

江苏沿江开发带地下水开采与 地面沉降三维数值模拟

骆祖江¹, 张月萍¹, 刘金宝¹, 刘建东²

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省地质矿产勘查局, 江苏 南京 210018)

摘要: 根据江苏沿江开发带地下水系统的水文地质机制以及地面沉降机理, 在概化出江苏沿江开发带的地下水系统水文地质概念模型和地面沉降模型的基础上, 建立了江苏沿江开发带地下水开采与地面沉降三维数值模型。并针对各种开采方案下地面累积沉降量最少的原则, 给出了各含水层的最优开采方案。

关键词: 地下水开采; 地面沉降; 三维数值模拟; 最优开采方案

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)03-0280-05

Three Dimensional Numerical Model for Groundwater Withdrawal and Land Subsidence in Development Zone along Yangtze River in Jiangsu Province

LUO Zu jiang¹, ZHANG Yue ping¹, LIU Jin bao¹, LIU Jian dong²

(1. School of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources Prospecting, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract Based on the hydrogeological conceptual model and land subsidence model according to the hydrogeological mechanisms of groundwater system and land subsidence mechanisms in the development zone along the Yangtze River in Jiangsu Province, a three dimensional numerical model for groundwater withdrawal and land subsidence is established. Aiming at controlling the land subsidence, the optimal exploitation scheme for each aquifer is presented, which provides a scientific foundation for exploiting groundwater reasonably and controlling land subsidence in the area.

Key words: groundwater withdrawal; land subsidence; three dimensional numerical model; optimal exploitation scheme

0 引言

江苏沿江开发带是指江苏以长江为中轴线包括江南、江北的沿岸广大地区。近年来随着经济的迅猛发展,地表水污染严重,城市集中大量开采水质较好的深层地下水,造成水位大幅度下降,形成区域性降落漏斗,并诱发地面沉降。因此,合理规划地下水开采、控制地面沉降已成为当务之急。区

内从上至下分布有供水意义的含水层分别为全新统潜水含水层,上更新统第Ⅰ承压含水层,中更新统第Ⅱ承压含水层,下更新统第Ⅲ承压含水层,其间以弱含水的粘性土层相分隔,并发生水力联系,是一个复合含水系统。笔者详细论述了地下水开采与地面沉降模型建立的理论与方法^[1,2],在概化出江苏沿江开发带地下水开采与地面沉降地质概念模型的基础上,建立了江苏沿江开发带的地下水

收稿日期: 2006-10-10

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010511105)

作者简介: 骆祖江(1964),男,江苏吴江人,教授,从事水文地质、工程地质研究。E-mail: luozujiang@sina.com

开采与地面沉降三维数学模型。同时采用不同的开采方案进行对比分析, 在既满足开采量的要求又能控制沉降量的基础上确定最优开采方案^[3]。实践证明, 该理论与方法正确、可靠, 是模拟预测区域地下水流场与地面沉降场变化特征的良好手段。

1 地下水开采与地面沉降地质概念模型

根据研究区多年的勘探资料和水文地质观测资料显示, 江苏沿江开发带地下水系统为非均质各向异性的复合含水层结构, 第 I ~ 第 III 承压含水层通过其间的粘性土弱含水层发生水力联系。现状开采条件下地下水流呈三维非稳定流状态, 研究区四周向漏斗区补给, 所以将研究区的四周概化为第二类补给边界; 由于大气降水的补给, 将含水系统的顶部赋为大气降水的补给边界; 含水系统的基底为第三系基岩, 因此其底部概化为隔水边界; 长江横穿研究区域, 且深入至第 I 承压含水层并与该含水层有水力联系, 因此将长江内边界概化为第二类补给边界。

地面沉降是土体变形在地面累计效应的总和, 是土层中孔隙水承担的孔隙水压力和土骨架承担的有效应力发生变化的结果。处于平衡状态的含水系统, 当地下水被抽出后, 孔隙水压力减小, 原先的土 - 水平衡状态被破坏, 有效应力发生变化, 土体产生变形。本次研究主要考虑土体的垂向变形。

2 地下水开采与地面沉降耦合数学模型

2.1 地下水运动数学模型

以连续性原理和达西定律为基础, 结合江苏沿江开发带地下含水系统的水文地质条件, 建立与其水文地质概念模型相对应的三维非稳定流数学模型^[4]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right)+W=S_S\frac{\partial H}{\partial t}\quad(x,y,z)\in\Omega\quad(1)$$

$$H(x,y,z,t)|_{t=0}=H_0(x,y,z,t_0)\quad(x,y,z\in\Omega)\quad(2)$$

$$k_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\cos(n,x)+k_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\cos(n,y)+k_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\cos(n,z)|_{\Gamma_2}=q(x,y,z,t)\quad(x,y,z)\in\Gamma_2\quad(3)$$

$$k'_{xx}\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2+k'_{yy}\left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2+k'_{zz}\left(\frac{\partial H}{\partial z}\right)^2-\frac{\partial H}{\partial z}\cdot(k_z+q_w)+q_w|_{\Gamma_3}=\mu\frac{\partial H}{\partial t}\quad(x,y,z)\in\Gamma_3\quad(4)$$

式中, S_S 为贮水率(1/m); k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 为承压含水层

各向异性主方向渗透系数(m/d); H 为点(x, y, z) 在 t 时刻的水头值(m); W 为源汇项(1/d); t 为时间(d); Ω 为计算区。 $H_0(x, y, z, t_0)$ 为点(x, y, z) 处的初始水位(m); $q(x, y, z, t)$ 为第二类边界上单位面积的补给量(m/d); $\cos(n, x)$ 、 $\cos(n, y)$ 、 $\cos(n, z)$ 分别为流量边界外法线方向与坐标轴方向夹角的余弦; μ 为饱和差(自由面升降)或给水度(自由面下降), 它表示在自由面改变单位高度下, 从含水层单位截面积上吸收或排出的水量; k'_{xx} 、 k'_{yy} 、 k'_{zz} 为潜水含水层各向异性主方向渗透系数(m/d); q_w 为自由面单位面积上的大气降雨入渗补给量(m/d); Γ_2 、 Γ_3 分别为第二类边界和自由面边界。

2.2 地面沉降数学模型

由地下水位下降引起的含水层压缩量的计算模型为^[5]:

$$\begin{aligned} &\text{承压含水层的弹性变形量} \\ \Delta b &= -\Delta h S_{ske} b_0 = -\Delta h S_{fe} \end{aligned}\quad(5)$$

$$\begin{aligned} &\text{承压含水层的非弹性变形量} \\ \Delta b^* &= -\Delta h S_{skv} b_0 = -\Delta h S_{fv} \end{aligned}\quad(6)$$

$$\begin{aligned} &\text{潜水含水层的弹性变形量} \\ \Delta b &= -\Delta h(1-n+n_w)S_{ske} b_0 = -\Delta h S_{fe} \end{aligned}\quad(7)$$

$$\begin{aligned} &\text{潜水含水层的非弹性变形量} \\ \Delta b^* &= -\Delta h(1-n+n_w)S_{skv} b_0 = -\Delta h S_{fv} \end{aligned}\quad(8)$$

式中: Δb 为含水层弹性压缩量(m), 正为压缩, 负为扩张; Δb^* 为含水层非弹性压缩量(m); Δh 为水头变化值(m); S_{fe} 为骨架成分的弹性储水因子(无量纲); S_{ske} 为骨架成分的弹性储水率(1/m); S_{fv} 为骨架成分的非弹性储水因子(无量纲); S_{skv} 为骨架成分的非弹性储水率(1/m); b_0 为可压缩含水层的厚度(m); n 为孔隙率; n_w 为水位以上作为多孔介质总体积一部分的湿气容量。其中

$$S_{ske}=\rho_w g\left[\frac{2(1-2\nu)}{2G(1+\nu)}\right]\quad(9)$$

$$S_{skv}=\frac{0.434C_c\rho_w}{p'(1+e_0)}\quad(10)$$

式中: G 为剪切模量(MPa); ν 为泊松比; C_c 为压缩指数; p' 为初始有效应力(MPa); e_0 为初始孔隙比; ρ_w 为水的密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。当各含水层的压缩量确定后, 总地面沉降量也由此而求出。

将上述两模型通过水头项进行耦合, 即可形成地下水开采与地面沉降三维数值模型, 进而求解数学模型的有关水文地质参数和地面沉降参数。

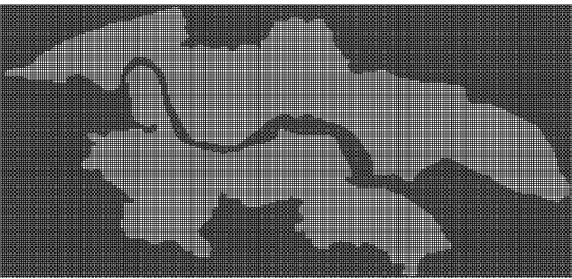
3 模型的校正与识别

上述模型采用有限差分法求解, 并采用预处理共轭梯度法(pcg)迭代求解方程组^[6]。研究区域面积约 24 000 km²(图 1)。平面上将模型剖分为 270×130 的矩形等距网格单元, 剖面上剖分为 7 层。单元数总共 24.6×10⁴ 个。研究区部分平面、剖面网格图见图 2。

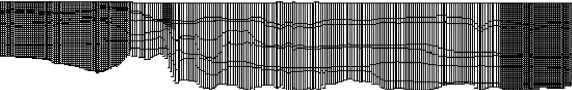


图 1 研究区计算区域

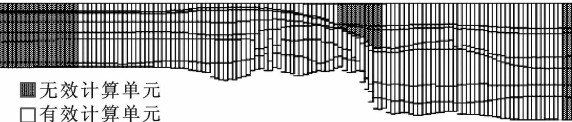
Fig.1 Map of Study Field for Cclulating



a—平面部分



b—横向剖面(50行)



c—纵向剖面(80列)

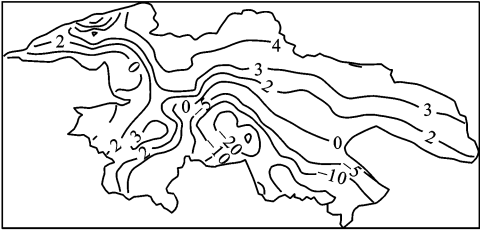
■ 无效计算单元
□ 有效计算单元

图 2 研究区网格剖分图部分

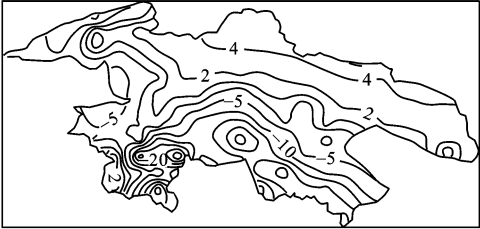
Fig.2 Gridding Map of Study Field

选取 2003 年 1 月 1 日~2003 年 12 月 31 日作为模型的识别时段, 把整个时段离散成 12 个应力期, 每个应力期又分为 5 个时间步长。各承压含水层的初始水位由实测所得, 采用的是 2003 年 1 月 1 日的观测水位, 潜水含水层的初始水位由实测结合插值给出, 3 个粘性土弱含水层的初始流场由上下承压含水层插值获得, 各乡镇的抽水量由实际统计获得, 第二类边界上的地下水交换量根据边界上的

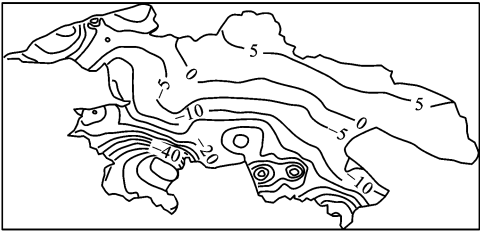
水力梯度及渗透系数给出。各承压含水层的初始流场见图 3。



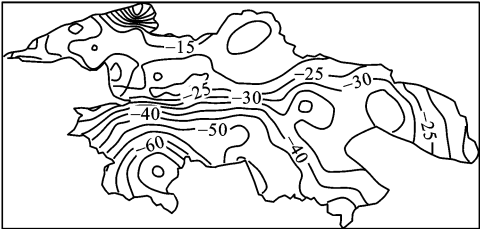
a—第 I 承压含水层



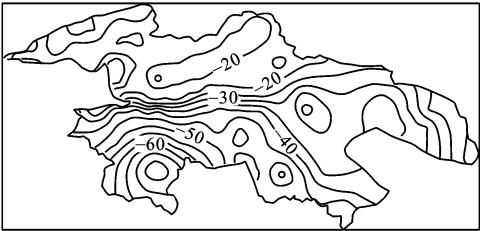
b—第 I 承压弱含水层



c—第 II 承压含水层



d—第 II 承压弱含水层



e—第 III 承压含水层

图 3 各含水层初始流场分布

Fig.3 Initial Seepage Field of Each Aquifer

模型采用间接求参法达到模型识别的目的, 给定参数初值及其变化范围, 通过“试错法”(trial and error)不断调整参数初值, 使观测井计算水头和实测水头符合拟合要求, 即拟合误差小于规定值。鉴于

研究区沉降资料有限, 这里主要对水位观测孔进行拟合。各含水层均有一定数量的水位观测井用来进行水位拟合, 其中第Ⅰ承压含水层 24 个观测井, 第Ⅱ承压含水层 35 个观测井, 第Ⅲ承压含水层 22 个观测井, 基本控制全区。经过模型试算调整, 将研究区整个含水系统分成 43 个水文地质参数分区, 具体情况为第Ⅰ承压含水层 11 个参数分区, 第Ⅱ承压含水层 13 个参数分区, 第Ⅲ承压含水层 15 个参数分区, 再加上潜水和 3 个粘土弱含水层参数分区。地面沉降的有关参数用类比方法给出经验值。图 4 列举了第Ⅱ承压含水层水文地质参数分区, 表 1 列举了第Ⅱ承压

含水层水文地质参数分区值。图 5 列举了第Ⅱ承压含水层从 2003 年 2 月 1 日到 2003 年 12 月 31 日观测井计算水位与实测水位的对比图, 吻合良好。在识别时段内各承压含水层的地下水位实测值与模型计算值的拟合误差 $<0.5\text{m}$ 的观测井数达到观测井

表 1 第Ⅱ承压含水层水文地质参数分区值

Tab. 1 Values of Hydrogeological Parameters in Subareas of Confined Aquifer II

| 分区 | $k(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$ | | | S_s/m^{-1} | $S_{ke}/10^{-4}$ | $S_h/10^{-3}$ |
|----|---------------------------------|-----|------|---------------------|------------------|---------------|
| | xx | yy | zz | | | |
| 1 | 3 | 3 | 0.3 | 4.00×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 2 | 8 | 8 | 0.8 | 2.20×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 3 | 3 | 3 | 0.3 | 2.20×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 4 | 6 | 6 | 0.6 | 9.00×10^{-4} | 5 | 2.8 |
| 5 | 8 | 8 | 0.8 | 4.00×10^{-6} | 5 | 2.8 |
| 6 | 3 | 3 | 0.3 | 2.20×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 7 | 15 | 15 | 1.5 | 1.00×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 8 | 18 | 18 | 1.8 | 2.20×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 9 | 2.2 | 2.2 | 0.22 | 2.20×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 10 | 14 | 14 | 1.4 | 5.00×10^{-4} | 5 | 2.8 |
| 11 | 40 | 40 | 4 | 8.00×10^{-4} | 5 | 2.8 |
| 12 | 3 | 3 | 0.3 | 2.20×10^{-5} | 5 | 2.8 |
| 13 | 18 | 18 | 1.8 | 2.20×10^{-5} | 5 | 2.8 |

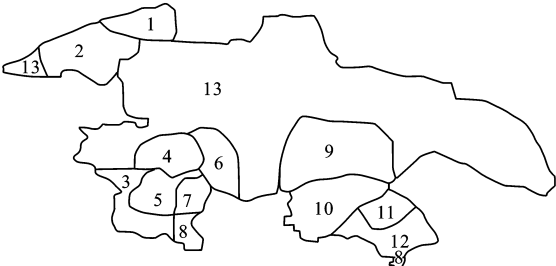


图 4 第Ⅱ承压含水层水文地质参数分区
Fig. 4 Subareas of Hydrogeological Parameters in Confined Qquifer II

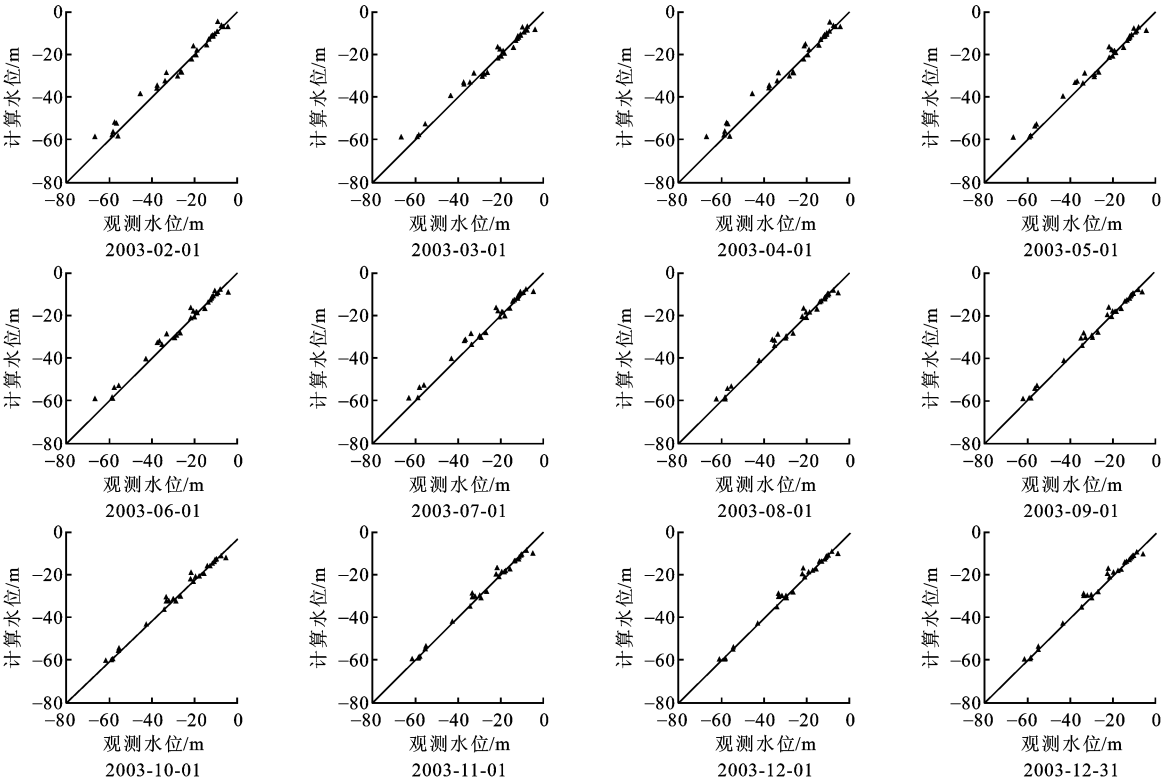


图 5 第Ⅱ承压含水层地下水水位计算值与观测值对比

Fig. 5 Calculated Values vs Observed Values of Groundwater Level in Confined Aquifer II

总数的 90%以上。通过模型计算地面沉降值,从地面沉降计算值与现有该区域地面沉降统计资料比较后可以看出,此模型的地面沉降计算结果较为准确,能够反映地面沉降的发展趋势,可以满足研究的计算要求。由此可知该模型正确、可靠,可用于研究区地下水开采与地面沉降的模拟预测。

4 地下水开采与地面沉降预警预报

本次研究以 2003 年 1 月 1 日为初始时间,利用识别后的地下水开采与地面沉降三维数值模型,采用 10 种不同开采方案模拟预测该区域 10 年后各承压含水层的最低地下水水位和地面沉降最大值。10 种开采方案如下:

- 方案 1:按照现状开采量预报研究区水位及地面沉降。
- 方案 2:南通第Ⅲ承压含水层地下水开采量的 25%调整到第Ⅱ承压含水层开采。
- 方案 3:南通第Ⅲ承压含水层地下水开采量的 50%调整到第Ⅱ承压含水层开采。
- 方案 4:南通第Ⅲ承压含水层地下水开采量的 75%调整到第Ⅱ承压含水层开采。
- 方案 5:镇江苏锡常第Ⅱ承压含水层地下水开

- 采量的 25%调整到第Ⅲ承压含水层开采。
- 方案 6:镇江苏锡常第Ⅱ承压含水层地下水开采量的 50%调整到第Ⅲ承压含水层开采。
- 方案 7:镇江苏锡常第Ⅱ承压含水层地下水开采量的 75%调整到第Ⅲ承压含水层开采。
- 方案 8:南通第Ⅲ承压含水层地下水开采量的 25%调整到第Ⅱ承压含水层开采,镇江苏锡常第Ⅱ承压含水层地下水开采量 25%调整到第Ⅲ承压含水层开采。
- 方案 9:南通第Ⅲ承压含水层地下水开采量的 50%调整到第Ⅱ承压含水层开采,镇江苏锡常第Ⅱ承压含水层地下水开采量 50%调整到第Ⅲ承压含水层开采。
- 方案 10:南通第Ⅲ承压含水层地下水开采量的 75%调整到第Ⅱ承压含水层开采,镇江苏锡常第Ⅱ承压含水层地下水开采量 75%调整到第Ⅲ承压含水层开采。
- 上述 10 种开采方案预报结果表明:在控制开采总量和开采布局不变的情况下,方案 8 的累计地面沉降量较小,该方案可作为优化开采的预警预报方案。10 种不同开采方案 10 年后研究区各承压含水层的最低地下水水位和地面沉降最大值见表 2。

表 2 各开采方案 10 年后承压含水层水位最低值及地面沉降量最大值预测
Tab. 2 Forecasting Minimal Value of Groundwater Lever and Maximal Value of Land Subsidence in Each Confined Aquifer after 10 Years by Each Exploitation Scheme

| 项目 | 开采方案 | | | | | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| I 承压水位最低值/m | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 | - 23. 53 |
| II 承压水位最低值/m | - 71. 08 | - 70. 70 | - 67. 73 | - 63. 23 | - 71. 09 | - 71. 09 | - 68. 93 | - 71. 24 | - 67. 74 | - 63. 21 |
| III承压水位最低值/m | - 72. 70 | - 80. 99 | - 99. 12 | - 116. 8 | - 72. 47 | - 72. 87 | - 72. 87 | - 81. 01 | - 99. 24 | - 94. 32 |
| 地面沉降最大值/10 ⁻² m | 0. 136 | 0. 188 | 0. 378 | 0. 300 | 0. 361 | 0. 378 | 9. 55 | 9. 49 | 9. 53 | 9. 84 |

5 结语

建立的江苏沿江开发带地下水开采-地面沉降三维数值模型是正确可靠的,可用于研究区的地下水开采及地面沉降模拟及预测。在此模型基础上采用 10 种开采方案对研究区进行地下水开采与地面沉降模拟预测。模拟结果表明,方案 8 能较为有效地控制地面沉降,地下水水位也控制在允许范围之内,所以可以采用方案 8 调整研究区现行的开采格局来有效控制地面沉降。

参考文献:

[1] Burbey T. J. Stress Strain Analyses for A quifer System Char
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net