

文章编号: 1000-7598-(2007)01-0133-06

# 岩盐溶开采沉陷新概率积分三维预测模型研究

任 松<sup>1,2</sup>, 姜德义<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 蒋再文<sup>3</sup>(1.重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;  
2.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 3.重庆高速公路发展公司东南分公司, 重庆 400060)

**摘 要:** 开采沉陷的准确预测是减小和杜绝开采沉陷灾难发生的前提, 传统概率积分法难以应用于岩盐溶开采复杂条件下的地表沉陷预测。因此, 充分考虑上覆岩层在复杂地质条件下可能表现出来的各向异性、岩盐溶腔的不规则性, 建立了新概率积分三维预测模型; 并从力学角度, 对三维预测模型的参数进行了研究, 获得了模型参数与上覆岩层力学参数之间的关系。该模型能够对复杂地质条件和不规则采空区引起的地表沉陷进行较为准确地预测。

**关 键 词:** 岩盐溶腔; 开采沉陷; 新概率积分; 预测模型

**中图分类号:** TD 8

**文献标识码:** A

## Study on a new probability integral 3D model for forecasting solution mining subsidence of rock salt

REN Song<sup>1,2</sup>, JIANG De-yi<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>2</sup>, JIANG Zai-wen<sup>3</sup>(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;  
3. The Southeast Branch, Chongqing Expressway Development Company Ltd, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** Forecasting the mining subsidence is a prerequisite for reducing or preventing the mining subsidence tragedy. But it is hard to apply the traditional probability integral to forecasting the complex solution mining subsidence. So sufficiently considering the anisotropic overburden under complex geological conditions and the irregular rock salt cavern, a new probability integral 3D forecast model is created. And the parameters of 3D forecast model are studied from mechanics angle; and the relation between the model parameters and overburden mechanical parameters is got. The model can exactly forecast the mining subsidence that is caused by complex geological conditions and the irregular working out area.

**Key words:** rock salt cavern; mining subsidence; new probability integral; forecast model

## 1 引 言

开采沉陷是矿产地下开采的严重灾害之一, 统计显示<sup>[1]</sup>开采沉陷对环境造成的损害已超过地震等自然灾害。

开采沉陷预测方法可归为两大类: 一类是以地表移动作为研究对象, 不考虑岩体特性的唯像学理论模型; 另一类是以力学原理为基础的正演法和反分析法。第 1 类方法, 选用的参数, 物理意义不明确, 很难反映岩层内部的移动规律, 不适用于复杂地质条件和复杂采空区的地表沉陷预计。第 2 类方

法, 能对岩层移动过程做出解释, 计算中所需参数有各自的物理意义, 概念比较清楚。但由于岩体结构及其力学行为、开采实际条件非常复杂, 目前还没有成熟的计算岩体力学性态的模型和方法。因此, 在岩盐溶开采复杂条件下的开采沉陷预计是一个难题。鉴于此, 本文综合唯像学理论模型和力学模型的优点, 在唯像学理论模型中引入力学参数, 建立了新的三维预测模型, 能对复杂地质开采条件和不规则采空区引起的地表沉陷进行较为准确地预计。为了区别, 本文将新建立的模型称为新概率积分三维预测模型。

收稿日期: 2005-08-12

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No.50334060), 国家自然科学基金资助项目 (No. 50674108)。

作者简介: 任松, 男, 1975 年, 博士, 讲师, 从事岩土工程力学方面的教学和科研工作。E-mail: RS\_rwx@tom.com

## 2 单元开采引起地表下沉的新概率积分三维计算公式

理论和实验证明, 开采引起的岩层和地表移动的规律与作为随机介质的颗粒介质模型所描述的规律在宏观上基本相似。

可构造一个随机介质的三维模型, 如图 1。在该三维理论模型中, 将一个方格的小球移走后, 上一层相邻 4 个方格内的小球, 将有一个随机滚入该方格, 其概率是 1/4。这样根据概率相乘和相加定理, 可以计算出每层中各小球因下一层小球被移走后而掉入下一层的概率分布, 将该概率填入每层小球的方格中, 形成每层概率分布图 (图 2)。

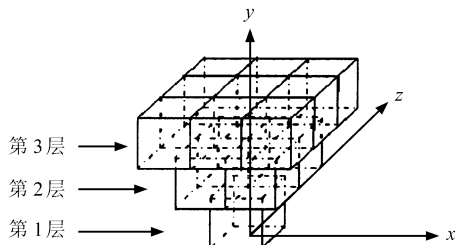


图 1 随机介质三维理论模型

Fig.1 The 3D theory model of random media

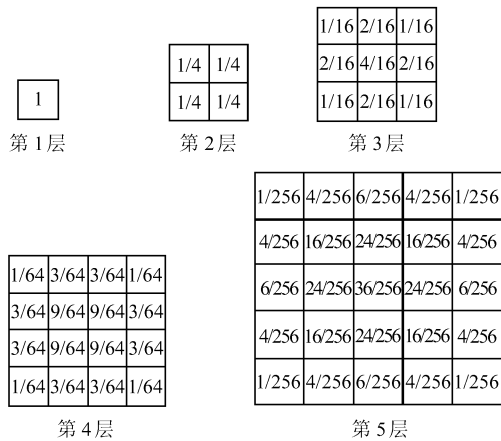


图 2 三维模型每层概率分布图

Fig.2 The motion probability of random media in 3D mode

现在, 取任意相邻的 5 个小球为研究对象, 图 1 中的任意 5 格相邻的格子 A、B、C、D、E, 设格子的长、宽、高分别为 a、b、c, 则它们的中点坐标分别是  $(x, y, z+c)$ 、 $(x+\frac{a}{2}, y+\frac{b}{2}, z)$ 、 $(x+\frac{a}{2}, y-\frac{b}{2}, z)$ 、 $(x-\frac{a}{2}, y-\frac{b}{2}, z)$  和  $(x-\frac{a}{2}, y+\frac{b}{2}, z)$ , 组成图 3 的三维随机游动模型。

若格子 B、C、D、E 中的小球都被移走后, 格子中均出现空位, 则格子 A 中的小球在自重作用下可能向 B、C、D、E 空位移动, 其概率均为 1/4。

设  $P(x, y, z+c)$ 、 $P(x+\frac{a}{2}, y+\frac{b}{2}, z)$ 、 $P(x+\frac{a}{2}, y-\frac{b}{2}, z)$ 、 $P(x-\frac{a}{2}, y-\frac{b}{2}, z)$  和  $P(x-\frac{a}{2}, y+\frac{b}{2}, z)$ , 分别表示图 1 中的最底层放出若干个小球时, 图 3 的 A、B、C、D、E 格子中的小球发生移动使相应格子出现空位的概率, 则根据概率的相乘和相加定义, 可得到下式:

$$P(x, y, z+c) = \frac{1}{4}P(x+\frac{a}{2}, y+\frac{b}{2}, z) + \frac{1}{4}P(x+\frac{a}{2}, y-\frac{b}{2}, z) + \frac{1}{4}P(x-\frac{a}{2}, y-\frac{b}{2}, z) + \frac{1}{4}P(x-\frac{a}{2}, y+\frac{b}{2}, z) \quad (1)$$

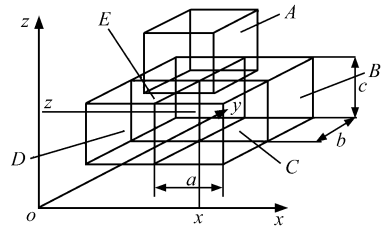


图 3 三维随机游动模型

Fig.3 The 3D random walks model

假设格子很小, a、b、c 与 x、y、z 相比可认为是极小量, 则上式中含有概率 P 的项可在点 (x, y, z) 附近用三元泰勒公式展开<sup>[2]</sup>, 取前两项, 整理后可得到下式:

$$\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} = \frac{a^2}{8c} \frac{\partial^2 P(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{b^2}{8c} \frac{\partial^2 P(x, y, z)}{\partial y^2} \quad (2)$$

式 (2) 中  $P(x, y, z)$  表示中点坐标 (x, y, z) 的假想格子出现空位的概率。P(x, y, z) 在岩体内的分布是不连续的。但在格子尺寸非常小, 即  $a \rightarrow 0$ ,  $b \rightarrow 0$ ,  $c \rightarrow 0$  时,  $P(x, y, z)$  可近似地看成连续分布函数。因此, 现对式 (2) 两边在  $a \rightarrow 0$ ,  $b \rightarrow 0$ ,  $c \rightarrow 0$  的条件下取极限, 可得:

$$\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} = \lim_{a \rightarrow 0, b \rightarrow 0, c \rightarrow 0} \frac{a^2}{8c} \frac{\partial^2 P(x, y, z)}{\partial x^2} + \lim_{a \rightarrow 0, b \rightarrow 0, c \rightarrow 0} \frac{b^2}{8c} \frac{\partial^2 P(x, y, z)}{\partial y^2} \quad (3)$$

令  $A = \lim_{a \rightarrow 0, b \rightarrow 0, c \rightarrow 0} \frac{a^2}{8c}$ ,  $B = \lim_{a \rightarrow 0, b \rightarrow 0, c \rightarrow 0} \frac{b^2}{8c}$ , 则有:

$$\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} = A \frac{\partial^2 P(x, y, z)}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 P(x, y, z)}{\partial y^2} \quad (4)$$

式 (4) 为图 1 三维随机介质理论模型岩层移动基本微分方程式,  $A$ 、 $B$  为反映格子尺寸的常数; 其解  $P(x, y, z)$  为一个连续函数, 表示点附近的无穷格子出现空位的概率。

式 (4) 是一个二阶三维偏微分方程, 根据模型假设条件可以得到以下边值条件:

$$\begin{cases} P(x, y, 0) = \delta(x, y) \\ y > 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\delta(x, y)$  满足

$$\begin{cases} \delta(x, y) = \begin{cases} 0 (x \neq 0 \text{ 或 } y \neq 0) \\ \infty (x, y = 0) \end{cases} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x, y) dx dy = 1 \end{cases} \quad (6)$$

有  $\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x, y) f(x, y, z) dx dy = f(0, 0, z) \quad (7)$

如果将式 (4) 中的  $z$  看成时间, 则偏微分方程式 (4) 是一个二阶热传导方程<sup>[2]</sup>, 其解为

$$P(x, y, z) = \frac{1}{\left(2\sqrt{\pi z} \frac{2AB}{A+B}\right)^2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\xi_1, \xi_2) \exp \left[ -\frac{\left(\sqrt{\frac{2B}{A+B}}x - \xi_1\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{2A}{A+B}}y - \xi_2\right)^2}{4z \left(\sqrt{\frac{2AB}{A+B}}\right)^2} \right] d\xi_1 d\xi_2 \quad (8)$$

考虑式 (7) 有

$$P(x, y, z) = \frac{A+B}{8\pi z AB} \exp \left[ -\frac{(A+B)\left(\frac{2B}{A+B}x^2 + \frac{2A}{A+B}y^2\right)}{8zAB} \right] \quad (9)$$

$P(x, y, z)$  在数值上等于单元开采时引起点  $(x, y, z)$  的下沉量, 用  $W_e(x, y, z)$ , 则:

$$W_e(x, y, z) = \frac{A+B}{8\pi z AB} \exp \left[ -\frac{(A+B)\left(\frac{2B}{A+B}x^2 + \frac{2A}{A+B}y^2\right)}{8zAB} \right] = \frac{A+B}{8\pi z AB} \exp \left[ -\frac{1}{4z} \left(\frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B}\right) \right] \quad (10)$$

式 (10) 即为单元开采引起的地表下沉新概率三维计算公式。

### 3 岩盐水溶开采沉陷新概率积分三维预测模型

#### 3.1 地表下沉预测公式

水溶开采使岩盐以一个中心点向四周溶解, 设溶腔空间为  $V$ , 则水溶开采引起的地表沉陷预测公式推导如下:

因为单元开采地表下沉公式为

$$W_e(x, y, z) = \frac{A+B}{8\pi z AB} \exp \left[ -\frac{1}{4z} \left(\frac{x^2}{A} + \frac{y^2}{B}\right) \right]$$

如图 4 所示, 整个溶腔开采区域引起的点  $A(x, y, z)$  的下沉量为:

$$W(x, y, z) = \iiint_V W_e(x-s_x, y-s_y, z-s_z) dV \quad (11)$$

考虑到顶板下沉量不可能达到开采高度, 因此, 整个溶腔开采区域引起的点  $A(x, y, z)$  的下沉量应修正为

$$W(x, y, z) = q \iiint_V W_e(x-s_x, y-s_y, z-s_z) dV = q \iiint_V \frac{A+B}{8\pi(z-s_z)AB} \exp \left\{ -\frac{1}{4(z-s_z)} \left[\frac{(x-s_x)^2}{A} + \frac{(y-s_y)^2}{B}\right] \right\} ds_x ds_y ds_z \quad (12)$$

式中:  $q$  为地表下沉系数。

对于地表  $z$  为常数, 等于采深  $h$ 。因此, 上式可写为

$$W(x, y) = q \iiint_V \frac{A+B}{8\pi(h-s_z)AB} \exp \left\{ -\frac{1}{4(h-s_z)} \left[\frac{(x-s_x)^2}{A} + \frac{(y-s_y)^2}{B}\right] \right\} ds_x ds_y ds_z \quad (13)$$

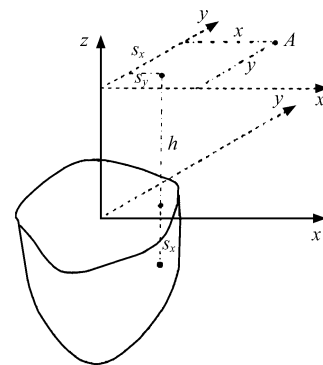


图 4 水溶开采地表沉陷推导图  
Fig.4 The surface subsidence according by solution mining

令:  $r_x = \sqrt{4A\pi h}$ ,  $r_y = \sqrt{4B\pi h}$ , 分别称之为  $x$  和  $y$  方向的地表影响半径。这样式 (13) 中的  $A$  和  $B$  可以分别用  $r_x, r_y$  来表示:

$$A = \frac{r_x^2}{4\pi h}, \quad B = \frac{r_y^2}{4\pi h}, \quad \text{则式 (13) 可写为}$$

$$W(x, y) = q \iiint_V \frac{h}{2(h-s_z)} \left( \frac{1}{r_x^2} + \frac{1}{r_y^2} \right) \exp \left\{ -\pi \frac{h}{(h-s_z)} \left[ \frac{(x-s_x)^2}{r_x^2} + \frac{(y-s_y)^2}{r_y^2} \right] \right\} ds_x ds_y ds_z \quad (14)$$

式 (14) 即为岩盐水溶开采沉陷新概率积分三维预测模型的地表下沉预测公式。

### 3.2 延指定方向的地表倾斜预计公式

地表点  $A(x, y)$  延  $\varphi$  方向的倾斜用  $i(x, y, \varphi)$  表示, 等于  $W(x, y)$  在  $\varphi$  方向的方向导数, 即:

$$i(x, y, \varphi) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial \varphi} = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \sin \varphi \quad (15)$$

### 3.3 延指定方向的地表曲率预计公式

地表点  $A(x, y)$  延  $\varphi$  方向的曲率用  $K(x, y, \varphi)$  表示, 等于  $i(x, y, \varphi)$  在  $\varphi$  方向的方向导数, 即:

$$K(x, y, \varphi) = \frac{\partial i(x, y, \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial i(x, y, \varphi)}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial i(x, y, \varphi)}{\partial y} \sin \varphi = \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} \cos^2 \varphi + \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x \partial y} \sin 2\varphi + \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \sin^2 \varphi \quad (16)$$

### 3.4 延指定方向地表水平移动预计公式

地表点  $A(x, y)$  延  $\varphi$  方向的水平移动用  $U(x, y, \varphi)$  表示, 根据水平位移与地表倾斜成正比可得:

$$U(x, y, \varphi) = \frac{(b_x + b_y)(r_x + r_y)}{4} i(x, y, \varphi) = \frac{(b_x + b_y)(r_x + r_y)}{4} \left[ \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \sin \varphi \right] \quad (17)$$

式中:  $b_x, b_y$  为  $x$  和  $y$  方向的水平移动系数。

### 3.5 延指定方向地表水平变形预计公式

地表点  $A(x, y)$  延  $\varphi$  方向的水平变形用  $\xi(x, y, \varphi)$  表示, 根据水平变形与地表曲率成正比可得:

$$\xi(x, y, \varphi) = \frac{(b_x + b_y)(r_x + r_y)}{4} K(x, y, \varphi) = \frac{(b_x + b_y)(r_x + r_y)}{4} \left[ \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} \cos^2 \varphi + \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x \partial y} \sin 2\varphi + \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \sin^2 \varphi \right] \quad (18)$$

式 (13) ~ 式 (18) 即为岩盐水溶开采沉陷地表变形新概率积分三维预测模型, 模型的公式都是依赖于溶腔形状  $V$  的三重积分, 如果  $V$  很复杂, 这些公式一般都不可积, 可以通过数值解法进行求解。

## 4 模型参数的力学获取途径

试验和现场数据显示, 主要影响半径、地表下沉系数和水平移动系数与岩石强度有很大的关系<sup>[3]</sup>。因此, 本文从力学的角度对这些参数的获取进行一些探索。

### 4.1 主要影响半径及力学获取途径

新概率积分三维预测模型, 考虑了岩层的各向异性。因此, 引入了两个主要影响半径参数:  $x$  方向的主要影响半径  $r_x$  和  $y$  方向的主要影响半径  $r_y$ , 分别由下式表示:

$$r_{xz} = \sqrt{4A\pi z}, \quad r_{yz} = \sqrt{4B\pi z} \quad (19)$$

其中

$$A = \lim_{a \rightarrow 0, b \rightarrow 0, c \rightarrow 0} \frac{a^2}{8c}, \quad B = \lim_{a \rightarrow 0, b \rightarrow 0, c \rightarrow 0} \frac{b^2}{8c} \quad (20)$$

模型中, 将岩石破碎体看成是互不相关的离散单元。  $a, b, c$  表示离散单元的尺寸参数。它们分别表示离散单元  $x, y$  和  $z$  方向的尺寸。

试验研究结果证明<sup>[3]</sup>, 岩层破坏单元的尺寸能够通过岩层的力学参数来进行计算。

设岩层  $x$  方向的抗拉强度为  $\sigma_x$ ,  $y$  方向的抗拉强度为  $\sigma_y$ 。

可以用顶板简化为两边固支的梁的理论来计算岩层  $x, y$  两个方向的极限破坏强度, 由材料力学可知, 悬臂梁中的应力为

$$\sigma = \frac{My}{J_z}, \quad J_z = \frac{bh^3}{12} \quad (21)$$

式中:  $J_z$  为梁的惯性矩;  $y$  为距离梁中性面的距离;  $b$  为梁的宽度(这里取为单位厚度);  $h$  为梁的高度。

所以梁中的最大应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{2J_z} h = \frac{3qL^2}{h^2} = \frac{3L^2 \sum_i \gamma_i h_i}{h^2} \quad (22)$$

式中： $q$  为梁的均布荷载； $L$  为梁的长度； $n$  为岩层数量； $\gamma_i$  为第  $i$  层岩层的重度； $h_i$  为第  $i$  层岩层的有效厚度。

相似材料模拟试验和数值模拟计算均显示梁从固支两端破坏，破坏后的尺寸即为随机介质模型中的介质大小，所以：

$$\sigma_{x\max} = \frac{3L_x^2 \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i}{h^2} = \frac{24a^2 \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i}{8hc} \quad (23)$$

$$\sigma_{y\max} = \frac{3L_y^2 \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i}{h^2} = \frac{24b^2 \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i}{8hc} \quad (24)$$

考虑式 (20)，有

$$\sigma_{x\max} = \frac{24A \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i}{h}, \quad \sigma_{y\max} = \frac{24B \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i}{h}。$$

由式 (19)，可得：

$$r_{xz} = \sqrt{4A\pi z} = \sqrt{4A \frac{\sigma_{x\max} h}{24A \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i} \pi z} = \sqrt{\frac{h_1 \pi z \sigma_{x\max}}{6 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}} \quad (25)$$

$$r_{yz} = \sqrt{4B\pi z} = \sqrt{4B \frac{\sigma_{y\max} h}{24B \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i} \pi z} = \sqrt{\frac{h_1 \pi z \sigma_{y\max}}{6 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}} \quad (26)$$

至此，得到了用岩层力学参数表示的  $r_x, r_y$ ，在考虑岩层力学参数时，可以充分考虑该方向上节理、裂隙、断层等不连续面对岩层强度造成的影响。

#### 4.2 下沉系数、水平移动系数的确定

研究表明，下沉系数和水平移动系数与覆岩岩性有关，总体趋势是，岩体越坚硬，其值越小，可以用以下经验公式计算<sup>[4]</sup>：

$$q = 0.991 - 0.238 \frac{E}{E_m} - 0.224 \frac{\rho H^2}{100 E_m m} \quad (27)$$

$$b = 0.350 - 0.07 \frac{E}{E_m} - 0.006 \frac{\rho H^2}{100 E_m m} \quad (28)$$

式中： $E$  为岩体综合变形模量， $E = \frac{\sum_1^n h_i E_i}{\sum_1^n h_i}$ ，单位

MPa； $E_m$  为中硬岩体变形模量，单位 MPa； $\rho$  为岩体平均质量密度，单位  $\text{g/cm}^3$ ； $H, m$  分别为采深，采厚，单位 m； $n$  为上覆岩层数。

## 5 讨 论

### 5.1 传统概率积分方法与新概率积分法的关系

对于式 (14)，如果采矿厚度  $m$  远小于采深  $h$ 。那么：

$$\because s_z < m, \therefore s_z \ll h。$$

因此，式 (14) 可以简写为

$$W(x, y) = q \iiint_V \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_x^2} + \frac{1}{r_y^2} \right) \exp \left\{ -\pi \left[ \frac{(x-s_x)^2}{r_x^2} + \frac{(y-s_y)^2}{r_y^2} \right] \right\} ds_x ds_y ds_z \quad (29)$$

如果上覆岩层各向同性，则令： $\frac{1}{r^2} = \frac{1}{r_x^2} = \frac{1}{r_y^2}$ ，

则式 (29) 可以写为

$$W(x, y) = q \iiint_V \frac{1}{r^2} \exp \left\{ -\pi \frac{1}{r^2} [(x-s_x)^2 + (y-s_y)^2] \right\} ds_x ds_y ds_z \quad (30)$$

如果采空区形状规则，比如为长方体，积分时  $s_z$  与  $s_x, s_y$  无关。则式 (30) 可写为

$$W(x, y) = qm \iiint_V \frac{1}{r^2} \exp \left\{ -\pi \frac{1}{r^2} [(x-s_x)^2 + (y-s_y)^2] \right\} ds_x ds_y \quad (31)$$

式中： $S$  为开采空间上底面方程。

设  $S$  在水平面上的投影为  $D$ ， $S$  的倾角为  $\alpha$ ，并且沿走向设置为  $x$  轴，沿倾向设置为  $y$  轴，区域  $S$  的方程可写为  $z = y_s \tan \alpha$ ，则：

$$ds_x ds_y = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y_s}\right)^2} dd_x dd_y = \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} dd_x dd_y = |\cos \alpha| dd_x dd_y = \cos \alpha dd_x dd_y \quad (32)$$

所以，式 (31) 可写为

$$W(x, y) = mq \cos \alpha \frac{1}{r^2} \iint_D \exp \left\{ -\pi \frac{1}{r^2} [(x-d_x)^2 + (y-d_y)^2] \right\} dd_x dd_y \quad (33)$$

式 (33) 即为传统概率积分法针对于较小采厚、各向同性上覆岩层、规则采空区而推导出的地表下沉计算公式。

可见，新概率积分三维预测模型是传统概率积分三维预测模型的扩展；传统概率积分三维预测模型，是新概率积分三维预测模型的特例。

### 5.2 进一步的研究工作

虽然本文的预测模型考虑了更多的因素，能够适用于更为复杂的开采沉陷预测。然而，模型仍然将整个上覆岩层看成一个整体，没有分别考虑不同岩层岩性的差别，对预测精度有一定的影响。因此，应进一步研究开采沉陷在不同岩层中的传递规律，建立一个能够充分考虑不同岩层岩性的预测模型。

## 6 计算实例

某盐矿溶腔形状为倒圆台，上底面半径  $R = 90\text{ m}$ ，岩盐层高度为  $m = 15\text{ m}$ ， $45^\circ$  溶蚀角，则下底面半径  $r = 75\text{ m}$ （图 5）。

岩层参数见表 1。

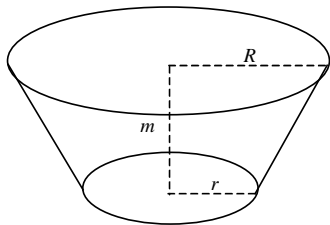


图 5 溶腔形状

Fig.5 The shape of cavern

表 1 计算模型所用的岩石物理力学参数  
Table 1 The parameters of physico-mechanical properties of rock mass

层号	弹性模量/MPa		重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	单轴抗拉强度/MPa		厚度 $z_i$ / m
	x 方向	y 方向		x 方向	y 方向	
1	5 800	5 000	0.027 2	11.30	8.30	46
2	7 000	6 500	0.026 7	9.03	8.03	151
3	5 600	5 100	0.027 3	10.80	9.80	121
4	7 730	6 030	0.027 0	8.80	6.80	167
5	20	20	0.018 0	0.02	0.02	40

图 6(a)、(b)分别是新概率积分三维预测模型和传统概率积分预测模型进行计算后的地表下沉等值线图。

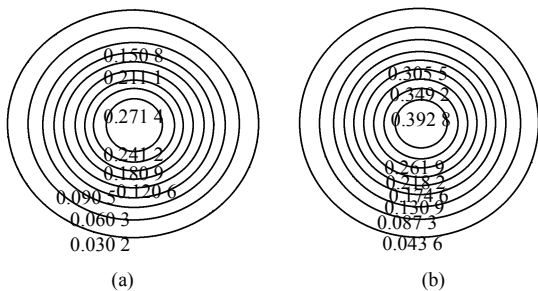


图 6 两种预测模型比较(单位: m)

Fig.6 Comparison between two forecasting models (unit: m)

新模型的计算值与实测值十分接近，可有效修正传统计算模型在非充分开采条件下预测值偏大的缺陷。同时，新模型可以良好反映岩层各向异性对地表下沉的影响，这与实测情况相符，而传统概率积分预测模型计算结果为一圆形。

## 7 结 论

岩盐水溶开采沉陷会造成很大的灾难，对其进行有效预测是减小和杜绝其发生的前提。本文针对目前开采沉陷预测模型，难以对复杂地质开采条件和复杂采空区情况下的开采沉陷进行有效预测的情况，综合唯像学理论模型和力学模型的优点，充分考虑上覆岩层在复杂地质条件下可能表现出来的各向异性，建立了新概率积分三维预测模型；并从力学角度，对三维预测模型的参数进行了研究，获得了模型参数与上覆岩层力学参数之间的关系。应用该模型能够对复杂地质条件和不规则采空区引起的地表沉陷进行较为准确地预测。

### 参 考 文 献

- [1] 高大钊. 岩土工程的回顾与前瞻[M]. 北京: 人民交通出版社出版, 2001.
- [2] 罗汉, 曹定华. 多元微积分与代数[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 吴佩, 靳建明, 戴仔强. 概率积分法预计下沉量的改进[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1): 19-22.  
WU Kan, JING Jian-ming, DAI Zi-qiang. Improvement on probability integral method prediction come down quantity[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2003, 22(1): 19-22.
- [4] 邹友峰. 地表下沉系数计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 109-112.  
ZOU You-feng. Study on the calculating method of subsidence coefficient[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(3) 109-112.
- [5] 张庆松, 高延法, 孙宗军, 等. 开采沉陷数值计算的空间效应和层面效应分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 940-942.  
ZHANG Qing-song, GAO Yan-fa, SUN Zong-jun. Analysis of space and layer face effects on mining subsidence numerical calculation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 940-942.
- [6] 李铀, 白世伟, 杨春和, 等. 矿山覆岩移动特征与安全开采深度[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 27-32.  
LI You, BAI Shi-wei, YANG Chun-he. Characters of overburden strata movement of mines and safe mining depth [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 27-32.