

北京典型地区分层地面沉降与 地下水位变化关系

姜媛, 田芳, 罗勇, 王荣, 杨艳

(北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘要: 北京市长期过量开采地下水造成地下水位持续下降, 从而引发地面沉降快速发展。利用北京天竺地面沉降监测站长时间序列下分层地面沉降及对应含水层组地下水位监测数据, 建立了二者间的多元回归模型, 并用实际监测数据验证了该模型的预测效果, 据此确定了天竺站的主要沉降贡献层及对沉降影响最大的含水层主控层位。研究成果可为合理调整地下水开采层位以及开展地面沉降防控工作提供科学依据。

关键词: 地面沉降; 地下水位; 多元回归分析; 主控层位

中图分类号: P642.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0095-05

Research on the relationship between groundwater level and layered subsidence in typical regions of Beijing

JIANG Yuan, TIAN Fang, LUO Yong, WANG Rong, YANG Yan

(Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, Beijing 100195, China)

Abstract: Groundwater over extraction in Beijing causes continuous decline in groundwater level and rapid development of land subsidence. The time series data of layered subsidence and groundwater level in the corresponding aquifer at the Tianzhu ground subsidence monitoring station were used to develop a multiple regression model. The model was verified based on the observed data. On the basis, the main subsidence layer and main controlling aquifer which has the maximum effects on the land subsidence at the Tianzhu station were determined. The research results can provide scientific reference for the reasonable regulation of groundwater extraction layer and prevention of land subsidence.

Key words: land subsidence; water level; multiple regression analysis; main controlling layer

作为北京平原主要的地质灾害之一, 近年来地面沉降发展迅速, 沉降速率居高不下, 多年累计沉降量持续增加。受到地下水超采状况难以遏制等因素的影响, 北京市在未来一段时期内地面沉降仍将持续。

多年研究表明: 地层岩性及结构特征是产生地面沉降的重要地质背景; 地下水开采是地面沉降产生的直接诱因, 地面沉降速率和沉降量与地下水位下降速率和下降量密切相关。近年来, 沧州、天津、德州、廊坊等城市根据当地地面沉降监测数据及历史资料, 探讨了地面沉降与地下水位变化的经验关系, 总体呈现指数、二次函数或者线性相关关系^[1-6]。北京地区已有监测成果显示, 各监测层位累计沉降量与该层所对应的含水层组地下水位相关程度较高。所以, 分析确定沉降主要贡献层及对沉降影响最大的含水层主控层位, 进行

分层地面沉降与地下水位变化关系定量研究, 对北京市平原区地面沉降防控具有重要的理论意义及现实意义。

1 研究区概况

1.1 北京地区地面沉降发展

北京地面沉降发展过程可以分为4个阶段: 形成阶段、发展阶段、扩展阶段和快速发展阶段^[7]。

1955年-1973年为地面沉降形成阶段。主要在北京东郊八里庄及酒仙桥一带因地下水开采量增加而开始出现地面沉降, 期间的年均沉降速率为16~28.2 mm。

1973年-1983年为地面沉降发展阶段。北京市地下水长期超采, 地下水位急速大幅下降, 东郊地面沉降快速发展扩大。

1987年-1999年为地面沉降扩展阶段。随着北京第八

收稿日期: 2014-05-19 修回日期: 2014-11-11 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1126.001.html>

基金项目: 北京市科技计划课题(Z131100005613022); 北京新航程地区水资源可持续利用研究(Z131100005613001)

作者简介: 姜媛(1984), 女(满族), 工程师, 主要从事地面沉降方面的研究工作。E-mail: yuan.12.3@163.com

水厂运行和加强节约用水、地下水开发管理等措施,东郊地区地下水开采量减少,地下水位下降速率明显减缓,老沉降区沉降速率减缓,但沉降面积仍在迅速扩大,不断出现新的沉降区。

1999 年以来。此期间北京遭遇连续干旱,水资源供需矛盾突出,为保障供水,连续超采地下水,平原区地下水平均埋深从 1998 年末的 11.9 m 下降到 2012 年末的 24.3 m。近年来,北京地面沉降中心最大年沉降速率连创历史新高,沉降区域面积不断扩大,累积沉降量连年攀升。

从区域上长时间序列来看,北京平原区地下水动态变化与地面沉降变化趋势基本一致;地下水位回升,在一定程度上能够减缓地面沉降发展的速度。从空间分布看,对比北京平原主要开采层 2010 年地下水漏斗和 1955 年-2009 年累计地面沉降量(图 1)可以发现^[8],地面沉降快速发展的昌平八仙庄、朝阳金盏、朝阳三间房、朝阳黑庄户以及通州城区几大沉降中心都位于地下水降落漏斗之内。总体来说,北京平原区地面沉降发育严重区域与平原区地下水降落漏斗分布情况基本吻合。

1.2 分层监测情况

依据第四系沉积规律和沉积时代、地下含水层结构、地下水开采利用现状等因素,北京地区含水层可划分为四个层组:第一含水层组,主要为潜水及承压水分布区含水层埋深小于 50 m 的浅层具有微承压性质的含水层组;第二含水层组在承压水区,含水层组底界深度 80~120 m;第三含水



图 1 北京平原主要开采层 2001 和 2010 年地下水漏斗和 1955 年-2009 年地面沉降分布对比

Fig. 1 Comparison of groundwater depression cones in 2001 and 2010 and land subsidence distributions from 1955 to 2010

层组,在承压水区含水层组底板埋深 150~180 m;第四含水层组在承压水区,含水层组底界埋深在 300 m。天竺站是北京地面沉降监测网站预警预报系统一期工程建成的三个站之一,于 2004 年开始监测。根据区域含水层组及该地区实际地层情况,设置了合理可行的监测层位(见表 1)。长时间序列下的分层标监测数据及该层位连续的水位观测资料为进一步分析二者间相关性奠定了良好的基础。

表 1 天竺站各个分层标及对应含水层层位

Tab. 1 Borehole marks and corresponding aquifers at the Tianzhu station

地下水位标号	D3-2	D3-3	D3-4	D3-5	D3-6
含水层层位深度/m	210~218	120~146.8	85.7~91.3	59.3~63.4	27.5~31.0
含水层类型	承压水				潜水
分层标号	F3-3	F3-4	F3-6	F3-8	F3-10
观测层位深度/m	148.49~218.89	117~148.49	82.3~102	48.5~64.5	2.4~35.43
岩性	粉土 细砂	粉土 粗砂	粉黏 细砂	细砂 粗砂	粉土

2 基于分层地面沉降与地下水位的多元线性回归

2.1 回归方程的建立

为进一步辨识北京地区地面沉降与地下水位之间内在关系,本文以天竺站 2004 年-2011 年各季度内分层地面沉降及对应含水层组地下水位监测数据为基础,建立多元回归模型,如下式

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \epsilon \quad (1)$$

式中: y 为含水层组季度累计沉降量 (mm/a), 沉降取“-”值,回弹取“+”值; x_1 为含水层组季度平均水位标高(m); x_2 为含水层组季度内水位变幅(m),即本季度与上季度平均水位标高之差; x_3 为含水层组季度内水位波动值(m),即本季度内最大、最小水位标高之差; β_1 、 β_2 、 β_3 、 ϵ 分别为回归方程系数。

研究区各含水层组的回归模型结果见表 2。

表 2 各监测层位多元回归分析结果

Tab. 2 Results of multiple regression analysis

监测层位	回归方程	R	R ²	F	P
D3-2/F3-3	$y = 1.750x_1 + 0.108$	0.933	0.871	58.727	0.00
D3-3/F3-4	$y = 2.095x_1 + 0.662x_2 + 2.038x_3 + 0.199$	0.926	0.858	52.227	0.00
D3-4/F3-6	$y = 1.219x_1 + 0.657x_2 + 1.918x_3 - 5.240$	0.942	0.887	67.900	0.00
D3-5/F3-8	$y = 0.248x_1 + 0.092x_2 + 0.128x_3 - 0.662$	0.894	0.800	34.673	0.00

2.2 回归方程的显著性检验

变量 Y 与变量 X 之间的线性关系密切程度用复相关系

数 R 表示。 R 越大,表明样本点越靠近回归直线,其线性相关程度越大^[9]。

$$R = \frac{\sqrt{S_R}}{\sqrt{S_T}} \quad (2)$$

其中

$$S_T = S_E + S_R \quad (3)$$

$$S_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (4)$$

$$S_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

式中: S_T 为总偏差平方和; S_R 为回归平方和; S_E 为残差平方和。

由结果可知,上述几个计算模型的复相关系数较大,且接近于 1,表明模型的计算值与实测值的拟合精度较高^[10],因子的选择合理,具有代表性。

另外还可以用 F 检验来评价方程的显著性。取显著性水平 $\alpha = 5\%$,查表可知 $F_{0.05}(1, 28) = 4.196$,故认为在显著性水平为 0.05 的情况下,上述方程均具有显著性意义,所求出的回归方程是实用的。

2.3 回归方程的分析及优化

通过分析结果(图 2—图 5)可以看出,各层承压水位多元回归方程的复相关系数 R 均大于 0.8,表明地面沉降与水位标高、变幅、波动值呈高度正相关关系。方程中季度平均水位标高变量的系数 β_1 为正号,反映水位标高与累计沉降量呈正相关关系(沉降量为负);季度内水位变幅变量的系数 β_2 为正号,反映水位降幅越大,累计沉降量越大。此外,从回归方程系数来看,各监测层位累计沉降量受该层含水层组季度内平均水位标高影响最大,受到其他两个自变量影响稍小。

从实际观测的分层累计沉降量数据来看,各监测层位的地层累计沉降量总体均呈现增加趋势,同时随着水位季节性波动,地层压缩量呈现周期性变化。如分层标 F38 监测层位就表现为周期性压缩回弹;其他监测层位在每一个水位变化周期的水位回升时,仍在继续压缩,但速度减缓^[11]。

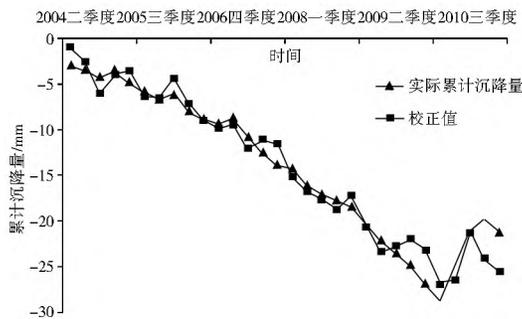


图 2 F33 累计沉降量实测值与计算值对比曲线
Fig. 2 Comparison of the measured and calculated accumulative subsidence at F33

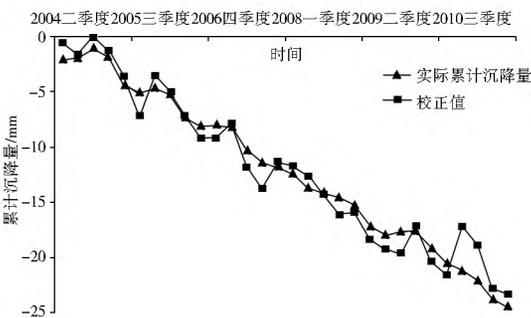


图 3 F34 累计沉降量实测值与计算值对比曲线
Fig. 3 Comparison of the measured and calculated accumulative subsidence at F34

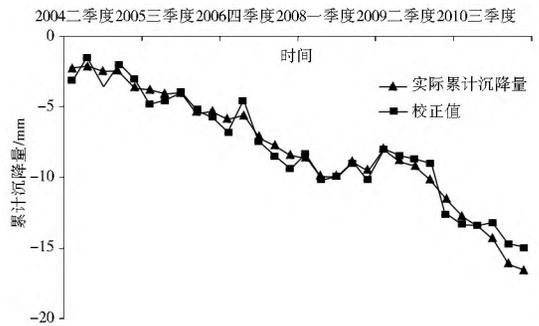


图 4 F36 累计沉降量实测值与计算值对比曲线
Fig. 4 Comparison of the measured and calculated accumulative subsidence at F36

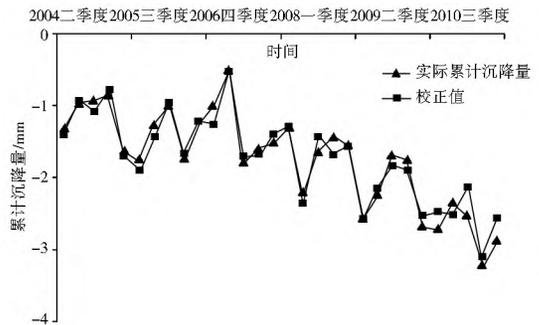


图 5 F38 累计沉降量实测值与计算值对比曲线
Fig. 5 Comparison of the measured and calculated accumulative subsidence at F38

2.4 预测

应用检验后的回归模型进行预测,就是在式(1)中 x_1 、 x_2 、 x_3 为已知值时对因变量 Y 进行区间预测,即给出因变量 Y 的一个预测值范围^[12]。在给定的显著性水平下,找到一个区间 (T_1, T_2) ,使对应于某给定自变量,实际值以 $1 - \alpha$ 的概率被区间 (T_1, T_2) 所包含^[13]。 y_0 的置信度为 95% 的置信区间近似为 $(\hat{y}_0 - 2\sigma, \hat{y}_0 + 2\sigma)$,其中

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{n-2}} \quad (6)$$

把 2012 年的季度平均水位标高、季度内水位变幅及季度内水位代入式 6,可得出相应的预测地面累积沉降量(表 3),预测值都在 $\alpha = 0.05$ 的信度范围之内,结果可靠。

表 3 各个层位累计沉降量预测区间与实际监测值

Tab. 3 Approximate prediction intervals and practical monitoring data of accumulative subsidence of each monitoring layer

监测层位	沉降量预测值/mm	沉降量实际值/mm	σ	近似预测区间
D32/F33	-24.985	-24.070	2.90	(-33.111, -21.511)
D33/F34	-24.888	-26.039	2.72	(-28.048, -17.168)
D34/F36	-14.903	-17.985	2.15	(-18.071, -9.471)
D35/F38	-2.432	-2.634	0.3	(-2.755, -1.555)

2.5 曲线拟合

通过多元线性回归分析发现,各监测层位累计沉降量受该层含水层组季度内平均水位标高影响最大,故选用线性模型、对数曲线模型、幂曲线模型、S 形曲线模型、指数曲线模型、复合曲线模型等多种类型模型对实际监测值进行拟合,

从中挑出最佳拟合方法并得到相应函数模型, 见图 6、表 4。

表 4 各监测层位曲线拟合结果

Tab. 4 Results of curve fitting of each monitoring layer

监测层位	最佳拟合方法	函数模型	R	R ²	F	P
D3 2/ F3 3	幂曲线	$y = 1.722x^{0.991}$ 或 $\ln y = \ln 1.722 + 0.991 \ln x$	0.949	0.900	251.50	0.00
D3 3/ F3 4	线性	$y = 2.170x - 6.415$	0.869	0.756	86.714	0.00
D3 4/ F3 6	线性	$y = 1.188x - 0.087$	0.837	0.701	65.737	0.00
D3 5/ F3 8	线性	$y = 0.241x + 0.300$	0.858	0.735	77.850	0.00

从拟合结果看出, 除 D3 2/ F3 3 监测层位外, 其他层位都以线性拟合效果最佳。原因可能是, 自 1999 年以来北京地面沉降已进入快速发展阶段, 本文中的监测时段没有经历完整的地面沉降形成- 发展- 快速发展过程。

3 主控层位的确定

利用对天竺地面沉降监测站内 2005 年- 2012 年分层地面沉降和地下水位数据, 选择 SPSS 的回归模块, 根据最小二乘法原理分别建立不同含水层水位 (D3 2 至 D3 6) 与地面累计沉降量的回归方程, 分析地下水位变化对地面沉降的影响程度, 从而得出对沉降影响最大的主控含水层, 为合理调整地下水开采层位、确定分层地下水位控制指标提供依据。

表 5 天竺站分层历年沉降量统计特征值(2005 年- 2012 年)

Tab. 5 The characteristic values of subsidence at the Tianzhu station (2005- 2012)

分层标号	F3 2	F3 3	F3 4	F3 5	F3 6	F3 7	F3 8	F3 9	F3 10
平均沉降贡献比 (%)	15.27	8.54	9.86	27.43	6.01	21.43	0.76	3.76	6.94
地下水位标编号	-	D3 2	D3 3	-	D3 4	-	D3 5	-	D3 6
相关系数	-	0.986	0.995	-	0.989	-	0.953	-	0.335

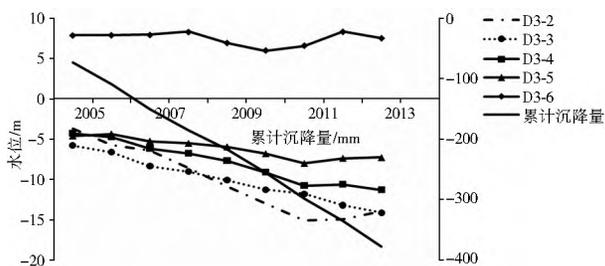


图 7 各含水层水位动态及地面累积沉降量

Fig. 7 Dynamics of groundwater level and accumulative subsidence of each aquifer

4 结论

(1) 北京平原区地面沉降与地下水位变化具有良好的时空对应关系。从区域上长时间序列来看, 北京平原区地下水动态变化与地面沉降变化趋势基本一致; 从空间分布看, 北京平原区地面沉降发育严重区域与平原区地下水降落漏斗分布情况基本吻合。

(2) 北京天竺地面沉降监测站内分层地面沉降与对应层

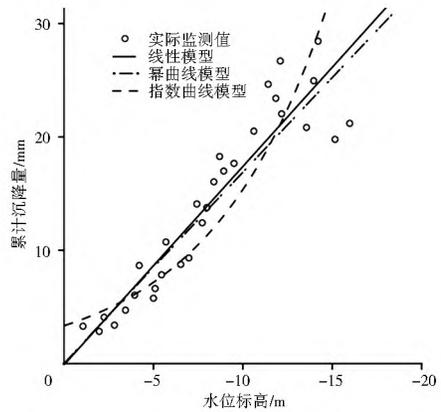


图 6 天竺站 F3 3/ D3 2 层位沉降量与水位三种拟合方法效果对比

Fig. 6 Comparison of three fitting methods for subsidence and groundwater level of the monitoring layer F3 3/ D3 2 at the Tianzhu station

从地下水动态变化(图 7)可以看出, 潜水 (D3 6) 水位多年变幅不大, 基本保持稳定; 深层承压水 (D3 2) 水头和浅层承压水 (D3 5) 水位自 2005 年开始持续下降, 自 2011 年开始回升; 中深层承压水 (D3 3、D3 4) 水头持续下降。通过比较地下水位 D3 2 至 D3 6 与地面累计沉降量之间的相关系数, 发现中深层承压水头变化对地面沉降影响较大, 潜水及浅层承压水对其影响较小。尤其是与沉降贡献比最大的监测层位 (F3 5) 上下相邻的含水层 (D3 3、D3 4,) 其水位变化是该地区形成地面沉降的主要因素(表 5)。

位的水位标高、水位变幅及水位波动具有较好的相关关系, 其中对水位标高最为敏感。潜水水位与浅部地层沉降量之间相关性差。

(3) 除 D3 2/ F3 3 监测层位外, 其他层位地面沉降与对应层位的水位标高均以线性拟合效果为最佳, 进一步证实自监测站运行之日起北京地面沉降已经处于快速发展阶段。

(4) 中深层承压水头变化对地面沉降影响较大, 潜水及浅层承压水对其影响较小。尤其是与沉降贡献比最大的监测层位 (F3 5) 上下相邻的含水层 (D3 3、D3 4), 其水位变化是该地区形成地面沉降的主要因素, 此结论应作为合理调整该地区地下水开采层位的基础。

参考文献 (References):

[1] 王家兵, 王亚斌, 张海涛. 控制地面沉降条件下天津深层地下水资源持续利用[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 74-78. (WANG Jia bing, WANG Ya bin, ZHANG Hai tao. Sustainable development of the deep groundwater resources under the condition of controlling land subsidence in Tianjin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(4): 74-78. (in Chinese))

- [2] 邢忠信, 李和学, 张熟, 等. 沧州市地面沉降研究及防治对策[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 157-1631. XING Zhongxin, LI Heshu, ZHANG Shu, et al. Surface Subsidence and its Countermeasures in Cangzhou City[J]. Geological survey and research, 2004, 27(3): 157-1631. (in Chinese)
- [3] 张熟, 刘增寿, 田小伟, 等. 沧州市降落漏斗、地面沉降发展演化规律及防治对策[J]. 工程地质学报, 2005, 13(S1): 24-291. The development and prevention of land subsidence, cone of depression in Cangzhou City[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(S1): 24-291. (in Chinese)
- [4] 易立新, 侯建伟, 李子木, 等. 河北省廊坊市地面沉降调查[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 65-681. The land subsidence survey in Langfang, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 65-681. (in Chinese)
- [5] 易立新, 侯建伟, 要根明. 廊坊市地面沉降灾害与城市可持续发展对策[J]. 工程地质学报, 2005, 13(S1): 30-331. Land subsidence disaster and city sustainable development in Langfang. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(S1): 30-331. (in Chinese)
- [6] 李国和, 荆志东, 许再良. 京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2008(6): 93-98. (LI Guohe, JING Zhidong, XU Zailiang. A discussion of the correlation between land subsidence and groundwater level variation along the Jinghu high speed railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(6): 93-98. (in Chinese))
- [7] 杨艳, 贾三满, 王海刚. 北京平原地区地面沉降现状及发展趋势分析[J]. 上海地质, 2010, 31(4): 23-28. (YANG Yan, JIA Saman, WANG Haigang. The status and development of land subsidence in Beijing Plain[J]. Shanghai Geology, 2010, 31(4): 23-28. (in Chinese))
- [8] 北京市地质矿产勘查开发局. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. (Beijing Bureau of geology and mineral exploration and Development. Beijing groundwater[M]. Beijing: China Land Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 董国凤. 地面沉降预测模型及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. (DONG Fengguo. Prediction model and application of land subsidence[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese))
- [10] 贾莹媛, 黄张裕, 张蒙, 等. 含水组地下水位变化对地面沉降影响的多元回归分析与预测[J]. 工程勘察, 2003(1): 77-79. (JIA Yingyuan, HUANG Zhangyu, ZHANG Meng, et al. Application of multiple regression analysis and prediction in ground subsidence with water table[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003(1): 77-79. (in Chinese))
- [11] 田芳, 郭萌, 罗勇, 等. 北京地面沉降区土体变形特征[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 236-242. (TIAN Fang, GUO Meng, LUO Yong, et al. The deformation behavior of soil mass in the subsidence area of Beijing[J]. Geology In China, 2012, 39(1): 236-242. (in Chinese))
- [12] 郝亚东, 许加东, 张勇. 基于多影响因子计算模型在城市地面沉降监测中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2011(3): 20-23. (HAO Yandong, XU Jiadong, ZHANG Yong. Research on application of settlement monitoring model in the calculation of multi factors based on the city ground[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(3): 20-23. (in Chinese))
- [13] 汪冬华. 多元统计分析与SPSS应用[M]. 上海: 东华理工大学出版社, 2010. (WANG Donghua. Multivariate statistical analysis and application of SPSS[M]. Shanghai: East China Institute of Technology, 2010. (in Chinese))

(上接第40页)

- [2] Lanen H A J, Tallaksen L M, Kasperek L, et al. Hydrological drought analysis in the Hupsel basin using different physically based models[A]. Gustard A, Blazkova S, Brilly M, et al. Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management[C]. IAHS Publication, 1997, 246: 189-196.
- [3] Smakhtin V Y, Watkins D A, Hughes D A, et al. Methods of Catchment-Wide Assessment of Daily Low-flow Regimes in South Africa[J]. Water SA, 1998, 24(3): 173-185.
- [4] Yu P S, Yang T C. Using synthetic flow duration curves for rainfall runoff model calibration at ungauged sites[J]. Hydrological Process, 2000, 14: 117-133.
- [5] 黄国如. 利用区域流量历时曲线模拟东江流域无资料地区的日径流过程[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 29-35. (HUANG Guoru. Daily flow hydrograph simulation using regional flow duration curves for ungauged region of Dongjiang basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 29-35. (in Chinese))
- [6] Attilio Castellarin, Giorgio Galeati, Luigia Brandimarte, Alberto Montanari, Armando Brath. Regional flow-duration curves: reliability for ungauged basins[J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(10): 953-965.
- [7] Franchini M, Suppo M. Regional analysis of flow duration curves for a limestone region[J]. Water Resour Manage. 1996, 10: 199-218.
- [8] Tseyed Teshome. Regionalization of flow duration curve for Abbay Basin using GIS[D]. Addis Ababa: Addis Ababa University, 2007.
- [9] Peter Wilderer. Treatise on Water Science[M]. Oxford: Elsevier, 2011, 479-517.
- [10] Holland J. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Michigan: The University of Michigan Press, 1975.