

# 利用单纯形-粒子群混合算法确定越流含水层参数

袁帆<sup>1</sup>, 刘元会<sup>1</sup>, 郭建青<sup>2</sup>, 王璐璐<sup>3</sup>

(1. 长安大学 理学院, 西安 710064; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710051;  
3. 中国水利水电第三工程局有限公司, 河北 承德 067411)

**摘要:** 针对粒子群优化算法后期存在的收敛速度慢、早熟、易陷入局部极小等问题, 将局部搜索能力强的单纯形算法和粒子群算法结合, 构造单纯形-粒子群混合算法。以第一类越流系统情况下的非稳定井流问题的解析解为基础, 将单纯形-粒子群混合算法应用于分析抽水试验数据, 计算含水层参数的问题。数值实验结果表明: 单纯形-粒子群混合算法能有效地应用于分析抽水试验数据, 确定含水层参数, 且具有局部搜索能力强、运算速度快和计算精度高等优点。

**关键词:** 越流系统; 含水层参数; 单纯形算法; 粒子群算法; 混合算法

**中图分类号:** TV211.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0729-04

## Estimation of leakage aquifer parameters with simplex-particle swarm optimization algorithm

YUAN Fan<sup>1</sup>, LIU Yuanhui<sup>1</sup>, GUO Jianqing<sup>2</sup>, WANG Lulu<sup>3</sup>

(1. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Environmental Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an 710051, China;

3. Sinohydro Bureau 3 Company Ltd, Chengde 067411, China)

**Abstract:** The particle swarm optimization algorithm has slow convergence, prematurity, and local minimum problems; therefore, the simplex method algorithm was combined with the particle swarm algorithm to develop a hybrid algorithm called simplex-particle swarm algorithm given that the simplex method algorithm has strong local search ability. Based on the analytical solutions to unsteady well flow problems in the first type leakage system, the simplex-particle swarm algorithm was employed to analyze the pumping test data in order to determine aquifer parameters. Numerical results showed that the simplex-particle swarm algorithm can analyze the pumping test data effectively for the estimation of aquifer parameters, and this method has strong local search ability, fast calculation ability, rapid convergence rate, and high accuracy.

**Key words:** leakage system; aquifer parameters; simplex algorithm; particle swarm algorithm; hybrid algorithm

含水层参数是建立地下水流动数学模型、进行水资源评价和开发利用的重要基础参数。在开发利用地下水资源的过程中, 利用不同的方法分析抽水试验数据, 是确定含水层参数的主要途径之一, 而分析越流含水层参数较为常用的方法主要有标准曲线配线法<sup>[1]</sup>和 Jacob 直线图解法<sup>[1]</sup>, 计算过程均较为简便, 但是前者在配线过程中不可避免地具有人为随意性, 后者则要求观测井到主井的距离较小或是抽水时间较长的观测数据, 对野外观测条件要求较高, 野外工作量较大。

为了弥补上述不足, 人们将智能优化算法应用于抽水试验数据分析, 例如混沌优化序列<sup>[2]</sup>、差分单纯形法<sup>[3]</sup>、模拟

退火算法<sup>[4]</sup>等。粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法<sup>[5-6]</sup>是 Eberhart 和 Kennedy 在 1995 年提出的一种基于迭代的群体智能优化算法, 该算法早期收敛速度快, 当不再出现更好的个体更新历史最好位置时, 所有粒子会快速聚集到当前历史最好位置的区域, 出现早熟收敛现象。为了克服粒子群优化算法的缺点, 人们提出了许多改进的基于粒子的算法<sup>[7-12]</sup>, 这些算法不同程度地提高了算法的收敛性和精度, 但是效果并不十分理想。单纯形法 (Simplex Method, SM)<sup>[13]</sup>是一种确定性的非导数求解的无约束优化算法, 该算法只需计算多边形顶点的适应度函数值, 具有局部搜索能力强、计算量小的优点, 不足之处在于其收敛性对初始猜

收稿日期: 2014-11-17   修回日期: 2015-06-23   网络出版时间: 2015-07-23  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1242.014.html>  
基金项目: 国家自然科学基金(11171043)  
作者简介: 袁帆(1990-), 女, 陕西延安人, 主要从事最优化理论与方法研究。E-mail: cadxyf@sina.com  
通讯作者: 刘元会(1964-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 主要从事水文地质的数学方法研究。E-mail: chdlyh@126.com

测值的选取依赖性较强,易陷入局部极值。本文拟将单纯形算法引入到粒子群优化算法中,构造单纯形-粒子群混合算法(SM-PSO),并将其应用于抽水试验数据分析,以确定含水层参数。同时,通过数值实验分析该算法计算结果的可靠性,并对种群规模和待估参数导水系数初值取值范围等算法控制条件对算法收敛性的影响进行数值实验分析。

## 1 单纯形-粒子群混合优化算法

### 1.1 单纯形和粒子群优化算法简介

单纯形法(SM)是一种确定性的下降方法,具有较强的局部搜索能力。其基本原理是:在维搜索空间中,用  $n+1$  个顶点构成一个多面体,求出各顶点的适应度值,并确定其中的最优点、次优点和最差点,然后利用反射,扩张,收缩等策略找出一个较好点取代最差点,从而构成新的多面体,这样重复迭代可以找到或逼近一个最优点。

粒子群优化算法(PSO)是除了蚁群算法、鱼群算法等之外的另一种群体智能优化算法。该算法首先在可行域空间中初始化一群粒子,每个粒子代表函数优化问题中的一个潜在最优解,用位置、速度和适应度值三项指标表示该粒子特征,适应度值由适应度函数计算得到,其值的好坏表示粒子的优劣。粒子在可行域中运动,通过跟踪个体极值 Pbest 和群体极值 Gbest 动态调整自身的位置和速度,个体极值 Pbest 是指个体所经历位置中计算得到的适应度值最优的位置,群体极值 Gbest 是指种群中所有粒子搜索到的适应度最优的位置。设在一个  $n$  维的搜索空间中,粒子个数为  $m$ ,第  $i$  个粒子的位置和速度分别为  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ ,  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}]$ ,则在第  $t+1$  次迭代计算时,粒子  $i$  根据下列规则来更新自己的速度和位置:

$$v_{ik}(t+1) = wv_{ik}(t) + c_1rand(p_{ik}(t) - x_{ik}(t)) + c_2rand(p_{gk}(t) - x_{ik}(t)) \quad (1)$$

$$x_{ik}(t+1) = x_{ik}(t) + v_{ik}(t+1) \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$

式中: $v_{ik}$ 为粒子  $i$  在第  $t$  次迭代时第  $k$  维的速度; $x_{ik}(t)$ 为粒子  $i$  在第  $t$  次迭代时第  $k$  维的位置; $p_{ik}$ 为粒子  $i$  达到自身最佳位置时第  $k$  维的位置坐标; $p_{gk}$ 为种群目前达到最佳位置时第  $k$  维的位置坐标; $w$ 为惯性权重系数,一般随进化代数从 0.9 线性递减到 0.4; $c_1$ 、 $c_2$ 为加速因子,通常都等于 2; $rand$ 是  $[0, 1]$  之间的随机数。为了减少粒子飞离搜索空间的几率,将粒子的每一维速率限制在  $[-v_k^{max}, v_k^{max}]$  内,其中

$$v_k^{max} = p x_k^{max} \quad 0.1 \leq p \leq 1.0 \quad (3)$$

式中: $v_k^{max}$ 是指搜索空间中第  $k$  维位置的上界; $p$ 是限速因子。

### 1.2 单纯形-粒子群混合算法

为了提高粒子群优化算法的局部微调能力,使算法能更大概率地收敛到全局最优解,在粒子群优化算法的基础上,引入单纯形算法构成单纯形-粒子群混合算法。在每一次迭代中先用粒子群算法对种群进行全局寻优,然后通过单纯形搜索对经过粒子群寻优后的种群中适应度较好的部分粒子进行局部搜索。单纯形-粒子群混合算法的主要步骤见图 1。

步骤 1: 初始化种群规模  $N$ , 求解参数的上界和下界、最

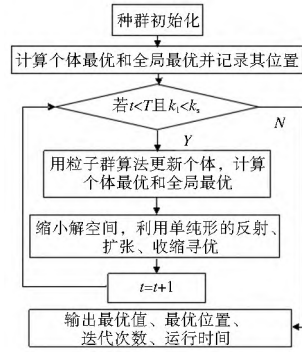


图 1 SM-PSO 算法流程

Fig. 1 Flow chart of SM-PSO algorithm

大迭代次数  $T$  以及满足精度要求的  $k_2$ 。

步骤 2: 初始化种群中粒子的速度和位置, 将当前各个体位置设定为其历史最优位置, 再找出当代全局最优适应度值及其位置。

步骤 3: 初始化迭代次数  $t$  和  $R_1$ , 若  $t < T$  且满足防止早熟收敛所设置的迭代次数  $k_1 < k_2$  时进入循环, 否则输出最优结果。

步骤 4: 用粒子群优化算法更新每一粒子的速度和位置, 评估粒子的适应度值, 更新局部最优 pbest 和全局最优 gbest。

步骤 5: 对种群中的粒子按适应度值优劣进行升序排列, 对前  $D+1$  个粒子进行单纯形操作, 获取局部最优值, 再将其随机赋给群体中的某个个体。

步骤 6: 迭代  $t = t + 1$  并返回步骤 3, 直到精度达到要求时输出最优值、最优位置、迭代次数、运行时间。

## 2 汉土什公式与目标函数的构成

### 2.1 汉土什公式

在含水层为均质、各向同性和无限延伸的条件下, 若以定流量  $Q$  进行抽水, 则在抽水开始后  $t$  时刻, 含水层中距抽水主井距离为  $r$  点处的水位降深可以表示为<sup>[1]</sup>

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} F(u, \frac{r}{B}) \quad (4)$$

式中: $s$ 表示水头降深(m);  $Q$ 表示抽水流量( $m^3/s$ );  $T$ 表示含水层的导水系数( $m^2/s$ );  $r$ 为距抽水主井的距离(m);  $1/B$ 为越流补给因子( $m^{-1}$ );  $F(u, \frac{r}{B})$ 为越流井函数, 其表达式为

$$F(u, \frac{r}{B}) = \int_u^\infty \frac{1}{x} \exp[-(x + \frac{r^2}{4B^2x})] dx \quad (5)$$

式中: $u$ 为无量纲时间。其表达式为

$$u = \frac{r^2 \mu}{4Tt} \quad (6)$$

式中: $\mu$ 为含水层的储水系数, 无量纲。

本文通过查第一类越流系统井函数  $F(u, \frac{r}{B})$  表, 采用面积加权的方法<sup>[14]</sup>来近似计算井函数的值。

### 2.2 目标函数的构成

在应用单纯形-粒子群混合算法时, 要求预估的含水层参数使下式表达的适应度函数值达到最小, 即

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (s_j^0 - s_j)^2 \Rightarrow \min \quad (7)$$

式中:  $s_j^0$  为在抽水开始后第  $j$  时刻观测到的实际水位降深值 (m);  $s_j^c$  为利用(4)式计算的第  $j$  时刻的水位降深 (m);  $j$  为抽水试验过程中的水头降深观测数据的序列号,  $j=1, 2, \dots, N$ ;  $\theta$  为待估参数向量, 在第一类越流系统中有 3 个待估的含水层参数, 分别是导水系数  $T$ 、储水系数  $\mu$  和越流补给因子  $1/B$ , 分别视为  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , 这样粒子的位置坐标就是  $\theta=(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 。适应度函数的意义是选取适当的粒子位置  $\theta=(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ , 使得降深的计算值与观测值之间的残差平方和的均值达到最小。此时对应的含水层参数, 即为问题所求。

表 1 原始抽水试验数据

Tab. 1 The pumping test data

时间 $t/\text{min}$	2	4	6	8	10	15	20	25	30	40	50	60	70
降深 $s/\text{m}$	1.72	2.12	2.35	2.44	2.65	2.89	3.04	3.15	3.26	3.40	3.49	3.54	3.61
时间 $t/\text{min}$	80	90	100	110	120	150	180	210	240	270	300	360	420
降深 $s/\text{m}$	3.66	3.74	3.76	3.77	3.78	3.87	3.92	3.99	4.00	4.04	4.06	4.08	4.09

### 3.1.2 算法参数控制

在精度和运算时间的权衡下, 对单纯形-粒子群混合算法中每一个参数的取值经过多次试算的实验知, 加速因子  $c_1, c_2$  的取值范围是  $[0.9, 2.85]$ , 根据文献[16]中建议  $c_1=c_2=2$ ; 含水层参数的取值范围为  $0.9 \text{ m}^2/\text{min} \leq T \leq 3.8 \text{ m}^2/\text{min}$ ,  $0.002 \leq \mu \leq 0.005$ ,  $0.001 \text{ m}^{-1} \leq 1/B \leq 0.004 \text{ m}^{-1}$ ; 限速因子  $p=2$ ; 权重系数  $w$  取值较大时有利于跳出局部极值, 较小时有利于算法收敛, 故在实际计算时, 一般采用动态变化的  $w$  值, 在迭代的初始阶段采用较大的值, 然后  $w$  的值随迭代次数的增加线性递减:

$$w = w_{\max} (w_{\max} - w_{\min}) (T - t) / T \quad (8)$$

式中:  $w_{\max}$  为惯性权重系数最大值;  $w_{\min}$  为惯性权重系数最小值;  $t$  为当前迭代次数;  $T$  为最大迭代次数, 取 2000。

## 3.2 实验结果的初步分析

### 3.2.1 算法的可靠性检验

根据图 1 所示的算法流程, 利用 matlab 程序在计算机上进行数值实验。表 2 中给出了 SM-PSO 混合算法和其他算法以及单独的 SM 算法和 PSO 算法计算出的含水层参数。

表 2 计算结果

Tab. 2 The calculated results

方法	$T/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	$\mu$	$1/B (\text{m}^{-1})$	$Q/\text{m}^2$
配线法 <sup>[16]</sup>	2.170 0	0.004 0	0.003 28	$7.3826 \times 10^{-4}$
SM 算法	2.458 6	0.002 8	0.002 19	$1.5000 \times 10^{-3}$
PSO 算法 <sup>[16]</sup>	2.290 0	0.003 8	0.002 82	$6.0838 \times 10^{-4}$
SM-PSO 算法	2.272 3	0.004 1	0.002 93	$4.7231 \times 10^{-4}$

从表 2 中可以看出, SM-PSO 混合算法使计算结果的精度达到 0.000 472, 明显高于其他算法和单独的 SM 算法、PSO 算法计算出的精度。

将文中由 SM-PSO 算法计算得到的含水层参数值带入式(4), 得到降深-时间曲线, 并与实际的降深-时间曲线进行比较, 见图 2。可以看出, 计算值与实际观测值吻合良好, 这表明了由 SM-PSO 算法计算的含水层参数是可靠的。

### 3.2.2 种群规模的影响

在数值实验中, 种群规模  $N$  分别取 5、10、50、80、120、200、

## 3 数值实验

### 3.1 抽水试验数据与算法参数控制

#### 3.1.1 试验数据

为了验证文中算法的适用性和可靠性, 引用文献[15]中给出的越流条件下实际抽水试验数据进行数值实验。表 1 中给出的是在抽水开始后距抽水主井距离为  $r=12.19 \text{ m}$  处观测孔中的实际水头降深观测数据, 试验中的抽水流量为  $Q=17.0 \text{ m}^3/\text{min}$ , 抽水持续时间为 420 min。

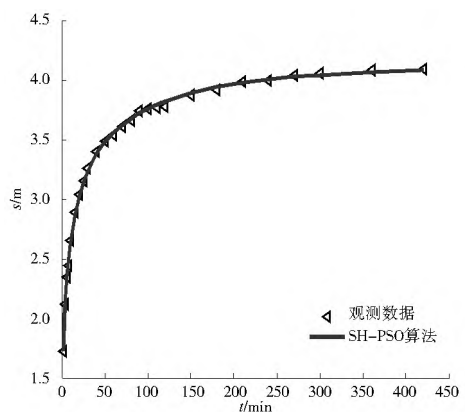


图 2 原始数据与计算结果

Fig. 2 Comparison of initial data and calculated results

400、600、800 和 1 200 等 10 种情况, 表 3 给出了不同种群规模下的迭代次数和运算时间。可以看出, 种群规模对算法的运算过程有明显的影响, 在待估导水系数取值范围一定的情况下, 当粒子种群规模  $N \leq 10$  且待估参数取值范围较小时, 会出现算法不收敛的情况; 当种群规模  $N \geq 50$  时, 随着粒子种群规模的增大, 迭代次数在逐渐减小, 搜索的稳定性和精度都在变好, 但运算时间在增加。上述分析说明, 选取种群规模要在精度、稳定性和运算时间之间进行权衡。就本文中算例而言, 若侧重于减少运算时间, 种群规模选取设置在 50~200 左右; 若侧重于高精度和较好的稳定性, 种群规模设置在 200~1 200 之间为宜。当种群规模为 5 000、8 000、10 000 时运算依然收敛, 但算法精度提升非常不明显且运算时间达到 10 min 以上。

### 3.2.3 导水系数初值取值范围的影响

为了分析待估参数初始值取值范围对算法收敛性的影响, 在数值实验中储水系数的取值范围是  $[0.002, 0.005]$ , 越流因子的取值范围是  $[0.001, 0.004]$ , 导水系数的最小值为 0.9, 最大值取 SM-PSO 算法计算出的导水系数参数真值的 2.5、10、20、50 和 100 倍, 当目标函数值小于  $4.8 \times 10^{-4}$  时认为算法收敛, 计算结果见表 3。可以看出, 随着参数取值范围的变大, 迭代次数有一定的波动, 但总的趋势为参数初值取值范围越大, 迭代次数越多、运算时间越长, 且在种群规模很大

的情况下没有出现不收敛的情况,说明参数初值的取值范围对收敛速度有一定的影响,但不会影响算法最终的收敛性。

表 3 迭代次数和运算时间与种群规模和导水系数初值间的关系

Tab. 3 Relationships among the iterations, running time, population size, and initial values of hydraulic conductivity

种群规模 参数倍数	5						10					
	2	5	10	20	50	100	2	5	10	20	50	100
迭代次数	*	*	*	*	*	*	*	*	*	71	79	158
运算时间/s	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.81	2.19	3.81
种群规模 参数倍数	50						100					
	2	5	10	20	50	100	2	5	10	20	50	100
迭代次数	42	50	49	55	56	58	38	51	45	47	54	59
运算时间/s	4.4	5.0	5.1	5.4	5.8	5.8	5.9	8.2	7.4	7.7	9.3	9.8
种群规模 参数倍数	120						200					
	2	5	10	20	50	100	2	5	10	20	50	100
参数倍数	2	5	10	20	50	100	2	5	10	20	50	100
迭代次数	47	49	40	51	53	54	41	38	50	44	49	50
运算时间/s	11.1	12.0	9.6	12.7	14.7	15.4	15.6	15.2	18.6	19.6	19.8	20.2
种群规模 参数倍数	400						600					
	2	5	10	20	50	100	2	5	10	20	50	100
迭代次数	32	36	44	41	46	53	34	38	37	38	42	47
运算时间/s	24.4	28.1	34.1	30.1	36.5	42.3	39.1	42.2	43.8	47.0	52.8	58.4
种群规模 参数倍数	800						1 200					
	2	5	10	20	50	100	2	5	10	20	50	100
迭代次数	34	40	41	42	44	45	34	33	34	37	42	42
运算时间/s	44.7	58.4	64.3	65.5	72.1	78.4	56.0	80.4	82.3	88.1	100	107

注: \* 表示在迭代 2000 次后计算结果仍然没有满足精度要求。

## 4 结语

本文构建的单纯形粒子群混合算法(SM-PSO)算法,能够有效地用于解决抽水试验资料分析和函数优化问题。数值实验结果表明:(1)SM-PSO 算法原理简单、计算结果不受人为因素的影响、计算结果精度高;(2)种群规模对迭代次数、运算时间和是否收敛有一定的影响,且在此算法中不宜采用太小的种群;(3)待估参数初值的取值范围对算法的收敛速度有一定的影响,但不影响算法最终的收敛性。总之,SM-PSO 算法是一种分析抽水试验资料、确定第一类越流含水层参数的有效方法之一。

## 参考文献(References):

- [1] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.(CHEN Chong xi, LIN Min. Groundwater dynamics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 郭建青,李彦,王洪胜,等.确定含水层参数的混沌序列优化算法[J].中国农村水利水电,2006(12):26-29.(GU O Jiar qing, LI Yan, WANG Hong-sheng, et al. Chaotic time series optimization algorithm for aquifer parameters estimation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(12): 26-29. (in Chinese))
- [3] 薛红琴,赵尘,刘晓东,等.确定天然河流纵向离散系数的有限差分-单纯形法[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2012,13(12):214-218.(XUAN Hong-qin, ZHAO Chen, LIU Xiaodong, et al. Finite difference method-simplex method for determination of longitudinal dispersion coefficient in natural river [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 13(12): 214-218. (in Chinese))

- [4] 张娟娟,郭建青,韩淑敏,等.基于改进模拟退火算法反演水文地质参数[J].中国农村水利水电,2005(9):8-11.(ZHANG Juanjuan, GU O Jiar qing, HAN Shu min, et al. Identification of hydrogeological parameters based on modified simulation annealing algorithm [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(9): 8-11. (in Chinese))
- [5] Kennedy J, Eberhart RC. Particle swarm optimization [C]. In: IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [6] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]. In: Proc of the sixth international symposium on Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995: 39-43.
- [7] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C]. In: IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1998: 69-73.
- [8] Clerc M. The swarm and the Queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization [C]. In: Proc of the Congress of Evolutionary Computation, 1999: 1951-1957.
- [9] Lovbjerg M, Rasmussen T K, Krink T. Hybrid particle swarm optimization with breeding and subpopulations [C]. In: Proc of the third Genetic and Evolutionary computation conference, San Francisco, USA, 2001.
- [10] Natsuki Higashi, Hiishi Iba. Particle swarm optimization with Gaussian mutation [C]. In: Proc of the Congress on Evolutionary computation, 2003: 72-79.
- [11] 高鹰,谢胜利.基于模拟退火的粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2004:47-50.(GAO Ying, XIE Sheng li. Particle swarm optimization based on simulated annealing [J]. Computer Engineering and Application, 2004: 47-50. (in Chinese))

(下转第 755 页)

## 5 结论

(1) 重庆主城铜锣山地区岩溶塌陷主要集中在分布于铜锣山槽谷地带嘉陵江组灰岩地层中, 上覆土层多为上部透水下部隔水的二元结构盖层。

(2) 自然条件下, 各种致塌因素的作用强度较弱, 塌陷一般为单个产生; 人类活动导致的塌陷由于各种致塌因素作用较强, 塌陷成群出现, 塌陷群分布主要受可溶岩分布、岩溶发育程度和塌陷诱发因素控制。

(3) 重庆主城铜锣山槽谷地区岩溶十分发育, 地下径流、暗河纵横交错, 浅部岩溶地下水与深部地下水联系密切, 地下工程开挖切穿岩溶含水层将导致浅部岩溶地下水水位快速下降。

(4) 重庆主城区铜锣山地区地面塌陷因为“潜蚀软化- 渗透破坏- 负压吸蚀”致塌。塌陷发生的前提条件是地面以下一定深度基岩表层存在岩溶裂隙或洞穴系统, 关键条件为地下水突发性降落并在土质盖层与溶洞顶部之间形成土洞, 土洞进一步扩大导致溶洞顶部土质盖层坍塌。

### 参考文献(References):

[1] 王明伟, 许泮. 云南岩溶山区生态环境地质问题与可持续发展研究综述[J]. 生态经济, 2014, 30(9): 185-187. (WANG Mingwei, XU Han. Research review of karst mountain ecological environmental geological problems and sustainable development in Yunnan[J]. Ecological Economy, 2014, 30(9): 185-187. (in Chinese))

[2] 程星. 岩溶塌陷机制及其预测与评价研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006. (CHENG Xing. Research on prediction and evaluation and the mechanism of the karst collapse. [M]. Beijing: Geological Press, 2006.)

[3] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 419-431. (LUO Xiaojie. The development features of karst collapse and its disaster prevention in Wuhan[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 419-431. (in Chinese))

[4] 祝军. 隧道工程对云雾山岩溶地区地质环境的影响[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(6): 776-780. (ZHU Jun. The influences of tunnel engineering on geological environment of Yunwushan karst area[J]. Resources Environment & Engineering., 2013, 27(6): 776-780. (in Chinese))

[5] 杨乐, 任秀文, 谢晓彤, 等. 重庆市“四山”规划区铜锣山片区地质环境专项调查报告[R]. 重庆地质矿产研究院, 2013. (YANG

Le, REN Xirwen, XIE Xiaotong, et al. The special investigation of geological environment of the Tongluo mountains in Chongqing[R]. Chongqing Institute of geology and mineral resources, 2013. (in Chinese))

[6] 谭开鸥, 李玉生. 重庆地区的岩溶塌陷及其形成机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 35(3): 23-27. (TAN Kaiou, LI Yusheng. Karst collapse and its formation mechanism in Chongqing region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 35(3): 23-27. (in Chinese))

[7] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 等. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 126-130. (ZHANG Lifen, ZENG Xiaosheng, YAO Yusheng, et al. Review on karst collapse in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 126-130. (in Chinese))

[8] 严若钧, 盛智勇. 郴州市岩溶地面塌陷分布规律及防治措施探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(2): 143-146. (YAN Ruojun, SHENG Zhiyong. Study on distribution and prevention measures of karst collapse in Chenzhou[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(2): 143-146. (in Chinese))

[9] 潘国林, 洪天求. 地下水示踪试验在岩溶塌陷成因判别中应用分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 125-129. (PAN Guolin, HONG Tianqiu. The application of groundwater tracer test to discriminant causes of the karst collapse[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 125-129. (in Chinese))

[10] Roberto Salva, Ira D. Sasowsky. Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge[J]. Journal of Hydrology(2002), 26: 1-11.

[11] 康彦仁. 岩溶地面塌陷的形成条件[J]. 中国岩溶, 1988, 7(1): 9-17. (KANG Yanren. Formation and condition of karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(1): 9-17. (in Chinese))

[12] 程星, 黄润秋. 岩溶塌陷的地质概化模型[J]. 水文地质工程地质, 2002(6): 30-34. (CHENG Xing, HUANG Runqiu. Geological conceptive models of karst collapse[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002(6): 30-34. (in Chinese))

[13] 陈洪凯, 廖云平, 唐红梅, 等. 地下工程岩土变形破坏机理与控制研究报告[R]. 重庆交通大学, 2014. (CHEN Hongkai, LIAO Yunping, TANG Hongmei. The mechanism and its control of rock deformation and failure of underground engineering[R]. Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

(上接第 732 页)

[12] 池元成, 方杰, 蔡国飙, 等. 基于差分进化和粒子群优化算法的混合优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2009(12): 2963-2966. (CHI Yuancheng, FANG Jie, CAI Guobiao, et al. Hybrid optimization based on differential evolution and particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Design, 2009(12): 2963-2966. (in Chinese))

[13] 张智星, 孙春在. 神经模糊和软计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 131-135. (ZHANG Zhixing, SUN Chunzai. Neuro-fuzzy and soft computing[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 131-135. (in Chinese))

[14] 张娟娟. 智能优化算法在含水层参数反演中的应用[D]. 西安:

长安大学, 2006. (ZHANG Juanjuan. Intelligent optimization algorithms in the applications of the aquifer parameters inversion[D]. Xi'an: Changan University, 2006. (in Chinese))

[15] U. S. Department of the Interior(USDI). Ground water manual[M]. Washington, D. C: Bureau of Reclamation, 1981: 121-127.

[16] 张鹤志, 郭建青. 粒子群优化算法在确定越流含水层参数中的应用[J]. 水利水电科学进展, 2011(3): 13-16. (ZHANG Huzhi, GUO Jianqing. Application of particle swarm optimization algorithm to determination of leakage aquifer parameters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011(3): 13-16. (in Chinese))