

文章编号: 1000-7598-(2008)05-1310-05

# 露天与地下联合开采引起岩层 移动规律的模型试验研究

黄平路, 陈从新

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘 要:** 非法开采对矿山开采稳定性具有重要影响, 以某铁矿为例, 进行了二维物理相似模型试验研究, 分析得出了在考虑和不考虑非法开采两种情况下的地表变形规律和矿体围岩移动规律。试验结果表明, 从-270 m 采至-550 m 水平期间, 地表沉降和围岩变形呈缓慢增加趋势, 但当从-550 m 水平继续向下开采时, 由于矿体倾角变得平缓, 地表沉降、深部围岩变形都急剧增加, 非法开采会造成矿体上部岩体的应力重分布, 虽没有明显增大地表的沉降范围, 但增加了开采点附近的地表沉降量, 而且大大增大了地表岩层的水平移动。

**关 键 词:** 模型试验; 非法开采; 地下开采; 岩层移动; 露天与地下联合采矿

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

## Model test study on rock movement caused by open-underground combined mining

HUANG Ping-lu, CHEN Cong-xin

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Illegal mining has a great influence on stability of mines. Based on the prototype of the representative metal mine, two-dimensional physical simulation model test on an underground iron mine is carried out. The regulations of surface deformation and surrounding rock movement with or without illegal mining are obtained respectively. Results obtained indicate that when ore between -270 m and -550 m are excavated, the subsidence of surface and deformation of surrounding rock increase slowly. But when ore below -550 m are excavated, the subsidence of surface and deformation of surrounding rock increase quickly because the obliquity of orebody become smaller. Because of stress redistribution caused by illegal mining, the size of surface subsidence increases near surface gob and horizontal displacement of surface increases greatly; but the range of surface subsidence almost has no change.

**Key words:** model test; illegal mining; underground mining; rock movement; open-underground combined mining

## 1 引 言

矿山地下开采引起的地表变形涉及到地表构筑物的安全使用与保护问题, 因此, 在矿山具体地质条件下按照设计的采矿方法、采矿工艺以及技术参数进行地下开采时, 研究并预测地表的变形问题成为研究地表保护对策的基础。文献[1]对地下采矿引起的地表下沉类型及其机制进行了比较系统的研究, 文献[2]研究了地下平行矿体开采引起的地表沉降规律, 文献[3]和文献[4]利用模型试验方法分别研

究了开采倾斜地表矿体和开采厚覆盖岩层条件下地下矿体的地表和围岩变形移动规律。随着国民经济的发展对矿产资源需求的不断增长, 矿石开采的利润也越来越大, 这就引起了非法开采的出现。非法开采是指没有通过国家相关部门批准, 在毫无技术指导的情况下在矿体埋藏比较浅、易开采的地方对矿体进行直接开采, 由于其在开采过程中没有考虑对围岩安全稳定性等因素而进行滥采, 对矿山的地下开采的稳定性具有重要影响, 因此, 有必要对非法开采对岩层移动规律的影响研究。本文以某金属

收稿日期: 2007-08-23

作者简介: 黄平路, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: hp1980@163.com

矿山为例, 通过物理相似模型试验研究了地表非法开采与地下采矿共同作用下矿区的岩层移动规律与地表变形规律。该铁矿东区拟采用崩落法开采, 在  $-270\text{ m}$  水平起采, 开采深度为  $-690\text{ m}$ , 阶段高度为  $70\text{ m}$ , 采矿预计年下降速度为  $14\text{ m}$ 。在矿东区的开采主要有 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>两个非法开采点, 现已从地表露头矿体采到  $-130\text{ m}$  水平, 如图 1 所示, 总回采矿量约为 100 万吨。由于无法得到非法开采的详细情况, 模拟非法开采时, 认为非法开采是由地表开始, 沿矿体垂直向下开采。本次试验研究的主要内容是综合分析开采现状, 确定了  $-340$ ,  $-410$ ,  $-480$ ,  $-550$ ,  $-620$ ,  $-690\text{ m}$  共 6 个水平回采结束时矿体围岩的移动规律和地表变形规律。

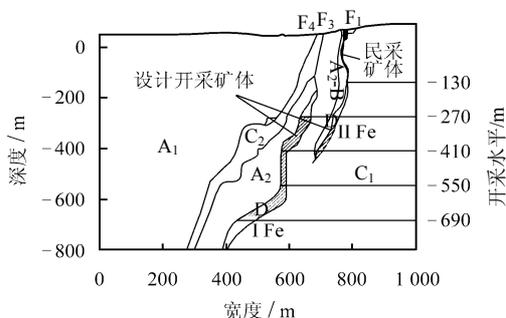


图 1 32<sup>#</sup>剖面地质图

Fig.1 Geological profile of section No. 32

## 2 模型试验概况

### 2.1 试验设计

为研究非法开采和地下开采共同作用下岩层移动和地表变形规律, 以典型剖面为例, 进行了平面应力条件下的物理相似模型试验。模拟范围是根据先前所做的移动角、陷落角研究预估的开采影响范围, 并在水平和垂直方向上分别做适当延伸确定的。模拟剖面所取范围水平方向长度为  $1\ 200\text{ m}$ , 垂直方向从地表至  $-800\text{ m}$  水平。结合现有试验条件, 模型试验的几何相似常数:  $C_1 = 600$ ,  $C_r = 1$ 。模型试体尺寸 (宽 $\times$ 高 $\times$ 厚) 为  $200\text{ cm}\times 150\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ , 模型直立<sup>[5]</sup>。

根据矿体及围岩的实际情况, 本次试验主要进行了角页岩 (A)、大理岩 (B)、闪长岩 (C) 以及矿体 (D) 等岩类以及断层  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  的模拟。试验中, 根据岩体质量差别, 将同级岩体适当合并, 最终把岩体分为 D、 $C_1-C_2-A_1$ 、 $A_2-B$  三类, 其物理力学参数见表 1。 $F_1$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  按同样性质进行模拟, 其凝聚力为  $0.18\text{ MPa}$ , 内摩擦角为  $26^\circ$ 。根据已确定的相似比和各岩类的物理力学参数, 可求得

各岩类的相似材料的物理力学参数。在进行材料配比试验时, 考虑到要制作重度比较大的相似材料, 经过了近千组不同组分的配比试验, 最终选用重晶石粉、铁粉、甘油和水 4 种材料, 按不同配比作为 3 种岩类的模拟, 并用所研制的相似材料夹双层绘图纸作为  $F_1$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  断层的相似材料<sup>[6]</sup>。

表 1 拟模拟岩类的主要物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rocks

岩类	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	变形模量 $E_s/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	单轴抗压强度 $\sigma_c/\text{MPa}$
$C_1-C_2-A_1$	27	20	0.25	65~80
$A_2-B$	26	6.0	0.3	50
D	34	4.0	0.35	40~50

### 2.2 试验监测

由于相似材料的强度很低, 量测模型试体中应力难度很大, 本次试验主要量测采矿过程中地表及上、下盘岩体中的位移。位移测量采用数码相机数字化近景摄影测量和百分表测量两种方法, 二者平行使用, 相互校验, 确保试验结果更可靠。

百分表观测: 由于地表变形是试验关注的重点, 所以在模型体表面重要部位从左到右布置了编号 0~10 共 11 个测点, 如图 5 所示, 共 21 个百分表 (其中 0~9 号共 10 个测点每个点安装水平和垂直百分表各一个, 10 号测点仅安装垂直百分表一个)。测量标点布置之前, 先在安装位置用螺丝刀轻轻钻一个约  $5\text{ cm}$  深的小孔, 倒入少量石膏, 然后将带有钉子的有机玻璃标点直接扎入空中, 这样测量标点将随着石膏的凝固而稳固。百分表安装在独立于模型体及反力系统以外的工字钢钢架上。

数码相机数字化近景摄影测量: 用百分表等有接触式量测位移的方法测点有限, 难以测到全场位移。数码相机数字化近景测量是一种非接触式量测, 具有无损模型、光路简单、可测较大范围的全场位移、摄像记录的信息可以永久保存、随时提取、设备简单、操作方便、对环境条件要求低、自动化程度较高、精度较高等优点。本次近景摄影方法所使用的设备是: 高分辨率数码相机 (Kodak DCS Pro SLR/n 型单反数码相机, 配 Nikon 28 mm 镜头, CMOS 芯片大小为  $36\text{ mm}\times 24\text{ mm}$ , 影像分辨率  $4\ 500\text{ pixel}\times 3\ 000\text{ pixel}$ , 像元大小为  $8\ \mu\text{m}$ )。

为了反映出模型的整体变形情况, 在模型上按照设计要求共布设了 215 个监测点, 并分别贴上人工标志, 模型架上布置了 22 个控制点, 如图 2 所示。

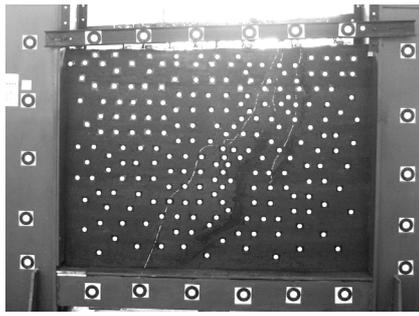


图2 百分表及近景摄像测量测点布置示意图

Fig.2 Layout of dial gauges and measuring marks

### 2.3 试验开挖模拟

首先安装好所有的百分表，在模型体正面粘贴上数码相机的测量标志点，然后测读并记录各自的初始读数。记录完读数后，即可开始开挖。为了比较分析有或无非法开采两种情况下地下开采引起地表及岩层的移动情况，决定先进行地下开采的模拟，再进行非法开采的模拟，不仅得到了无非法开采情况下地下开采引起岩层的变化情况，而且得到了非法开采与地下开采共同作用下岩层的变化情况。虽然这种处理与实际情况有所差别，但它能够在一定程度上反映非法开采对岩层移动影响的规律性，且节省了试验成本与时间，具体的开挖步骤见表2。每完成一步开挖，就相应对百分表读数进行一定频率的测读。

表2 开挖步骤表  
Table 2 Process of digging

开挖步骤 / 步	矿体	开挖范围 / m	开挖步骤 / 步	矿体	开挖范围 / m
1	I 和 II	-270~-298	8	I	-508~-550
2	I 和 II	-298~-340	9	I	-550~-578
3	I 和 II	-340~-368	10	I	-578~-620
4	I 和 II	-368~-410	11	I	-620~-648
5	I 和 II	-410~-438	12	I	-648~-690
6	I	-438~-480	13	II	地表~-130
7	I	-480~-508			

## 3 试验结果分析

按照设计开挖步骤进行开挖，经过一个多月的时间，得到模型随开挖的变化过程与结果。主要有：

(1) 各百分表测点位移与开挖步骤关系图，如图3和图4所示。(2) 地表随开挖步骤的下沉曲线图，如图5所示。(3) 各阶段或非法开采开挖完后，模型的变化示意图(图6和图7为典型的模型变化示意图)。(4) 近景摄像测量得到的各阶段或非法开采开挖完后模型全场位移矢量图如图8和图9所示。

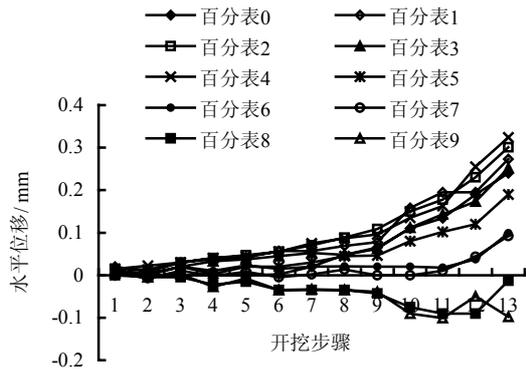


图3 地表测点水平位移与开挖步骤曲线图

Fig.3 Relationship curves between surface's x-displacement and excavation steps

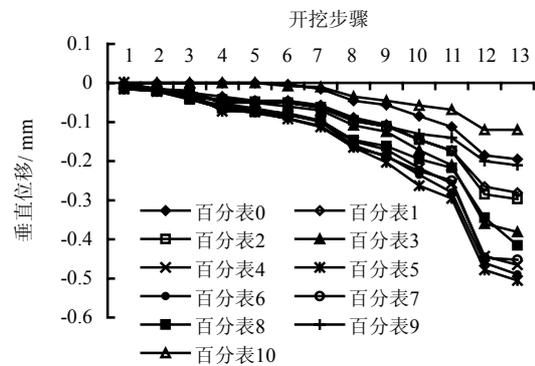


图4 地表测点垂直位移与开挖步骤曲线图

Fig.4 Relationship curves between surface's subsidence and excavation steps

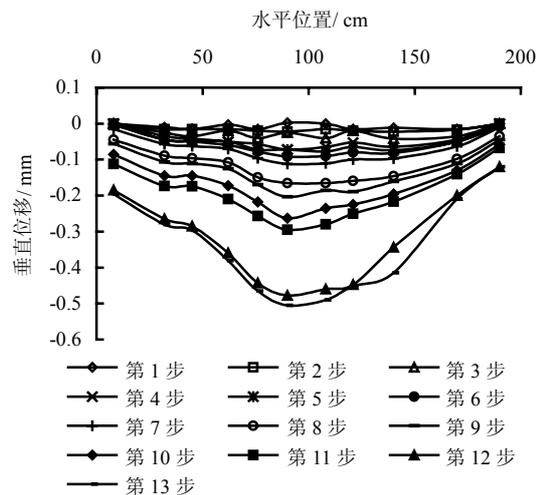


图5 百分表测点的地表下沉位移曲线

Fig.5 Curves of surface's subsidence by dial gauges

### 3.1 地表陷落随开挖步骤的变化规律

从图3~5可以看出，从-270 m 逐步向下采矿，地表下沉位移越来越大，在开挖至-550 m 之前，即第8步之前，由于矿体倾向变化不大，地表下沉呈缓慢增加趋势，尤其是在采矿的开始阶段，

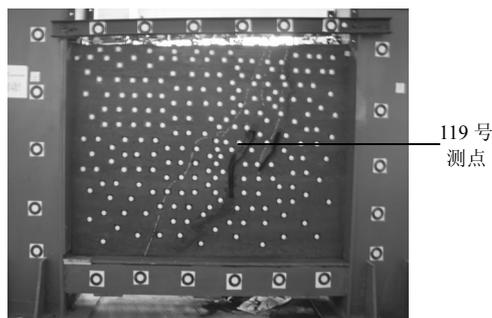


图 6 第 8 步开挖结束后模型变形照片  
Fig.6 Photograph of model after eighth step

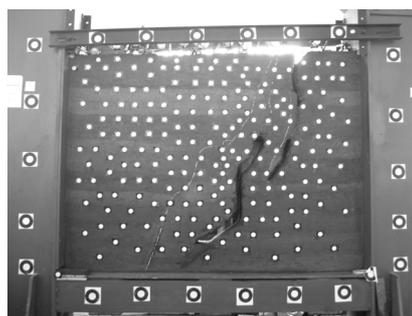


图 7 模型最终变形照片  
Fig.7 Photograph of model after the last step

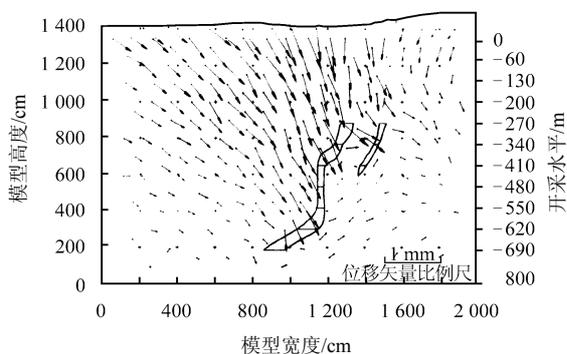


图 8 第 8 步开挖结束后模型全场累计位移矢量图  
Fig.8 Accumulative full-field displacement vector diagram of the model after eighth step

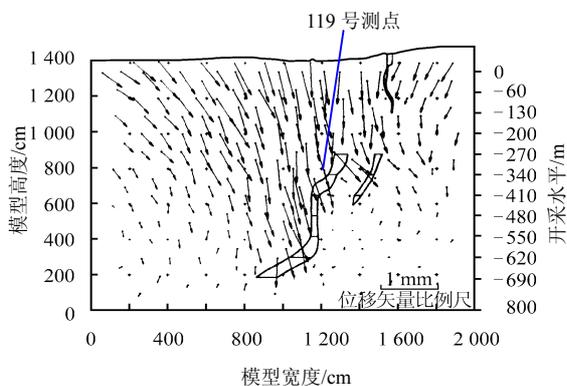


图 9 模型试验开挖结束后全场累计位移矢量图  
Fig.9 Accumulative full-field displacement vector diagram of the model after the last step

即第 1 步至第 4 步开挖，地表并没有发生明显的变化，说明相对于地下采矿而言地表的变形具有明显的滞后性，其时间效应十分明显，且具有显著的流变特性。从第 8 步开始，由于 -550~ -690 m 期间矿体倾角变缓，地表随着开挖沉降的速度加快，尤其在 -620~ -690 m 之间的矿体开挖完以后，地表在该阶段的沉降大小比前面各阶段开挖引起地表的沉降值都要大，由 -0.295 mm 增大到 -0.475 mm，增加了 -0.18 mm。虽然第 13 步非法开采造成地表的沉降不是很大，地表的水平变形明显增加，最大水平位移由 0.250 mm 增加到 0.310 mm，增加了 0.06 mm，而靠近非法开采采空区的 8 号百分表的水平位移增大了 0.079 mm，可见无论是沉降，还是水平位移，上盘都明显大于下盘。开挖完毕后，整个模型地表最大水平位移和最大沉降分别为 0.280，0.515 mm，相当于原型的 0.168 和 0.309 m，分别位于离模型左侧框架 47 cm 和 91 cm 处。

### 3.2 内部岩层的移动规律

从各开挖步骤完成后的全场位移矢量图可以看出，每个开挖步骤完成后上部岩层的变形是逐渐传递到地表的，离采空区愈近，岩层的变形愈大，并且上下盘的岩体均向采空区移动。从摄像测量结果可以看出，每一步开挖完成以后，模型内位移最大的点都是位于采空区附近的上盘围岩，例如第 13 次开挖步骤完成后，位移最大点位于 119 号测点，沉降最大值为 -0.708 mm，采空区附近上盘的岩体是整个区域当中变形的最大部位，整个模型最后的沉降曲线形状如偏漏斗形，同时由模型位移矢量图可以发现，上盘的移动范围明显大于下盘。

### 3.3 非法开采的分析

第 12 步开挖结束后，开始进行非法开采的模拟，即沿着 II 号矿体从地表开始开挖，直至 -130 m 水平，此时非法开采采空区附近的 8 号百分表测点的水平位移和沉降增量分别达到了 0.114 mm 和 -0.185 mm，可见非法开采使得其采区附近的岩体水平位移大大增加，附近地表会产生很大的拉伸变形，如果继续非法开采，极有可能造成非法开采采空区和地下开采形成的采空区相通，使得整个上盘岩体由于与下盘岩体之间无支撑而产生较大变形甚至破坏。

## 4 结 论

通过对该金属矿山东区地下开采典型剖面的物理相似模型试验和研究分析，得出了如下结论：

(1) 试验既模拟了所选断面复杂的地质条件, 又较逼真地模拟了分段崩落法的采矿过程。

(2) 本次试验所研制的 4 类相似材料性能稳定, 其主要物理力学指标的理论值与实测值较为接近, 能较好地模拟矿区主要地层岩性和地质构造, 这是模型试验成功的关键。

(3) 无论是在沉降, 还是水平位移上盘岩体都明显大于下盘岩体。

(4) 在从 -270 m 采至 -550 m 水平期间, 地表沉降、围岩变形呈缓慢增加趋势, 但当从 -550 m 水平继续向下开采时, 由于矿体倾向变得平缓, 地表沉降、深部围岩中的变形都急剧增加。

(5) 非法开采对其采空区附近岩体的变形造成了很大影响, 尤其是使水平位移增大很多, 使得附近岩体产生了拉伸变形甚至破坏。

(6) 地表的变形相对于地下采矿而言具有明显的滞后性, 其时间效应十分明显, 具有明显的流变特性。

(7) 本次试验反映了该矿东区地下开采引起的岩层移动与地表变形过程, 其结果对现实情况具有重要的指导作用。

### 参 考 文 献

- [1] BRADY B H G, BROWN E T. Rock Mechanics for Underground Mining[M]. London: George Allen Unwin, 1985.
- [2] 蔡嗣经, 陈清运, 明世祥. 金山店铁矿平行矿体地下开采地表沉降物理模拟预测研究[J]. 中国安全生产科学

技术, 2006, 2(5): 13—19.

CAI Si-jing, CHEN Qing-yun, MING Shi-xiang. Study on subsidence prediction of underground mining of parallel ore bodies in Jinshandian mine by physical modeling[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, 2(5): 13—19.

- [3] 陈陆望, 白世伟, 李一帆. 开采倾斜近地表矿体地表及围岩变形陷落的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 885—889.

CHEN Lu-wang, BAI Shi-wei, LI Yi-fan. Model test study on deformation and subsidence of ground surface and surrounding rock caused by exploiting inclining mine near surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 885—889.

- [4] 任伟中, 白世伟, 孙桂凤, 等. 厚覆盖岩层条件下地下采矿的地表变形及围岩变形特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 24(21): 3 935—3 941.

REN Wei-zhong, BAI Shi-wei, SUN Gui-feng, et al. Research on deformation and subsidence characters of ground and surrounding rock induced by underground mining thick covering terrain by model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 935—3 941.

- [5] 林韵梅. 试验岩石力学——模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 46—49.

- [6] 陈从新, 肖国峰, 黄平路, 等. 武钢金山店铁矿东区地表移动规律与地表构筑物安全对策研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.

### 穿黄工程上游线隧洞盾构机正式掘进

2008 年 3 月 15 日, 穿黄工程参建各方齐聚上游线隧洞施工现场, 各施工面通过对讲机不断向主操控室报告各个系统调试完成的信息。9 点整, 随着现场指挥人员一声令下, 盾构机操作人员启动按钮, 穿黄工程上游线隧洞盾构机正式掘进。

穿黄隧洞采用双洞平行布置, 隧洞轴线间距为 28 m, 两条隧洞结构相同, 单洞成型直径 7 m。根据黄河流向, 两条隧洞分别命名为上游线隧洞和下游线隧洞。穿黄工程上游线隧洞盾构掘进, 标志着穿黄隧洞施工全面展开, 穿黄工程建设进入全新阶段。

穿黄工程两条隧洞采用两台盾构机平行掘进, 下游线隧洞盾构掘进目前完成 80 多米, 上游线隧洞之所以选择在这个时间开始掘进, 是为工程施工安全的需要, 也是工程进度总体安排的需要。两台盾构机在轴线间距 28 m 的情况下, 尤其是在有着 40 多米水压的条件下, 两台盾构机施工相互会有扰动, 两台盾构机沿隧洞径向必须保持一定的安全距离。下游线隧洞盾构机正在安装后配套台车, 上游线盾构机这时掘进可以综合安排外方施工人员工作, 并且可以使得盾构机后配套台车安装和盾构掘进都高效、有序的进行。

2008 年是穿黄工程建设关键的一年, 根据进度计划安排, 两条隧洞要各完成 1000 多米的盾构掘进施工, 南北岸渠道的土方施工要全部完成, 渠道要开始混凝土衬砌施工, 另外南、北岸渠道的 11 座跨渠建筑物要全部建成。伴随着穿黄工程上游线隧洞的正式掘进, 穿黄隧洞施工全面展开。黄河南北两岸的各施工现场, 到处都是热火朝天的施工景象, 穿黄工程建设进入了一个全新的阶段。

(信息来源: 河海岩土网, 编辑部编辑)