钻孔注水试验现场数据采集  
Fig. 3 Site data collection of borehole water injection experiment

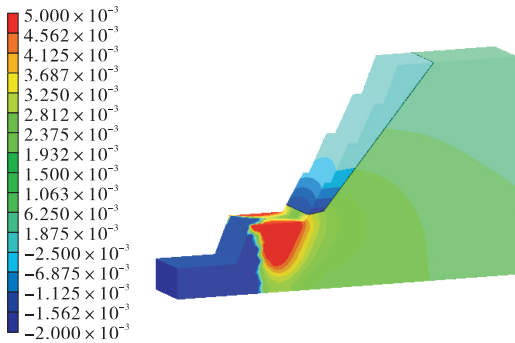


图 4 爆破作用下顺层台阶边坡的失稳滑移过程  
Fig. 4 Sliding process of bedding rock slope under blasting load

爆区周边岩体损伤因子的计算公式如下。

$$\left. \begin{aligned}
 D &= a \times e^{-br} \\
 a &= 93.03 - 85.38\sigma_t^{0.02967} - 85.25c^{0.04617} \\
 &\quad + 79.45\sigma_t^{0.02967}c^{0.04617} \\
 b &= 21.58 - 20.66\sigma_t^{0.0365} - 19.69c^{0.04955} \\
 &\quad + 18.95\sigma_t^{0.0365}c^{0.04955}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

其中  $D$  为损伤因子;  $\sigma_t$  为抗拉强度, MPa;  $c$  为黏聚力, MPa;  $r$  为爆破距离, m。

### 3.3 露天矿爆破作业及边坡防护的基本原则

经过大量的科学研究,并与现场实际的组织管理程序相结合,鞍千矿生产技术部与中科院力学所联合提出了爆破作业及边坡防护时应遵循的一般原则。

(1) 靠帮爆破时应采用预裂爆破的形式,减少后排炮孔对边坡的冲击效应,预裂爆破的炮孔应遵循小孔径、密间距的原则。此外,也可以在爆区与边坡之间钻凿不装药的防震孔,也可以起到较好的降震效果。

(2) 建议安全平台与清扫平台合一,节理发育区的安全平台宽度应不小于 10 m,完整岩体区的安全平台宽度应不小于 6 m。

(3) 应及时对台阶边坡表层的松散岩体进行清理,以防松散物垮落后造成人员及设备的损毁。

(4) 对存在失稳滑动迹象的边坡应及时采取避让措施,调整开采计划,绕过不安全区段;此外,应对

坡体内部的声发射情况、坡体表面的变形情况进行监测,了解潜在滑坡体所处的灾变阶段。

(5) 爆破设计时,应选择好最小抵抗线的方向。由于在最小抵抗线方向上的振动最小,反向最大,侧向居中,因此,从减震和控制飞石的方面考虑,应该使保留的台阶边坡位于最小抵抗线的两侧位置。

(6) 合理选择孔网参数及起爆顺序。建议采用等边三角形布孔(炮孔密集系数  $m$  值取 1.15),矿石区域的孔间距宜选为 6~7 m,岩石区域的孔间距宜选为 7~8 m。建议采用逐孔起爆的方式,降低同段药量,并限制每次爆破的孔数;在保证爆区内岩体破碎效果的前提下,应适当增大孔间及排间的延时,防止不同炮孔爆炸应力波的叠加,减少爆破对后方岩体及边坡的振动。

(7) 在节理发育地区进行爆破作业时,应对爆破引起的振动情况进行测试,以便合理评估爆破对周边岩体及边坡稳定性的影响。

### 3.4 SEA 模式的初步应用效果

经过 1 a 多的努力,在现场工程师、工程科学研究者及矿山管理者的共同努力下,SEA 模式有了初步的进展,并在具体技术上取得了一定的成果。

(1) 提出了 3 种测试爆区周边岩体损伤破裂程度的方法,分别为钻孔注水测试周边岩体损伤场的方法、钻孔落锤测试周边岩体等效破裂场的方法及锤击实验测试岩体结构面损伤特性的方法。借助上述 3 类测试方法,可以实现爆破损伤场、破裂场的定量化描述,为边坡稳定性分析提供准确的输入参数,进而实现边坡防护措施的最优设计。

(2) 提出了爆区周边岩体损伤因子的计算公式。利用该公式,可以准确分析爆破对周边岩体的损伤深度、损伤程度及损伤范围。基于该公式获得的爆区后方岩体损伤因子的空间分布,可为后续的爆破设计及边坡防护提供依据。

(3) 提出了基于 CDEM 的边坡稳定性评价方法。利用该方法,鞍千矿的技术人员可以准确获得不同起爆顺序、不同孔网参数、不同装药结构对边坡稳定性的影响,而后获得边坡表面、内部的破裂度随爆破次数的演化规律,进而给出当前状态下边坡的稳定状态及潜在灾变模式。该方法为边坡爆破稳定性的科学评估提供了依据,使得现场的爆破设计及边坡防护有理可依、有据可循。

## 4 结 论

SEA 边坡安全管理模式以信息技术为纽带,通过现场工程师、科技工作者及矿山管理者的三方配合,共同完成对矿山边坡的安全管理。“监测为主、概率

分级、状态跟踪、条件预测及成灾模拟”是 SEA 模式中进行边坡安全防治的基本理念,该理念通过现场监测与力学分析的结合,可有效提升边坡稳定性分析的精度及边坡预测的准确度。

鞍千矿生产技术部通过与中科院力学所的合作研究,初步践行了 SEA 的管理模式,在具体的技术上取得了一定的进展。当然,露天矿边坡的安全管理是一项长期而复杂的任务,SEA 模式也需通过长期而大量的管理实例进行验证、校核及完善。

#### 参 考 文 献

- [1] 侯德义. 矿山地质学[M]. 北京:地质出版社,2006.  
Hou Deyi. Mining Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House,2006.
- [2] 李 炼,陈从新,徐宜保,等. 露天矿边坡的位移监测与滑坡预报[J]. 岩土力学,1997,18(4):69-74.  
Li Lian, Chen Congxin, Xu Yibao, et al. Displacement monitoring and landslide forecast on the rock slope of open-pit mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(4): 69-74.
- [3] 李 胜, 邱珂瑞, 韩永亮, 等. 海州露天煤矿边坡变形监测系统[J]. 金属矿山, 2015, 44(9): 126-130.  
Li Sheng, Wu Kerui, Han Yongliang, et al. Slope Deformation Monitoring System of Haizhou Open-pit Mine [J]. Metal Mine, 2015, 44(9): 126-130.
- [4] 于庭安,戴兴国. 露天矿边坡稳定性的安全因素分析[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(1): 73-76.  
Yu Ting'an, Dai Xingguo. Analysis on safety factors of open-pit slope stability [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(1): 73-76.
- [5] 丁立明,才庆祥,刘 雷,等. 软弱夹层对露天矿边坡稳定性的影响[J]. 金属矿山, 2012(4): 40-42.  
Ding Liming, Cai Qingxiang, Liu Lei, et al. Effect of weak interlayer on slope stability of open-pit mine [J]. Metal Mine, 2012(4): 40-42.
- [6] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等. 露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1437-1472.  
Yang Tianhong, Zhang Fengchun, Yu Qinglei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1437-1472.
- [7] 王来贵,习彦会,刘向峰,等. 露天矿边坡工程系统演化过程[J]. 露天采矿技术, 2014(12): 10-14.  
Wang Laigui, Xi Yanhui, Liu Xiangfeng, et al. Evolution process of slope engineering system in open-pit mine [J]. Opencast Mining Technology, 2014(12): 10-14.
- [8] 师文豪,杨天鸿,王培涛,等. 露天矿边坡岩体稳定性各向异性分析方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1924-1933.  
Shi Wenhao, Yang Tianhong, Wang Peitao, et al. Anisotropy analysis method for stability of open-pit slope rock mass and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1924-1933.
- [9] 刘 泉. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件的极端恶劣环境下边坡稳定性分析[J]. 金属矿山, 2015(8): 143-146.  
Liu Quan. Slope stability analysis under extreme Conditions based on FLAC<sup>3D</sup> Software [J]. Metal Mine, 2015(8): 143-146.
- [10] 谢永生,吴顺川,刘 洋. 爆破振动对卢安夏穆利亚希铜矿边坡稳定性影响分析[J]. 有色金属工程, 2014, 4(6): 61-64.  
Xie Yongsheng, Wu Shunchuan, Liu Yang. Analysis of slope stability affected by blasting vibration in Muliashi Copper Mine in Luan-shya [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2014, 4(6): 61-64.
- [11] 费鸿禄,王素宁,夏英杰,等. 爆破能量传播方向与边坡夹角对露天矿边坡稳定性的影响[J]. 爆破, 2012, 29(1): 1-4.  
Fei Honglu, Wang Suning, Xia Yingjie, et al. The influence to the slope stability about the angle between the slope and blasting energy propagation direction [J]. Blasting, 2012, 29(1): 1-4.
- [12] 郑炳旭,张光权,宋锦泉,等. 露天金属矿山边坡缓冲爆破技术优化研究与应用[J]. 爆破, 2013, 30(2): 7-11.  
Zheng Bingxu, Zhang Guangquan, Song Jinquan, et al. Optimization research and application of slope cushion blasting technology in open-pit iron mine [J]. Blasting, 2013, 30(2): 7-11.
- [13] 范宏喜. 加强地质灾害易发区致灾机理模式研究——西部复杂山体重大地质灾害学术论坛综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 140-142.  
Fan Hongxi. To strengthen the formation mechanism study of geological disasters: an overview of the academic forum for major geological disasters in western complex mountain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3): 140-142.

(责任编辑 徐志宏)