

基于 Winpest 反演分析的降雨入渗补给量分区

宋词, 许模

(成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要: 在水文地质条件复杂地区进行地下水数值模拟时, 需要对降雨入渗补给量进行主观确定, 参数识别过程比较复杂。利用 Modflow 软件, 建立了 Winpest 反演模型对渗透系数进行优化, 并通过分析反演过程中观测孔模拟水位和实测水位的拟合情况, 进行降雨入渗补给量分区优化。将该模型运用于璧板坡隧道隧址区, 结果表明: 研究区需先按表层出露的不同层位进行降雨入渗补给量初次分区, 再对已有分区按不同高程范围进行二次分区和降雨入渗补给量优化方能实现地下水初始渗流场的高精度拟合。利用 Winpest 反演分析方法, 降低了人为设定降雨入渗补给量的盲目性, 为水文地质条件复杂地区的地下水初始渗流场数值模拟提供了一种更加快捷高效的途径。

关键词: 地下水数值模拟; Winpest 反演分析; 降雨入渗补给; 分区优化; 璧板坡隧道

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2013)05-0103-05

Rainfall Infiltration Recharge Partition Based on Winpest Inversion Analysis

SONG Ci, XU Mo

(Chengdu University of Technology, Environment & Civil Engineering College, Chengdu 610059 China)

Abstract: In the numerical groundwater flow simulation of areas with complex hydrogeological conditions, the rainfall infiltration recharge rate is usually assumed, which results in complicated model parameter identification. In this study, Modflow software was used to develop the Winpest inversion model, which can optimize hydraulic conductivities and rainfall infiltration recharge partition based on the fitting between the measured and simulated water levels. The model was applied to Bibanpo tunnel zone in XX County of XX Province. The results showed that the rainfall infiltration recharge of the study area can be partitioned initially according to the different layers of surface outcrops, and then the partitions can be divided again based on different elevations and optimized to realize the high precision fitting of initial groundwater seepage field. The Winpest inversion analysis method can reduce the blindness of assumed rainfall infiltration recharge and thus offer a more efficient and faster approach for modeling the initial groundwater seepage field with complicated hydrogeological conditions.

Key words: Groundwater numerical model; Winpest inversion analysis; Rainfall infiltration; Recharge; Partition; Winpest; Bibanpo tunnel

近年来, 地下水数值模拟被广泛运用于复杂水文地质背景下的地下水问题研究中, 而在建立地下水数值模型过程中, 模型调参工作十分关键。在水文地质条件较为复杂时, 模拟范围内不同区域降雨入渗量不同, 人工调试降雨入渗量参数带有很大的盲目性, 不但参数识别过程漫长、工作量大, 而且很难实现初始渗流场的精确拟合。因此本文以水文地质条件复杂的璧板坡隧道隧址区为研究区, 基于 Modflow 软件平台, 建立相应的 Winpest 反演模型, 通过对反演后各观测孔水位拟合差的分析进行降雨入渗补给量分区优化。

1 Winpest 反演模型的建立

Winpest 反演模型是对通过 Modflow 建立的水文地质模型进行输入、输出数据的读取和改写来实现模型参数优化的^[2]。因此基于 Modflow 软件平台建立反演模型包括两大步骤, 一是水文地质概念模型的建立, 二是反演条件的设定。

1.1 水文地质模型建立

1.1.1 研究区水文地质概况

璧板坡隧道隧址区位于云南与贵州接壤部位, 属亚热带

收稿日期: 2013-03-08 修回日期: 2013-08-01 网络出版时间: 2013-08-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130822.1705.009.html>

作者简介: 宋词(1990-), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事环境水文地质方面研究。E-mail: 182310064@qq.com

通讯作者: 许模(1963-), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 从事工程建设区的水文地质、环境地质问题等研究。E-mail: xm@cdu.edu.cn

季风气候区,气候温和,冬干夏湿,多年平均降水量 1 200 mm,降雨多集中在 5 月- 10 月,占年降雨量的 88%。西部地形相对平缓,高原面貌保存完好,东部河流切割强烈、地形陡峻,形成山峦起伏的中山地貌。隧址区内为北北东向新华夏系构造与莲花状构造接壤地带,由一系列北北东向平行排列的开阔短轴褶曲和高角度压性逆冲断层组成,构造线大致呈南北向展布。区内强富水含水层组为碳酸盐岩裂隙岩溶含水层组,包括二叠系栖霞组至茅口组(P_1)和石炭系摆佐组至马坪群($C_{1b} \sim C_{3mp}$);中等富水含水层组为碳酸盐岩碎屑岩裂隙岩溶水,包括三叠系下统永宁镇组(T_{1yn})和石炭系下统大塘组(C_{1d});弱富水含水层组为碎屑岩裂隙含水层组和玄武岩孔洞裂隙含水层组,前者包括三叠系下统飞仙关组(T_{1f})、二叠系上统宣威组(P_{2xn})和二叠系下统梁山组(P_{1l}),后者为二叠系上统峨眉山玄武岩组($P_{2\beta}$),如图 1 所示。区内地下水主要补给来源为大气降雨。

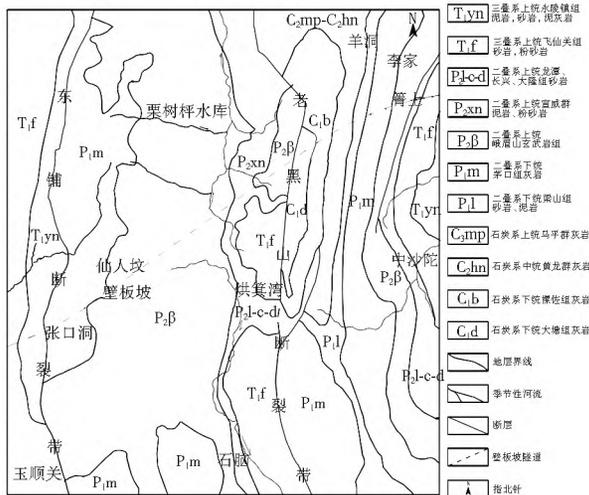


图 1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological conditions of the study area

1.1.2 水文地质概念模型

模型范围为一矩形,东西长 13 000 m,南北宽 15 000 m,按照 50 m 网格将其剖分为 260 行、300 列,按富水性及岩溶类型将模型分为 4 层,其中第一层(K_1)代表富水性弱的碎屑岩裂隙含水层组和玄武岩孔洞裂隙含水层组,模型中概化为隔水层;第二层(K_2)和第四层(K_4)都代表富水性强的碳酸盐岩裂隙岩溶含水层组,其中第二层(K_2)代表以垂直入渗补给为主的裸露型岩溶含水层组,岩溶洞隙十分发育,模型中概化为强透水层,而第四层(K_4)代表上覆玄武岩孔洞裂隙含水层组(K_1),以水平径流为主的埋藏型岩溶含水层组,岩溶发育程度偏低,模型中概化为中强度透水层;第三层(K_3)代表富水性中-弱的碳酸盐岩夹碎屑岩裂隙岩溶含水层组,模型中概化为弱透水层。

隧址区处于南盘江和北盘江的分水岭地带,可溶岩区(模型中的透水层部分)的地下水以分水岭为界,南西侧地下水自北向南径流,而北东侧地下水则自南向北径流,它们分别在模型的南北边界流出模拟区,因此将南北边界概化为第二类水头边界。模型左右边界为富水性贫乏的非可溶岩,在

模型中概化为隔水边界。非可溶岩分布区(模型中的弱透水层和隔水层部分)的地下水主要以泉的方式排泄,由于泉流量较小,在模型中忽略不计。降雨入渗补给为地下水主要补给来源。两条南北走向的高角度压性逆冲断层(F_1 、 F_2)贯穿模拟区,起着横向阻水作用,将整个模型分割成了三个独立的一级岩溶水系统,分别记为 \tilde{N} 、 $\tilde{0}$ 、 $\tilde{0}$,在模型中用隔水墙模拟记为 F_1 、 F_2 。而在表层出露 K_1 、 K_2 和 K_3 三个模型层,见图 2、图 3。

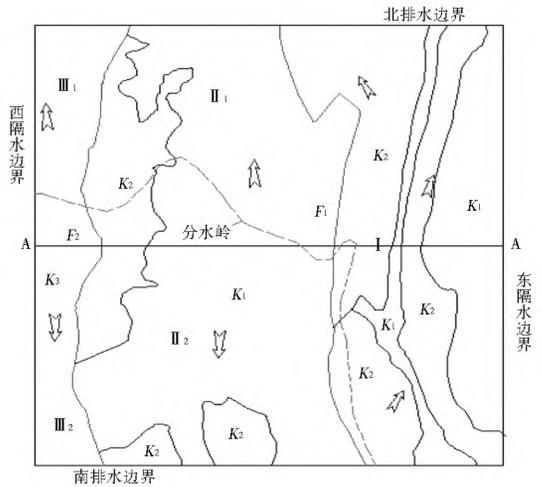


图 2 水文地质模型平面图

Fig. 2 Plan view of hydrogeological model

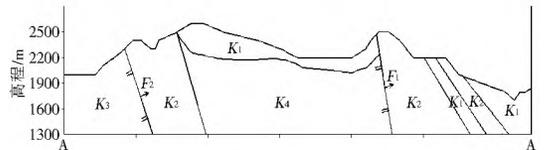


图 3 水文地质模型剖面图

Fig. 3 Cross section view of hydrogeological model

1.2 反演初始条件设置

1.2.1 初始降雨入渗量

研究区的年平均降雨量为 1 200 mm,其中约 88%集中在雨季,降雨入渗系数经验取值范围为 5%~ 20%。因此在整个研究区内降雨入渗量的变动范围为:雨季 53~ 211 mm/a,旱季 7~ 29 mm/a。本次取初始降雨入渗补给量为:雨季 150 mm/a,旱季 20 mm/a,以面状补给的形式统一赋给最顶层,对应的初始降雨量入渗系数为 0.14。

1.2.2 初始渗透系数

进行参数反演之前需根据含水层实际水文地质特征为反演模型提供一组合理的初始参数。一方面模型各层的初始渗透系数要在经验取值范围内,另一方面,代表碳酸盐岩裂隙岩溶含水层组的 K_2 、 K_4 层的渗透系数要能反应其岩溶发育的各向异性特征。

根据前文水文地质模型概化中各模型层的性质, K_1 模型层水平渗透系数经验取值范围一般在 $8.64 \times 10^{-3} \sim 8.64 \times 10^{-5} \text{ m/d}$ 之间, K_3 层水平渗透系数取值范围一般在 $0.864 \sim 8.64 \times 10^{-3} \text{ m/d}$ 之间, K_2 、 K_4 层的水平渗透系数取值范围在 $8.64 \sim 0.864 \text{ m/d}$ 之间。但是, K_2 垂直渗透系数比水平方向渗透系数要大,而 K_4 的取值较 K_2 要小。

2 反演结果及分析

在完成初始条件设置后,运行 Winpest 反演模型,拟合初始渗透系数和初始观测孔水位,结果见表 1、表 2,其中水位拟合差= 观测水位- 模拟水位。

表 1 渗透系数初始反演值

Table 1 Initial inversion values of hydraulic conductivity

坐标轴	渗透系数/(m·d ⁻¹)			
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
X	8.626 288×10 ³	0.867 717	8.843 135×10 ³	0.693 212
Y	8.630 772×10 ³	0.873 213	8.883 527×10 ³	4.319 292
Z	8.681 299×10 ⁴	8.628 450	8.720 084×10 ³	0.699 440

表 2 观测孔初始拟合情况

Table 2 Initial fitting results between the measured and simulated water levels

观测孔编号	观测水位/m	模拟水位/m	初始水位拟合差/m
DK 980+ 330	2 121.78	2 111.39	10.39
DK 982+ 820	2 206.81	2 225.82	- 19.01
DK 983+ 415	2 220.20	2 238.36	- 18.16
DK 987+ 925	2 019.64	2 037.02	- 17.38
DK 989+ 305	1 946.74	1 963.06	- 16.32
DK 991+ 315	2 098.47	2 089.39	9.08

由表 2 可知:

(1) 位于模型表层 K₂ 出露区域的 DK 991+ 315 孔和 DK 980+ 330 孔的水位拟合差为正,而处于 K₁ 出露区域的观测孔均为负值,说明由于透水、富水性的差异,模型表层出露的不同层位应分别赋予不同的降雨入渗补给量。

(2) 位于 K₂ 出露区的观测孔水位拟合差为正,说明其观测水位高于模拟计算水位,降雨入渗补给量偏低。这是由于 K₂ 层代表以垂向补给为主的裸露型岩溶含水层组,垂向岩溶发育,降雨入渗能力强,因此应增加降雨入渗补给量。位于 K₁ 出露区的观测孔水位拟合差都为负值,说明观测水位低于模拟计算水位。这是由于 K₁ 代表为碎屑岩裂隙含水层和玄武岩孔洞裂隙含水层,降雨入渗能力弱,因此应适当减小其降雨入渗补给量。

3 降雨入渗补给量分区优化

3.1 初次分区优化

根据降雨入渗补给量,按照不同出露层位进行初次分区,分别记 K₁、K₂、K₃ 层出露区降雨入渗补给量为 R₁、R₂、R₃,对应降雨入渗系数为 α₁、α₂、α₃(图 4)。初次分区后分别调整降雨入渗补给量,其中 R₁ 为雨季 127 mm/a,旱季 17 mm/a,对应降雨入渗系数 α₁ 为 0.12; R₂ 为雨季 169 mm/a,枯季 23 mm/a,对应降雨入渗系数 α₂ 为 0.16。由于受右侧压性断层的影响, K₃ 出露区基本被分割成一个独立的水文的地质单元,且区内无观测孔,因此缺乏地下水位精确拟合所需数据。考虑到 K₃ 富水性强于 K₁ 层,弱于 K₂ 层,降雨入渗补给量应在 R₁ 与 R₂ 之间,估测 R₃ 为雨季 150 mm/a,旱季设为 20 mm/a,对应降雨入渗系数 α₃ 为 0.14。

初次降雨入渗补给量分区优化后,钻孔拟合见表 3。由

表 3 数据可以看出:

(1) 对于 K₂ 出露区内的两个观测孔 DK 980+ 330 和 DK 991+ 315,当降雨入渗补给量增幅相同时,孔 DK 991+ 315 的水位拟合差减小幅度远高于孔 DK 980+ 330。说明给 K₂ 层出露区赋予同一个降雨入渗补给量并不合理。

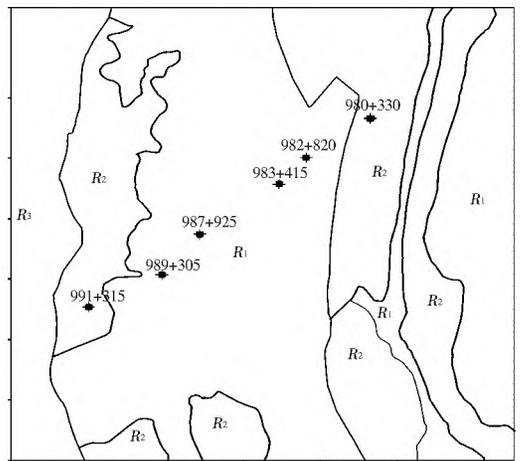


图 4 降雨入渗补给量第一次分区

Fig. 4 Initial partition of rainfall infiltration recharge

表 3 降雨入渗补给量初次分区后观测孔拟合情况

Table 3 The fitting results after the first rainfall infiltration recharge partition

观测孔编号	观测水位 /m	第一次分区后模拟水位/m	第一次分区后水位拟合差/m	初始水位拟合差/m
DK 980+ 330	2 121.78	2 114.41	7.37	10.39
DK 982+ 820	2 206.81	2 217.1	- 10.29	- 19.01
DK 983+ 415	2 220.20	2 230.23	- 10.03	- 18.16
DK 987+ 925	2 019.64	2 023.85	- 4.21	- 17.38
DK 989+ 305	1 946.74	1 950.26	- 3.52	- 16.32
DK 991+ 315	2 098.47	2 100.48	- 2.01	9.08

虽然同在 K₂ 出露区,孔 DK 991+ 315 所在区域高程范围为 2 150~ 2 250 m 且区内等高线稀疏,地势相对平缓;而孔 DK 980+ 330 处于 2 250~ 2 550 m 范围内,地势高,等高线密集,地势起伏大,因此后者附近地下水向四周低地势区的散流作用强,在降雨入渗补给增量相同的情况下,孔内水位的涨幅不如前者明显。

(2) 对于 K₁ 出露区内有四个观测孔,当降雨入渗补给减小相同数量时,孔 DK 982+ 820 和孔 DK 983+ 415 水位拟合差增幅相近,孔 DK 987+ 925 和孔 DK 989+ 305 水位拟合差增幅相近,但前者小于后者。说明也不能给 K₁ 出露区赋予同一个降雨入渗补给量。

经分析可知,孔 DK 989+ 305 和 DK 987+ 925 处于 2 200~ 2 450 m 的高程范围,地势较高;而与之相邻的孔 DK 982+ 820 和 DK 983+ 415 处于 2 000~ 2 200 m 的高程范围,地势较低,属于地下水接受区。因此在降雨入渗补给量减小相同值的情况下,低地势区模拟计算的地下水位降幅比高地势区的小。

3.2 二次分区优化

基于上述分析,以 2 200 等高线为分界线,将 K₁ 出露区分为 R₁₁ 和 R₁₂ 两个降雨量入渗补给区: R₁₁ 区的高程范围为

2 000~ 2 200 m, 其降雨入渗补给量减为雨季 100 mm/a, 旱季 13 mm/a, 对应降雨入渗系数 α_{11} 为 0.09; R_{12} 区的高程范围为 2 200~ 2 500 m, 其降雨入渗补给量减为雨季 115 mm/a, 旱季 15 mm/a, 对应降雨入渗系数 α_{12} 为 0.1。

以 2 250 m 等高线为界, 将 K_2 出露区分为 R_{21} 和 R_{22} 两个降雨入渗量补给区: R_{21} 区高程范围为 2 150~ 2 250 m, 降雨入渗补给量适当减小为雨季 160 mm/a, 旱季 22 mm/a, 对应的降雨入渗系数 α_{21} 为 0.15; R_{22} 区高程范围为 2 250~ 2 500 m, 降雨入渗补给量适当增大为雨季 180 mm/a, 旱季 25 mm/a, 对应降雨入渗系数 α_{22} 为 0.17。

最终分区图见图 5, 二次分区后观察孔水位拟合情况见表 4。

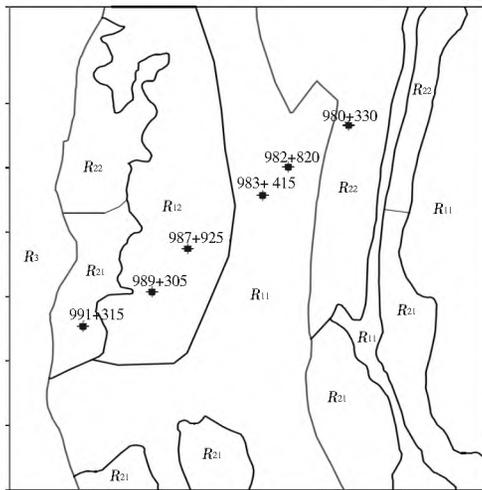


图 5 降雨入渗系数第二次分区

Fig. 5 The second infiltration coefficient partition

表 4 降雨入渗补给量二次分区后观测孔水位拟合情况

Table 4 The fitting results after the second infiltration coefficient partition

观察孔编号	观测水位 / m	第二次分区后模拟水位 / m	第二次分区后水位拟合差 / m	第一层分区后水位拟合差 / m
DK 980+ 330	2 121. 78	2 118. 39	3. 39	7. 37
DK 982+ 820	2 206. 81	2 210. 02	- 3. 21	- 10. 29
DK 983+ 415	2 220. 20	2 223. 96	- 3. 76	- 10. 03
DK 987+ 925	2 019. 64	2 023. 02	- 3. 38	- 4. 21
DK 989+ 305	1 946. 74	1 949. 60	- 2. 86	- 3. 52
DK 991+ 315	2 098. 47	2 097. 39	1. 08	- 2. 01

由表 4 可知, 通过两次降雨入渗补给量分区后, 地下水模拟水位与实际观测水位差距较小, 此时仅需再次运行 Winpest 模型对渗透系数进行微调即可到达理想的模拟效果。

4 渗透系数优化

在完成了降雨入渗补给量分区优化后, 还需要运行 Winpest 模块进行含水层渗透系数的微调, 以达到观测孔水位的精确拟合。观测孔水位最终拟合情况, 微调后模型各层的渗透系数优化结果分别见表 5、表 6。

由表 5 可知, 各钻孔拟合差的最大绝对值为 0.81 m, 最小为 0.28 m。模型地下水位和实际地下水位拟合程度较高。

表 5 观察孔水位最终拟合情况

Table 5 The final fitting results between the measured and simulated water levels

钻孔编号	观测水位 / m	最终模拟水位 / m	最终水位拟合差 / m
DK 980+ 330	2 121. 78	2 121. 09	0. 69
DK 982+ 820	2 206. 81	2 207. 62	- 0. 81
DK 983+ 415	2 220. 20	2 220. 89	- 0. 69
DK 987+ 925	2 019. 64	2 018. 86	0. 78
DK 989+ 305	1 946. 74	1 946. 37	0. 37
DK 991+ 315	2 098. 47	2 098. 19	0. 28

表 6 渗透系数最终优化结果

Table 6 The final optimization results of hydraulic conductivity

模型方向	渗透系数 / (m · d ⁻¹)			
	K_1	K_2	K_3	K_4
X	1. 710 920 × 10 ³	0. 867 717	8. 843 135 × 10 ³	0. 693 212
Y	8. 630 772 × 10 ³	0. 864 011	8. 866 377 × 10 ³	4. 319 292
Z	5. 288 439 × 10 ³	5. 076 302	8. 720 084 × 10 ³	0. 699 440

5 结论

(1) 按模型表层出露的不同层位将模型分为 3 个不同的降雨入渗补给区, 分别记为 R_1 、 R_2 、 R_3 , 其中 R_1 的降雨入渗补给量为雨季 127 mm/a, 旱季 17 mm/a; R_2 为雨季 169 mm/a, 旱季 23 mm/a; R_3 为雨季 150 mm/a, 旱季 20 mm/a。

(2) 降雨入渗补给量初次分区后能到达的模拟精度较低, 需进行二次分区。本文分别以 2 200 m、2 250 m 等高线为界将 R_1 再分为 R_{11} 和 R_{12} 两区域, R_2 亦分为 R_{21} 和 R_{22} 两区域。优化后的 R_{11} 区雨季降雨入渗补给量为 100 mm/a, 旱季为 13 mm/a; R_{12} 的雨季为 115 mm/a, 旱季为 15 mm/a; R_{21} 的雨季为 160 mm/a, 旱季 22 mm/a; R_{22} 的雨季为 180 mm/a, 旱季 25 mm/a。

(3) 完成降雨入渗分区后, 再次利用 Winpest 模型对初始渗透系数进行微调, 模拟水位和实际水位能达到较高度度的拟合, 各钻孔拟合差的最大绝对值为 0.81 m, 最小为 0.28 m。

参考文献 (References):

- [1] 许模, 张强. 壁板坡隧道岩溶涌突水危险性评价 [R]. 成都: 成都理工大学地质灾害防治与地质灾害环境保护国家重点实验室, 2009: 17-26. (XU Mo, ZHANG Qiang, Hazard Estimation on Karst Water Bursting of Bi Banpo Tunnel [R]. Chengdu: SKLGP of CDUT, 2009: 17-26. (in Chinese))
- [2] Waterloo Hydrogeologic Inc. USER'S MANUAL for WinPEST [Z]. 1999: 4-5.
- [3] 董艳辉, 李国敏. 应用并行 PEST 算法优化地下水模型参数 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 140-144. (DONG Yair hui, LI Guo min. Optimization of Model Parameter for Groundwater Flow Using Parallelized Pest Method [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 140-144. (in Chinese))
- [4] 王运生, 黄润秋. 园梁山隧道背斜段涌水机制探讨 [J]. 地球科学进展, 2004, (19): 355-357. (WANG Yurr sheng, HU ANG Rurr qiu. Discussion on Water Bursting Mechanism of Yuan Li angshan Tunnel Anticline [J]. Advance In Earth Sciences,

- 2004, (19): 355-357. (in Chinese)
- [5] 刘立才, 陈鸿汉. 梯度法在水文地质参数估值中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2003, (3): 39-41. (LIU Lì cai, CHEN Hong han. Application of Gradient Method to Calculation of Hydrogeological Parameters[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, (3): 39-41. (in Chinese))
- [6] 刘瑞新. 蜀山背斜岩溶水系统特征研究[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(9): 41-45. (LIU Ruì xin. A Study on the Shushan Anticline Karstic Water System Characteristics[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(9): 41-45. (in Chinese))
- [7] 朱斌, 武强. 断层影响下的地下水流数值模拟[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(1): 31-35. (ZHU Bin, WU Qiang. Groundwater Modeling under the Effect of Faults[J]. Journal of Gui Ling Institute of Technology, 2005, 25(1): 31-35. (in Chinese))
- [8] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 科学出版社, 2007. (XUE Yuqun, XIE Chunhong. Groundwater Modeling[M]. Science Press, 2007. (in Chinese))
- [9] 周训, 陈明佑. 埋藏型岩溶地下水源地的三维数值模拟[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 6-11. (ZHOU Xun, CHEN Mingyou. 3D Numerical Modeling To Groundwater Wellhead in Buried Karst Area[J]. Karst in China, 2006, 25(1): 6-11. (in Chinese))
- [10] 林传年, 李利平. 复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1470-1476. (LIN Chuannian, LI Lì ping. Research On Forecast Method of Tunnel Water Inrush In Complex Karst Areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1470-1476. (in Chinese))
- [11] 戴春华. 中梁水库岩溶水流数值模型及渗漏量计算[D]. 南京: 河海大学, 2004. (DAI Churhua. Numerical Modeling of Karst Groundwater and Calculation of Leakage Quantity in the Area of Zhongliang Reservoir[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [12] 龚睿. 隧道工程建设对隔档式岩溶富水背斜地下水环境的影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010. (GONG Rui. Study on the Impact of Tunnel Construction on the Groundwater Environment of the Partition Style Karst Water rich Anticline[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [13] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, (2): 107-110. (FU Kai long. An Analysis of the Karst Ground Collapse and Water Yield of the Zhongliangshan Tunnel in the Yusu Expressway[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (2): 107-110. (in Chinese))
- [14] 王忠忠, 支兵发. 广州江村水源地岩溶地下水场数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(4): 45-47. (WANG Zhongzhong, ZHI Bingfa. Karst Groundwater Modeling in Water Resource Area of Jiang Village, Guangzhou[J]. Geohazard and Environment Protection, 2009, 20(4): 45-47. (in Chinese))
- [15] 罗敏. 岩溶蓄水构造区隧道涌突水量计算探析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. (LUO Min. Analyses of Tunnel Water inrush Calculation in Karst Water storing Structure Areas[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese))

(上接第 77 页)

- [8] 李良超, 张仲敏, 黄雄斌. 固-液搅拌槽内近壁区液相速度研究[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(1): 35-38. (LI Liangchao, ZHANG Zhongmin, HUANG Xiongb. Determination of Liquid Velocity Near Wall Region in a Solid-Liquid Stirred Tank[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2005, 32(1): 35-38. (in Chinese))
- [9] Wang Feng, Mao Zaisha, Shen Xiangqian. Numerical Study of Solid-Liquid Two-Phase Flow in Stirred Tanks with Rushton Impeller ($\dot{\theta}$) Prediction of Critical Impeller Speed[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004, 12(5): 610-614.
- [10] Fokema M D, Kresta S M, Wood P E. Importance of Using Correct Boundary Conditions for CFD Simulations of Stirred Tanks[J]. Can J Chem Eng, 1994, 72: 177-183.
- [11] Ranade V V, Joshi J B. Flow Generated by a Turbine, Part I: Experimental [J]. Trans Inst Chem Eng, 1990, 68: 19-23.
- [12] Xu Y, McGrath G. CFD Predictions of Stirred Tank Flows [J]. Trans Inst Chem Eng, 1996, 17: 471-475.
- [13] Harbey A D, Rogers S E. Steady and Unsteady Computational Study of Multiple Impeller Flows[J]. AIChEJ, 1996, 42: 2701-2712.
- [14] 周国忠. 搅拌槽内流动与混和过程的实验研究及数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2002. (ZHOU Guozhong. Experimental and Numerical Study on Fluid Dynamics and Mixing Process in Stirred Tank[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2002. (in Chinese))
- [15] 张国娟. 搅拌槽内混合过程的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2004. (ZHANG Guojuan. Numerical Simulation of Mixing Process in a Stirred Tank^[D], Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004. (in Chinese))
- [16] 杨敏官, 冯浪, 康灿, 等. 偏心搅拌槽内颗粒悬浮特性的试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 129-131. (YANG Minguan, FENG Lang, KANG Can. Experimental Study on Critical Suspension Speed of Shaft in Eccentrically Stirred Tank [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 129-131. (in Chinese))