

焦作城市及矿井水减采影响下岩溶水位动态变化研究

潘国营, 南立超, 郭二涛, 林云

(河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 焦作矿区岩溶水在闭矿和城市减采双向因素影响下, 水位如何变化是焦作城市建设非常关注的问题。运用斜率灰色关联度分析法, 研究了水位与降水量、开采量之间的关联程度。采用滑动平均法与 Mann-Kendall 非参数统计法, 分析了 1965 年以来的岩溶水位、降水量和开采量的变化趋势, 并在分析岩溶水位主要影响因素的基础上, 利用多元相关分析法对岩溶水位进行模拟预测。研究表明: 1965 年以来焦作矿区的降水量并未出现明显下降趋势, 岩溶水位的多年波动下降并非降水入渗补给量减少所致, 主要与不断增长的城市开采量和矿井排水量有关; 当开采总量降至 $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 最高水位将高出九里山泉口标高 95 m, 历史上的九里山泉群将会复涌。研究结果可为焦作在九里山一带建设山水园林景观提供依据。

关键词: 地下水位动态; 滑动平均法; Mann-Kendall; 灰色关联度; 多元相关分析法; 焦作市

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0008-05

Study on dynamic change of karst water level under the influence of water consumption and mine water reduction in Jiaozuo city

PAN Guoying, NAN Lichao, GUO Ertao, LIN Yun

(School of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The change of water level of karst water in Jiaozuo mining area is a very important problem in Jiaozuo City construction under the influence of bi-directional factors of the closure of coal mine and the reduction of urban karst water exploitation. In this paper, the correlation degree of water level with rainfall and exploitation was studied by slope grey relational analysis method. The moving average method and the Mann-Kendall nonparametric statistic method were used to analyze the change trend of karst water level, rainfall and exploitation since 1965. Based on the analysis of the main influencing factors of karst water level, the multivariate correlation analysis method was used to establish model to simulate and forecast karst water level. The results show that the precipitation in Jiaozuo mining area has not decreased obviously since 1965. The decline of karst water level is not due to the decrease of rainfall infiltration recharge, but mainly related to the growing urban exploitation and mine displacement. When the total amount of exploitation is reduced to $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$, the highest water level will be 95 m higher than the Jiuli Mountain Spring mark elevation, and the Jiuli Mountain spring groups in the history would be poured back. The results of the study can provide the basis for the construction of landscape garden in Jiuli Mountain area in Jiaozuo.

Key words: groundwater level dynamics; moving average method; Mann-Kendall; gray relational degree; multivariate correlation analysis method; Jiaozuo City

焦作矿区岩溶水系统是我国北方岩溶区发育比较典型的系统之一。区内奥陶系灰岩厚度 400 m, 广泛出露于矿区北部的太行山区, 地表及地下岩溶

非常发育, 降水和河水入渗补给条件好。焦作山前地区是岩溶水集中排泄区, 有九里山泉群和三姑泉群, 九里山泉群历史上最大流量达到 $12 \text{ m}^3/\text{s}$, 三姑

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602265); 河南省高等学校重点科研项目(16A170012)

作者简介: 潘国营(1963-), 男, 河北衡水人, 博士, 教授, 主要从事煤矿防治水理论与技术研究。

通讯作者: 南立超(1992-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地质工程地质。

泉目前流量在 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右^[1]。

焦作丰富的岩溶水资源为焦作市工业和居民生活用水提供了宝贵的水源。围绕焦作矿区岩溶水的开发利用,河南省地矿局第一水文地质队、中国地质科学院岩溶地质研究所等单位开展了大量勘探和研究工作,查明了水文地质条件,确定了岩溶水资源量为 $7.732 \text{ m}^3/\text{s}$,据此,焦作市相继建设了岗庄、东小庄、周庄等几个大型开采岩溶水的水厂^[2]。矿井排水和城市开采是岩溶水的两种排泄方式,20 世纪 80 年代,二者之和超过 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,超过岩溶水多年平均补给量。岩溶水位呈阶梯状下降,引发了九里山泉断流及水质恶化等环境水文地质问题,并引起人们的高度关注,例如,刘白宙^[3]研究了山区降雨对地下水位的影响,黄平华等^[4]建立了降雨与水位间的统计模型,潘国营等^[5]分析了焦作矿区岩溶水的氯化物污染原因。历经多年的采煤,焦作矿区的煤炭资源接近枯竭,一些煤矿相继关闭,矿井排水量将大幅度减少。与此同时,焦作电厂、化工厂等高耗水企业或迁至外地或实现了转型,且开采岩溶水的水厂因有了南水北调工程的水源,将逐渐停止开采岩溶水,城市开采岩溶水量和矿井排水量都将继续减少。在闭矿和城市减采双向因素影响下,岩溶水位如何变化以及九里山一带能否出现历史上“百泉喷涌、湖水碧绿”的美景,是焦作市打造山水园林城市迫切想要知道的问题。

因此,本文基于 50 年来焦作矿区岩溶水水位、降水量、开采量及排水量等长时间序列数据,利用相关分析和关联度分析等方法,来分析降水、人工开采地下水对岩溶水位的影响,并预测未来岩溶水位的变化。

1 焦作矿区水文地质背景

焦作矿区奥陶系灰岩厚 400 m,是区域性的强富水层,岩溶裂隙发育。在北部山区呈裸露型,山前倾斜平原区则掩埋于石炭—二叠和新生界地层之下。奥陶系灰岩在太行山区露头面积近 $2\,000 \text{ km}^2$,地表及地下岩溶发育,山区大气降水丰富,大气降水入渗是焦作岩溶水重要的补给来源之一^[6]。丹河常年有水,流经灰岩分布区,河床渗漏严重,多年平均渗漏量为 $1.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。西石河、山门河和子房沟河属季节性河流,经碳酸盐岩分布区,河水在距出口 $5 \sim 10 \text{ km}$ 地段全部漏失补给地下水。地表水沿河渗漏也是焦作岩溶水的重要补给来源之一^[7]。岩溶水在焦作北部和西部接受补给后,由北向南、自西

向东南流向太行山前的焦作矿区。焦作矿区发育了十几条纵横交错的隐伏断层,来自山区的岩溶水沿凤凰岭断层、九里山断层、朱村断层等强导水断裂运动、富集,并形成岩溶水强径流带。

天然条件下,岩溶水在九里山奥陶系灰岩残丘一带的“天窗”处以泉群形式集中排泄,泉水最高流量达到 $12 \text{ m}^3/\text{s}$,目前,人工开采和矿井排水是岩溶水主要的排泄方式,其中城市开采量为 $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$,矿井排水量为 $5.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[8-10]。

2 岩溶水位动态变化特征

岩溶水位动态变化主要受山区大气降水和人工开采(包括矿井排水)双重因素的影响。20 世纪 60 年代,岩溶水开采量很小,岩溶水补给与排泄处于天然动态均衡状态,水位在 110 m(海拔高程,下同)上下波动,高出九里山泉群排泄极限标高(95 m),岩溶水在九里山奥灰露头周围以泉群形式排泄。随着矿井排水量的逐步增加,岩溶水位逐步下降,至 20 世纪 80 年代,矿井排水量达到峰值,与此同时,随着岗庄水源地的建设,城市进入了大规模开采利用岩溶水的时代,矿井排水和城市开采岩溶水水量超过 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,至 20 世纪 80 年代末岩溶水位降至 75 m 左右。自 1994 年开始,王封矿、焦西矿和焦东矿相继被关闭,矿井排水量逐渐下降,但随着城市发展和人口的增加,岩溶水开采量却逐年上升,岩溶水开采总量仍然保持在较高的水平,在 $8.5 \sim 9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间,岩溶水水位在 75 ~ 90 m 之间波动。2008 年以来,焦作矿区各矿普遍采用了突水点注浆和采煤工作面底板预注浆等防治水措施,矿井排水量明显下降,岩溶水水位有所回升,尤其是 2012 年焦作电厂异地重建后,其岗庄水源地开采量大幅度下降,水位回升到 90 m。本文以 5 a 为滑动长度对焦作岩溶水年平均水位进行计算,得出 5 a 平均水位滑动平均值做出统计图,见图 1。

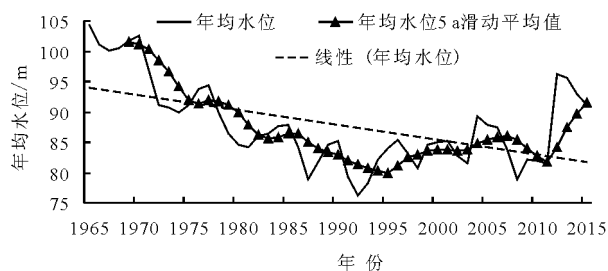


图1 岩溶水位 5 a 滑动平均统计图

经过滑动平均后,序列中短于滑动长度的周期

大大削弱,显现出变化趋势。由图 1 可以看出,从 1965 – 1993 年焦作岩溶水位呈逐渐下降趋势;1994 – 2007 年岩溶水位趋于稳定并有些回升的趋势;2008 – 2015 年岩溶水位呈上升趋势。因此,本文将焦作市岩溶水位变化分为 1965 – 1993 年,1994 – 2007 年和 2008 – 2015 年 3 个阶段。

3 岩溶水位影响因素关联性分析

在开发利用地下水资源和地下水预测工作中,一般都要对该地区地下水的动态变化进行分析研究,寻找动态变化的影响因素以及其各因素的主次关系,以提高评估和预测工作的质量^[11]。

为了定量分析降水和地下水开采量对地下水动态变化的影响,采用斜率灰色关联度法计算二者的影响程度。斜率灰色关联度分析法,是基于系统各因素时间序列曲线间相似相异程度来衡量其关联度大小的量化方法。对于离散数据列,若两曲线在各时段上曲线斜率相等或相差较小,则二者的关联系数就大;反之,关联系数就越小^[12-13]。

设 x_i 为系统因素,在时间点上的观测数据为 $x_i(k) (k = 1, 2, \dots, n)$, 则称:

$$x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) \quad (1)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, m)$$

为系统因素 x_i 的时间序列。定义 x_0 为母序列; x_i 为子序列, $i = 1, 2, \dots, m$ 。为了方便关联度的计算,对各序列进行无量纲化处理,得到新的数列:

$$y_i = x_i d = (y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(n)) \quad (2)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, m)$$

式中: d 为序列算子。对新的序列求一阶差商,找到曲线在各时点的斜率:

$$\Delta y_i(k) = y_i(k+1) - y_i(k) \quad (3)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n-1; i = 0, 1, \dots, m)$$

求灰色关联系数:

$$r_{0,i}(k) = \frac{1}{1 + \left| \frac{\Delta y_0(k)}{y_0(k+1)} - \frac{\Delta y_i(k)}{y_i(k+1)} \right|} \quad (4)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n-1; i = 0, 1, \dots, m)$$

综合各点的关联系数,得整个 x_i 曲线与参考曲线 x_0 的关联度:

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} r_{0,i}(k) \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

根据以上所述,以焦作市 1965 – 2015 年降水量、地下水开采量以及地下水位资料为依据,计算得

出焦作地区降水量与岩溶水位关联度为 0.78,地下水开采量与岩溶水位关联度为 0.94。计算结果表明,降水量与地下水开采量都对焦作市地下水动态变化影响较大。

4 岩溶水动态影响因素的分析

由于降水入渗是焦作矿区岩溶水的重要补给来源,因此人们将水位下降的原因归结为降水量的减少。为了分析降水量对岩溶水位的影响,根据焦作 1955 – 2015 年年均水位、年均降水量和人工开采量(包括城市开采和矿井排水)数据,运用 Mann – Kendall 非参数统计法进行研究。

4.1 降水量对岩溶水位的影响

图 2 为 1965 – 2015 年降水量和地下水位的统计图。从图 2 中可以看出,各序列变化都有一定的波动性,具有相似的“峰”、“谷”特征,年降水量出现丰枯变化时,地下水位也随之产生高低变化,岩溶水位动态变化与降水量关系密切,但岩溶水位的多年波动下降是否是降水量减少所致,需要进一步研究^[14]。因此采用 Mann – Kendall 非参数检验方法^[15]来检测焦作岩溶水位与降水量长期变化趋势。

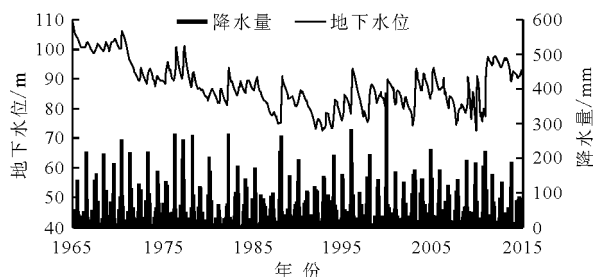


图 2 1965 – 2015 年降水量和地下水位统计图

在双边趋势检验中,对于给定的置信水平 α ,若对统计量 Z ,有 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28、1.64、2.32 时表示分别通过了信度 90%、95%、99% 显著性检验。由 1965 – 2015 年焦作岩溶水位和降水量资料计算得出 Z 值见表 1。

表 1 不同时段岩溶水位与降水量 Z 值

年份	岩溶水位	降水量
1965 – 1993	-5.68	0.43
1994 – 2007	1.30	0
2008 – 2015	2.10	0

由计算结果可知岩溶水位在 1965 – 1993 年是

下降趋势,并通过了 99% 的显著性检验;1994 – 2007 年,岩溶水位有上升趋势,但不显著;2008 – 2015 年岩溶水位有上升趋势,并较为显著,通过了 95% 的显著性检验。降水量虽在 1965 – 1993 年有增大趋势,但很不显著,并且在 1994 – 2007 年和 2008 – 2015 年两个阶段 Z 值均为 0,均没有增大或减小的趋势。在多年降水量没有增大或减小趋势的情况下,年均岩溶水水位下降或上升的趋势显著,由此可知焦作岩溶水位的多年波动下降并非降雨入渗补给量减少所致。

4.2 人工开采对岩溶水位的影响

焦作市岩溶水开采主要是城市岩溶水开采和矿井排水。焦作市 1965 年以前地下水开采量小于 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$,水位在 100 ~ 110 m 间波动,最高达 119 m,水位不呈下降趋势;1965 – 1993 年,随着煤炭工业的大力发展,焦作电厂岗庄水源地建成使用,地下水开采总量升至 $10.46 \text{ m}^3/\text{s}$,其中矿井排水量占 87%,地下水位持续下降,最低降至 70 m。1994 – 2008 年,王封矿、焦西矿和焦东矿相继关闭停产,整个矿区排水总量开始呈逐年递减趋势,但城市建设和发展速度加快,城市开采地下水量大幅度增加,地下水总开采量仍然保持在 $8.5 \sim 9.5 \text{ m}^3/\text{s}$,地下水位在 70 ~ 90 m 之间波动。2008 年以后,焦作矿区各矿普遍采用了注浆堵水技术,再加上部分矿井的关停停产,矿井排水量降至 $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下,并逐年减少,由于农业节水的工程措施和城市工业用水节水的发展,城市地下水开采量也进一步下降,总排水量稳定在 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,地下水位有所回升,尤其是 2012 年焦作电厂异地重建后,其岗庄水源地开采量大幅度下降,开采量与地下水位统计图见图 3。

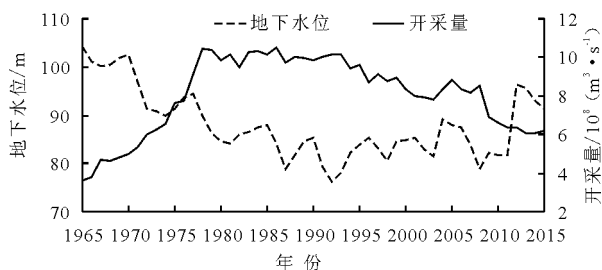


图3 开采量与地下水位统计图

运用 Mann – Kendall 非参数检验方法对焦作岩溶水位与岩溶水开采量长期变化趋势进行检测。计算结果如下:

由计算结果(表2)可以看出岩溶水开采量的变化趋势。在 1965 – 1993 年岩溶水开采量增大趋势

显著,并通过了 99% 的显著性检验;1994 – 2007 年与 2008 – 2015 年两个阶段岩溶水开采量均为显著下降趋势。开采量呈上升趋势时岩溶水位呈下降趋势,开采量呈减少趋势时岩溶水位呈上升趋势。由此知焦作市岩溶水位的下降主要是由岩溶水开采量的增加造成的。

表2 岩溶水位与开采量 Z 值

年份	岩溶水位	开采量
1965 – 1993	-5.68	4.93
1994 – 2007	1.30	-3.56
2008 – 2015	2.10	-3.47

5 岩溶水位预测

5.1 预测岩溶水位的多元回归模型

前 1 年集中反映了前诸年的降水量、开采量对岩溶水位的综合影响,故本年以前影响地下水位的各项因素可用前 1 年水位这一综合因素来表示,但由于降水对岩溶水位的影响具有滞后性,分析岩溶水位与前 1 年降水量相关关系,其相关性比当年更密切,故前 1 年降水量也是一项重要指标。同时,当年的降水量、开采量影响岩溶水位的因素对回归计算的影响也有了综合的体现^[16]。

综上所述可知,本年岩溶水位 h_t (m) 受到前 1 年降水量 P_{t-1} (mm)、本年降水量 P_t (mm) 和本年开采量 Q_t (m^3/s) 的影响,模型结果为:

$$h_t = 31.194 + 0.661h_{t-1} + 0.009P_{t-1} + 0.002P_t - 0.951Q_t \quad (6)$$

复相关系数 $R = 0.901$, 决定系数为 $R^2 = 0.812$, 模型有较好的线性关系,且回归结果较好。如图 4 所示。

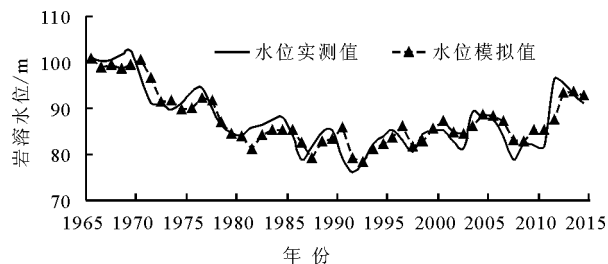


图4 岩溶水位多元回归模型拟合图

利用 1965 – 2015 年历史水位、降水量和开采量数据对上述水位预测模型进行了误差检验,检验表明,模型显著水平符合统计学要求,计算值与实际值的平均误差为 2.64%,拟合值与真实值差异较小,

模型检验较好。

5.2 岩溶水位预测

预报未来矿井关停后的水位变化,设计了如下预报条件:

(1)根据 1565 - 2016 年焦作市降水量数据,采用皮尔逊模型计算出了不同降水保证率对应的降水量,保证率 95% (枯水年)、降水保证率 75% (平水年)、降水保证率 50% (丰水年)所对应的降水量分别为 378、532 和 612 mm。

(2)对于城市开采岩溶水量,考虑到焦作电厂已经搬迁,向电厂供水的岗庄水源地开采岩溶水量已经削减,焦作市利用南水北调工程的供水厂尚在建设,且用于满足新建高新技术开发区的供水,现有开采岩溶水的水源地将维持现状开采强度,因此,未来两年城市开采量仍按 2016 年取值。

(3)2016 年朱村矿和韩王矿已经关闭,整个矿区剩余矿井排水量为 3.09 m³/s。2017 年计划关停演马矿,减少矿井排水 0.80 m³/s,2018 年将关闭方庄矿,再减少矿井排水 0.35 m³/s,假如其他矿井的排水量仍维持 2016 年的水平不变,2017 和 2018 年矿区总排水量将降低至 2.29 m³/s 和 1.94 m³/s。

预测结果为见表 3。

表 3 2017、2018 年岩溶水位预测值

降水保 证率/%	降水量/ mm	城市开采量/ (m ³ · s ⁻¹)	矿井排水量/ (m ³ · s ⁻¹)		岩溶水位/m	
			2017	2018	2017	2018
95	378	2.11	2.29	1.94	92.6	92.8
75	532	2.11	2.29	1.94	94.4	95.6
50	612	2.11	2.29	1.94	95.5	97.2

预测结果显示,2017 年演马矿停止排水后,矿区岩溶水位将继续上升,枯水年水位为 92.6 m,平水年为 94.4 m,丰水年为 95.5 m,2018 年再关停方庄矿后,枯水年、平水年和丰水年对应的岩溶水水位分别为 92.8、95.6 和 97.2 m,即在降水量较为充沛的平水年和丰水年,焦作矿区岩溶水水位将超过九里山泉群最低排泄标高,九里山泉群将恢复出流。

6 结 论

(1)1965 年以来,焦作矿区年际降水量没有明显的增大或减小的趋势,该区域岩溶水位的多年波动下降并非降雨入渗补给量减少所致。

(2)岩溶水人工开采量对焦作市岩溶水位动态

变化影响很显著,关联度为 0.94,呈负相关关系,是焦作溶水位多年波动下降的主要影响因素。

(3)继 2016 年底关闭朱村矿与冯营矿后,2018 年再关闭演马矿和方庄矿,即开采总量降至 4.05 m³/s 时,岩溶水位将明显上升,上升幅度在 5 ~ 7 m,甚至将超过九里山泉群排泄标高(95 m),泉群将会复涌,这将为焦作市九里山白鹭湿地公园的恢复及建设提供水源条件。

参考文献:

- [1] 武 强,潘国营,管恩太,等. 焦作矿区突水灾害研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报,1995,6(4):44 - 49.
- [2] 管恩太,武 强,李 铎. 焦作市地下水资源保护与利用研究[J]. 煤田地质与勘探,2005,33(1):38 - 40.
- [3] 刘白宙. 焦作矿区地下水位动态变化特征研究[J]. 工程勘察,2007(11):40 - 43.
- [4] 黄平华,白万备,邓 勇. 焦作煤矿区岩溶水位统计模型研究[J]. 中国岩溶,2013,32(3):299 - 304.
- [5] 潘国营,贾军辉. 焦作矿区岩溶水 Cl⁻ 污染原因初探[J]. 水文地质工程地质,2002,29(5):50 - 51 + 64.
- [6] 夏太平. 焦作矿区矿井水资源化研究[D]. 焦作:河南理工大学,2009.
- [7] 潘国营,秦永泰,马亚芬,等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的丹河径流变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(3):41 - 45 + 50.
- [8] 侯玉松,马振民,雒芸芸,等. 焦作地区水文地质条件对浅层地下水污染的控制作用研究[J]. 中国农村水利水电,2013(4):40 - 44.
- [9] 黄平华,陈建生,宁 超. 焦作矿区地下水中氢氧同位素分析[J]. 煤炭学报,2012,37(5):770 - 775.
- [10] 潘国营,武 强,董东林,等. 焦作矿区岩溶裂隙网络渗流特征及研究方法[J]. 煤炭学报,1998,23(6):566 - 570.
- [11] 马而超. 地下水位动态分析及预报研究[D]. 西安:长安大学,2009.
- [12] 周秀文. 灰色关联度的研究与应用[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [13] 李明凉. 灰色关联度新判别准则及其计算公式[J]. 系统工程,1998,16(1):68 - 70 + 61.
- [14] 杨耀栋,李晓华,王兰化,等. 天津平原区地下水位动态特征与影响因素分析[J]. 地质调查与研究,2011,34(4):313 - 320.
- [15] 刘 娟,陈涛涛,迟道才. 基于 Daniel 及 Mann - kendall 检验的辽西北地区降雨量趋势分析[J]. 沈阳农业大学学报,2014,45(5):599 - 603
- [16] 束龙仓. 地下水动态预测方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.