

文章编号:1001-4810(2013)03-0299-06

焦作煤矿区岩溶水水位统计模型研究

黄平华¹,白万备¹,邓 勇²

(1. 河南理工大学深部矿井建设重点学科开放实验室,河南 焦作 454000; 2. 扬州市水利局,江苏 扬州 225000)

摘 要:针对研究区地下水系统结构等资料不完备,本文基于质量守恒原理和微积分原理,建立了地下水水位统计预测模型和水位延迟模型,并在焦作矿区得到验证。焦作矿区岩溶地下水对于降水响应结果表明,当延迟时间为 10 个月时,岩溶地下水水位与降水的相关系数最大,为 0.83,而延时 2 个月和 5 个月时,相关系数分别只有 0.71 和 0.78;模型观测孔水位预测结果表明,相关系数超过 0.9 的观测孔达 60%,相关系数超过 0.8 的观测孔则高达 95%;模型水位影响因素分析结果显示,在降雨、矿坑排水、地下水蒸发 3 个影响因素中,煤矿区岩溶地下水水位动态对降雨量响应最敏感,说明降雨量,尤其是长期稳定的补给量是地下水水位最主要的影响因素。该类模型适用性强,简易方便,有广阔的应用前景。

关键词:焦作矿区;地下水水位预测;水位延迟模型;统计预测模型

中图分类号:P641.2 **文献标识码:**A

0 引 言

传统地下水动态模拟主要基于地下水流运动方程的数值法,在模型建立和实际应用中存在一些难以克服的困难,如地下水流类型、边界条件等难以准确确定,水文地质参数的优选过程复杂等。在自然、人工条件作用下,半干旱内陆区地下水系统时空变化极为明显,其影响因素复杂多样。建立描述自然条件与人类活动对地下水动态影响的量化模型,对于矿井突水水源的评估具有重要的现实意义。由于地下水动态受多种因素(如大气降雨、蒸发、地表水、人为因素等)的影响,从而决定了地下水动态具有周期性、趋势性和随机性。特别对于大区域地下水动态模拟,由于含水层特征、初始条件等的空间变异性,确定性模型存在着难以克服的困难,这给随机模型的介入提供了有利条件^[1-12]。例如,束龙仓等^[13]通过线性回归、非线性回归和遗传算法分别建立了岩溶水区的地下水与其开采量、降雨量之间的关系方程,计算结果表明,

回归模型在一定条件下对地下水水位动态模拟有较高的精度。文七万等^[14]针对枯水期地下水水位受外界影响因素较小的情况,在对多种模型进行统计参数对比后,得到了枯水期回归模型,结果证明效果较好,为预报春季地下水变化趋势提供了科学依据。Li 和 McLaughlin^[15]提出了一种可用于计算非平稳流动和输运问题的新随机模型——非平稳谱方法(NSM),并将该方法用于复杂水文地质条件地区进行地下水动态模拟,以获取有用的水文地质信息,为进一步深入研究提供了依据。王红雨^[16]以线性系统频谱分析方法为理论依据,将天然和人工两方面因素控制呈非平衡状态的地下水动态序列化为平稳序列,建立了地下水动态随机预报模型,该方法建模简单易行,效果较好,可用于地下水动态的中长期预报。杨志霞^[17]、成兴广^[18]等将地下水系统看作一个复杂的时间序列系统,针对地下水水位动态的周期性和随机性,采用多种时间序列模型进行了地下水水位动态模拟,并对模型进行了评定和检验,结果表明拟合精度和预测精

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A170313)、国家自然科学基金项目(50809024)、河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室 2012 年度开放基金(2012KF-05)

第一作者简介:黄平华(1978-),男,博士,主要从事煤矿水文地质学教学及科研工作。E-mail:hph2001@hpu.edu.cn。

收稿日期:2013-01-14

度均较高,收到了较好的效果。人工神经网络也大量运用于地下水动态模拟中,它可以避免数值模拟中对含水层系统时空变异敏感的弱点,取得了良好的效果^[19-22]。然而,随机模型忽略了地下水水位的影响因素的作用程度。基于此,本文采取随机模拟与确定性模型相结合的方法,针对研究对象地下水系统结构不甚清晰和基础资料不完备的实际,首次提出基于质量守恒原理和微积分原理,建立了地下水水位统计预测模型和水位延迟模型,并在焦作矿区得到验证,效果良好。

1 建立水位统计模型

1.1 地下水流模型

地下水水位变化反应了补给与排泄的一个动态平衡过程,也是地下水储量的直接响应。根据水量平衡方程:

$$Q_{\text{输入}} = Q_{\text{输出}} + \Delta\theta \quad (\Delta\theta \text{ 为含水系统水量变化值}) \quad (1)$$

假设地下水流为连续的一维方程,公式(1)还可描述为:

$$K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = S_c \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x \text{ 为地下水流程}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} h|_{t=0}=0 & 0 < t \\ h|_{x=0}=h_0 & 0 < x < \infty \end{cases} \quad (3)$$

式中: h 为水头, S_c 为含水层储水系数, K 为含水层导水系数。

对公式(2)运用拉普拉斯变化可求得:

$$h(x, t) = h_0 \operatorname{erfc}\left(\gamma \frac{x}{\sqrt{t}}\right), \gamma = \sqrt{\frac{S_c}{2K}} \quad (4)$$

公式(4)反映了地下水对补给区水头的响应。如果假定水流系统作为动力系统,由输入系统和输出系统构成,那么 $h(x, t)$ 代表系统响应,假设系统响应函数为:

$$g(x, t) = \operatorname{erfc}\left(\gamma \frac{x}{\sqrt{t}}\right) \quad (5)$$

记 $R(t)$ 为补给区的水头 ($x=0$), 即 $R(t) = h(x_0, t)$, 因此

$$H(x, t) = \int_0^t R(t) g(x, \tau - t) dt \quad (6)$$

[$g(x, \tau - t)$ 为系统响应函数]

根据公式(6),如果我们知道含水层的水文特征及对地下水补给波动的响应,那么就能通过卷积方式估计地下水补给量。反之,如果我们知道补给量和含水层响应,我们就可以判别含水层的水文属性。

1.2 水量平衡模型

从公式(6)知道,补给量是影响地下水水位自然变化的一个主要因子。根据水量平衡原理,我们知道降雨仅部分补给地下水,对这种补给可近似用以下水均衡方程表示:

$$R = P - Q_0 - ET \quad (7)$$

式中: R 为补给量; P 为降雨量; Q_0 为流出量,是降雨损失的一部分; ET 为蒸发量,是空气温度的函数,即:

$$ET = \lambda_0 + \lambda_1 T \quad (8)$$

式中: λ_0 和 λ_1 为常量, T 为温度。

因此,由公式(7)和(8)可推出:

$$R = C_1 + P - \lambda T \quad (9)$$

式中, C_1 为常量。

1.3 统计模型

我们假定在位置 X 处和 t 时刻,地下水头 H 和补给量 $R(t)$ 、矿坑排水量以及时间延迟 Δt 成比例,其关系为:

$$H(x, t, \Delta t) = C_2 + \alpha[R(t - \Delta t) - Q] \quad (10)$$

由于补给量未知,因此,认为降雨由长期 P_y 、短期 P_m 两部分组成,即:

$$P = P_y + P_m \quad (11)$$

因此式(10)可改写为:

$$H(x, t, \Delta t) = C + \alpha_1 P_y(t - \Delta t) + \alpha_2 P_m(t - \Delta t) - \alpha_3 Q + \beta T(t - \Delta t) \quad (12)$$

式中, β 为温度系数。

1.4 最大相关系数计算公式

时间延迟是含水层的水力传导系数、补给水头特征和补给距离的函数。由于水位观测孔位置的不同,延迟时间也将发生变化,因此,用上述公式计算延迟时间将是很困难的。为此,提出当降雨与水位之间相关性最大时的天数为延迟时间。计算公式如下:

$$\Delta t = \tau, \quad \text{if } r_{xy}(\tau) = \max[r_{xy}(1), \dots, r_{xy}(n)]$$

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (13)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}) - (y_{i+k} - \bar{y}) \quad (14)$$

式中: $r_{xy}(k)$ 为相关系数, k 为延迟时间, σ_x 、 σ_y 为标准差, $C_{xy}(k)$ 为自相关函数。

2 应用实例

气候变化趋势能在水位变化趋势中得到反映。虽然数值模型是一种分析气候改变对地下水水位影响的有效工具,但是该模型通常要求对含水层的水文

地质特征了解很充分。在特征信息缺乏的情况下,运用统计模型能有效评估地下水水位对气候变化的响应规律。据此,运用该模型探讨焦作矿区深层岩溶水的气候响应特征,分析地下水补给源,这将为矿井水害防治提供理论基础。

2.1 水文地质环境

焦作矿区位于中国太行山隆起带的东南缘,面积 1 300 km²,新华夏构造体系与秦岭纬向构造体系的复合部位、晋东南山字型构造体系的前弧东翼。矿区内主要突水含水层可分为 4 大类:第四系含水层;煤系砂岩含水层;石炭系灰岩含水层,也称太灰含水层(分上下两层,即 L₂ 和 L₈,两者间有隔水层分布);奥陶系灰岩含水层(O₂)。铝土质泥岩隔水层为奥陶系灰岩含水层与石炭系灰岩含水层之间的主要隔水层,平均厚度为 16.6 m,由于被后期构造破坏,局部失去了隔水作用,使上下层灰岩含水层地下水发生了一定的水力联系。由于煤矿区断层发育较好,密度较大,而含水层之间隔水层透水性较差,各含水层之间可能主要通过断层进行水力联系。这种含水层之间的水力联系加剧了水害事故的发生,同时也给水害矿井恢复治理增加了一定难度。

2.2 降雨量、涌水量与岩溶水水位关系

2.2.1 降雨量与岩溶水水位关系

从长期来看(图 1),奥灰水、太灰水(L₂)水位年变化幅度与年降雨量的相关性完全一致(R² = 0.8282)。从短期看,图 2 显示,从奥灰水到 L₂太灰水到 L₈太灰水,总体上,岩溶水水位随季节性变化幅度逐渐减弱。上述情况说明奥灰水与太灰水都接受山区降雨补给,但是受到矿井排水等因素的影响程度不一致。

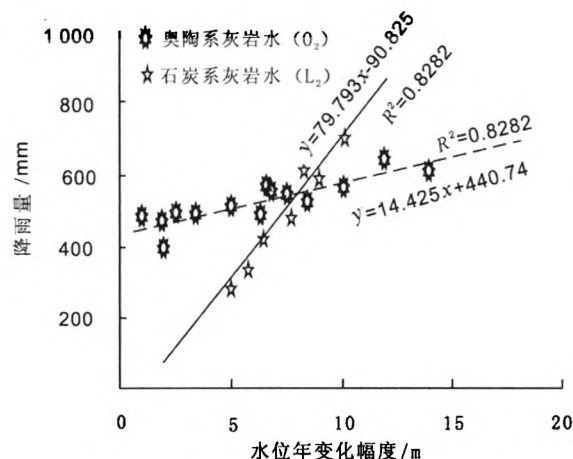


图 1 焦作矿井岩溶水水位年变幅与降雨量关系
Fig. 1 Relationship between annual amplitude of variation of the groundwater table and rainfall in the Jiaozuo coalmine district

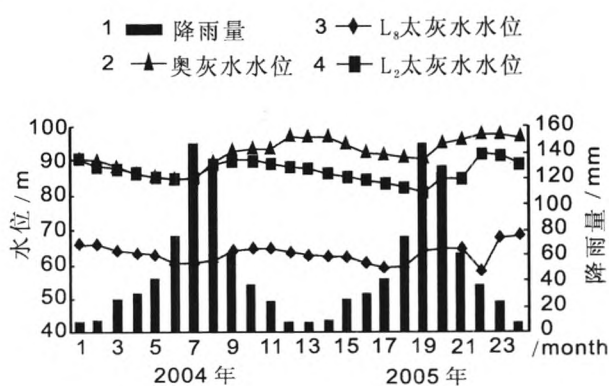


图 2 焦作矿井地下水水位与降雨量关系
Fig. 2 Relationship between the groundwater table and rainfall in the Jiaozuo coalmine district

2.2.2 涌水量与岩溶水水位关系

为了分析矿井涌水量与岩溶地下水的联系,选择煤矿开采量一直保持稳定水平的矿井,以排除向深部开采过程中导致涌水量增大的影响作用问题。图 3 显示矿井涌水量与矿区不同层位的岩溶水水位变化规律。奥灰水(O₂)、L₂层太灰水和 L₈层太灰水水位多项式拟合线与矿井涌水量多项式拟合线变化基本一致,显示了它们之间保持较好的同步关系,说明了矿井涌水量对矿井岩溶水水位变化有影响作用,即随着矿坑涌水量增加,岩溶水水位表现出降低趋势。综合以上分析说明,岩溶水水位可能主要受山区降雨量和矿坑涌水量的影响,可能还有其他影响因素存在。

2.3 岩溶水水位统计模型预测

为了探讨矿区地下水水位与降雨量、平均温度以及矿坑涌水量之间的关系,本文选取焦作矿区 1952 年到 1987 年区间共 271 组数据进行分析。统计模型中降雨量数据由年降雨量数据和月降雨量数据构成。根据公式(12)可得:

$$H(x, t, 10) = 0.512P_y(t-10) + 0.403P_m(t-10) - 0.324Q + 0.012T(t-10) - 1.237 \quad (15)$$

该方程的复相关系数 $R = 0.981$,模型有较好的线性关系,且回归结果也很好。

由于矿区水位观测孔位置距离补给区的水平距离较远,延迟时间也将较为明显。根据公式(13)可计算出,当降雨与水位之间的延迟时间为 10 个月左右时,相关系数达到最大值 0.83(图 4)。矿区碳酸盐岩含水层地下水时间序列水位运用公式(15)进行预测。图 5 是运用地下水水位统计模型对矿区 20 个观测孔水位预测结果与实际水位的相关系数的累计分布图。从这个图中我们能看出,60 % 被分析的观测孔的相关系数超过 0.9,95 % 的观测孔的相关系数大于 0.8。

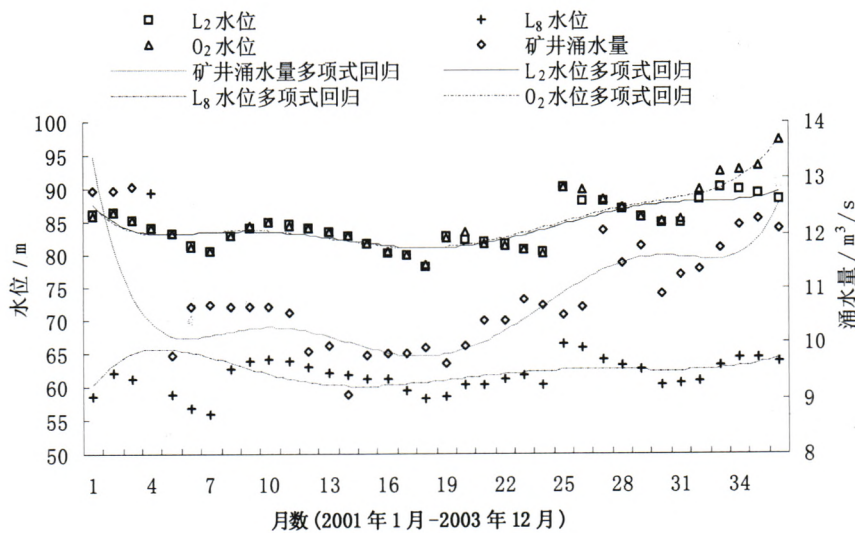


图 3 岩溶水水位和矿井涌水量动态变化特征

Fig. 3 The dynamic characteristics of karst water tables and mine discharge

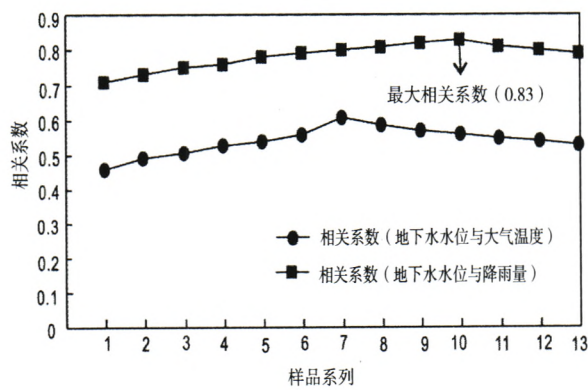


图 4 矿区奥灰水水位与降雨量及温度的相关性
Fig. 4 Correlation among groundwater table in the Ordovician limestone, precipitation and temperature in the Jiaozuo coalmine district

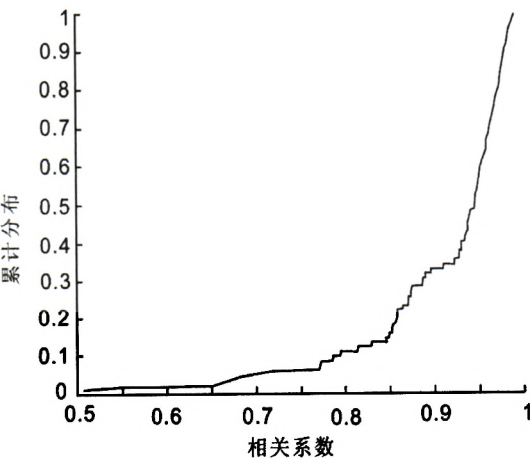


图 5 观测孔预测水位与实际水位的
相关系数累计分布
Fig. 5 Cumulative distribution of the correlation coefficient between predicted water table and actual water table in the observation wells

图 6 为观测水位与预测水位的对比。由该图可以看出观测孔水位预测结果与实际水位较为吻合,效果较好,说明运用统计模型能较好模拟研究区地下水变化特征,能表征降雨对矿区深层岩溶水的影响。水位统计模型从多元关系分析了影响因素与水位的关系。根据公式(15)可知,降雨量系数>矿坑涌水量系数>蒸发量系数,表明煤矿区深层地下水水位动态对 3 个因子敏感程度分别为:降雨量>矿坑涌水量>蒸发量。蒸发量因子对地下水影响最低,这是由于煤矿区深层岩溶地下水水位埋藏较深,地下水水位动态对蒸发条件不敏感。上述分析说明了降雨量,尤其是长期稳定的补给量是地下水水位最主要的影响因素。

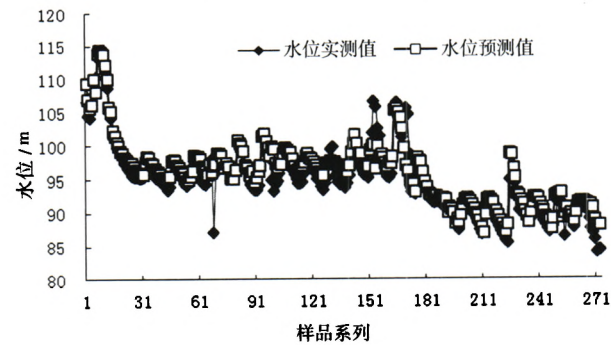


图 6 地下水水位实测值与统计模型预测值
Fig. 6 The measured groundwater table and the predicted groundwater table by statistical model

3 结 语

本文重点讨论推导了降雨与地下水系统动态之间的定量关系,建立了描述自然条件与人类活动对地

下水动态影响的地下水水位预测统计模型。降雨量逐渐降低,是影响矿区地下水水位持续下降的重要原因。从水位预测模型判别结果看,运用统计模型能判断大气降水对地下水水位的影响程度。计算结果表明,山区大气降水是焦作矿区地下水水位动态变化的重要驱动因素,这为矿井水害防治提供了理论依据。

致谢:论文承蒙河南理工大学宁超教授提供研究区域地下水水位数据,编辑对论文修改、完善给予了很大的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] TAKAHASHI K. Research of underground water numerical analysis Memod that considering water circulation system [Ph D. Thesis][D]. Kyoto:Deplanment of Urhan and Environmental Engineering,Kyoto University,2004.
- [2] DUAN Q,SOROOSHIAN S,GUPTA V K. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models [J]. Water Resources Research, 1992,28(4):1015-1031.
- [3] 刘国东,丁晶. 运用BP网络预测地下水水位[J]. 西安地质学院学报,1997,19(2):52-57.
- [4] 赵延涛,姜宝良. 基于BP神经网络的地下水水位预测[J]. 勘察科学技术,2001,(4):7-10.
- [5] 过仲阳,陈中原,宋保平,等. 应用动量BP算法对地下水水位进行动态预测[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2000,(3):79-84.
- [6] 屈忠义,陈亚新,史海滨,等. 地下水文预测中BP网络的模型结构及算法探讨[J]. 水利学报,2004,(2):88-93.
- [7] 魏加华,张建立,李宇,等. 地下水系统BP网络模型的设计与实现[J]. 工程勘察,2002,(2):20-24.
- [8] 罗定贵,郭青,王学军. 基于RBF神经网络的地下水动态模拟与预测[J]. 地球学报,2003,45(5):476-478.
- [9] 邱林,胡庆和,冯丽云,等. 改进RBF神经网络在地下水动态预报中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2004,25(2):1-4.
- [10] 张保祥,刘青勇,卢朝霞. 基于神经网络和遗传算法的济南市区岩溶地下水预报模型研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2004,35(3):436-441.
- [11] 王文圣,廖杰,丁晶. 浅层地下水水位预测的小波网络模型[J]. 土木工程学报,2004,37(12):63-66.
- [12] 陈葆仁,洪再吉. 地下水动态及其预测[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [13] Tanakamaru H. Parameter identification of tank model with the genetic algorithm [C]// Annuals of Disaster prevention Research Institute,1993:231-239.
- [14] 束龙仓,黄晶,李亚平. 镇江市地下水动态变化规律研究[J]. 长春科技大学学报,2001,31(2):150-153.
- [15] 文七万. 延边地区枯水期地下水动态预报[J]. 吉林水利,2002,232(2):18-19.
- [16] 王红雨. 频谱分析方法在地下水动态预报中的应用[J]. 宁夏农学院学报,1994,15(4):30-37.
- [17] 杨志霞. 时间序列模型在深层地下水水位预测中的应用[J]. 河北工程技术高等专科学校学报,2000,(3):34-38.
- [18] 成兴广,成绍华,马福才. 三种时间序列模型在地下水动态模拟中的应用分析[J]. 建材地质,1997,91(2):34-36.
- [19] Emery Coppola Jr, Ferenc Szidarovsky, Mary Poulton, et al. Artificial Neural Network Approach for Predicting Transient Water Levels in a Multilayered Groundwater System under Variable State, Pumping, and Climate Conditions[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2003, 8(6): 348-360.
- [20] Abdalla Shigidi, Luis A Garcia. Parameter Estimation in Groundwater Hydrology Using Artificial Neural Networks [J]. Journal Of Computing In Civil, Engineering, 2003, 17(4): 281-289.
- [21] Daliakopoulos I N, Coulibaly P, Tsanis I K. Groundwater level forecasting using artificial neural networks[J]. Journal of Hydrology, 2005, 309(1-4):229-240.
- [22] Coppola E A, Rana A J, Poulton M M, et al. A neural network model for predicting aquifer water level elevations[J]. Ground Water,2005,43(2):231-241.

Study on the statistical prediction model of karst groundwater table in the Jiaozuo coalmine

HUANG Ping-hua¹, BAI Wan-bei¹, DENG Yong²

(1. Deep Mine Construction Key Discipline Laboratory, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Yangzhou Water Resources Bureau, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: The Jiaozuo coalmine, 1 300 km² in area, situates in the southeast edge of the Taihangshan uplift in China. The Ordovician limestone aquifer and the Carboniferous limestone aquifer are separated into the upper and the lower aquifer in the mining area by bauxitic mudstone. Because of the impact of the late period tectonic movement, the bauxitic mudstone lost the waterproof function locally, leading the upper and the lower limestone aquifers get some hydraulic connections, which not only aggravate the disaster accidents, but also increase certain difficulty for the restoration of mine water damage. In view of being no complete groundwater system structure data in the study area, the statistics prediction model and delay model of groundwater table is established on the basis of principles of mass conservation and calculus to discuss the response characteristics of karst groundwater to climate and analyze the main influence factors, and then pro-

vide theoretical support for mine water disaster prevention and control. The calculation results show that, when the time delay is 10 months, the correlation coefficient of karst groundwater table and precipitation is up to maximum 0.83, and when the time delay is 2 months or 5 months, the correlation coefficient is only 0.71 and 0.78. The predicting results of groundwater table by prediction model show that the observation hole of the correlation coefficient over 0.90 is up to 60 %, and the observation hole of the correlation coefficient over 0.80 reach 95 %. The model level influence factors analysis shows that the regime of karst groundwater table is most sensitive to rainfall in the coalmine area among the three factors — the rainfall, the mine drainage, and the groundwater evaporation. It is showed that the rainfall recharge response, especially the long-term stability recharge is the main factor influencing the groundwater table. The models, simple and convenient, have better applicability and application prospect.

Key words: Jiaozuo coalmine district; groundwater level prediction; water level delay model; statistical forecasting model

(编辑 韦复才)

国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室 2014 年开放研究课题申请指南

国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室依托于中国地质科学院岩溶地质研究所,主要研究方向:(1)岩溶动力系统的形成和运行规律;(2)岩溶动力系统的类型和区域分布规律;(3)学科交叉、应用研究。2013 年在广西科学技术厅和岩溶地质研究所的支持下设立开放课题,围绕岩溶动力系统与全球变化、岩溶地区水循环、岩溶生物地球化学循环过程及相关测试应用技术研究开展研究。

一、重点资助或优先资助研究领域

(一) 岩溶动力系统的形成和运行规律

1. 岩溶动力系统中碳同位素特征与碳来源甄别;
2. 岩溶—水—生物体系中 CO_2 的循环规律;
3. 岩溶区碳酸盐岩—植被—土壤(或石灰土)相互作用及其碳汇效应;
4. 岩溶动力系统碳分解、周转速率;
5. 水生植物对水体碳利用效率和能力及其对岩溶碳汇稳定性的影响。

(二) 岩溶动力系统与古环境、古气候记录

1. 近千年来中国西南地区古气候、古环境变化记录;
2. 古环境、古生态重建技术指标研究。

(三) 岩溶动力系统与水文过程

1. 全球变化对岩溶水文过程影响;
2. 岩溶区地表、地下水耦合的水文模型;
3. 岩溶区水土流失途径及防治措施;

4. 典型地下河水污染物来源、迁移机制与防治对策研究。

(四) 岩溶动力系统与相关技术应用研究

1. 岩溶沉积物/石灰土地质年代学及同位素地球化学测试技术与方法研究;
- 2 岩溶洞穴、峰丛洼地无线传输技术方法研究。

二、注意事项

请登陆中国地质科学院岩溶地质研究所或岩溶动力学重点实验室网站(<http://www.karst.ac.cn/karstcn/index.aspx> 或 <http://www.karst.edu.cn/karst/indexcn.jsp>)下载并阅读《岩溶动力学重点实验室开放研究课题管理办法》,课题、经费和成果的管理将严格按照该规定执行。

根据要求,课题经费不再拨付到外单位,请课题申请者自行联系我实验室固定工作人员作为课题成员之一,申请者或其他成员要在我实验室工作至少 1 个月,同时鼓励选择桂林丫吉、毛村岩溶试验场为研究区(点)。

2014 年度资助课题的年限为 2 年(研究期限 2014.01—2015.12)。

申请截止日期:2013 年 10 月 31 日

联系地址:广西桂林市七星路 50 号 岩溶动力学重点实验室 541004

联系人:张春来 电话:0773—5817717 传真:0773—5813708 E-mail: chlzhang@karst.ac.cn