

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.03

基于流量衰减分析的次降水入渗补给系数计算方法

尹德超^{1,2}, 罗明明³, 张亮³, 周宏¹, 陈植华³, 史婷婷⁴

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 次降水入渗补给系数是地下水资源量评价的重要参数, 次降水对地下水的入渗补给受气候、地形、地质等多种因素影响。以湖北宜昌香溪河流域雾龙洞地下河系统为例, 进行次降水入渗补给系数获取方法的探索。在泉流量衰减规律分析基础上, 探索新方法进行次降水入渗补给系数计算, 分析其规律特征及影响因素, 对计算结果的科学性合理性进行验证。研究表明: 雾龙洞泉流量衰减服从分段指数衰减方程; 研究区次降水入渗补给系数受次降水强度及降水前下垫面条件影响。基于泉流量衰减分析计算次降水入渗补给系数方法合理可行, 该方法在岩溶水资源评价中有一定的推广应用价值。

关键词: 泉流量衰减分析; 次降水入渗补给系数; 雾龙洞; 计算方法

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0011-06

Methods of calculating recharge coefficient of precipitation event based on spring recession analyses

YIN Dechao^{1,2}, LUO Mingming³, ZHANG Liang³, ZHOU Hong¹, CHEN Zhihua³, SHI Tingting⁴

(1. Geological Survey of China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding, Hebei 071051, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 4. Three Gorges Research for Geo-hazard, Ministry of Education, CUG, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Recharge coefficient of precipitation event, which is controlled by climate, topography, geology, etc., is an important parameter in the evaluation of groundwater resources. This paper discussed the calculation methods of the recharge coefficient of precipitation event in the Wulongdong underground river located in the Xiangxi River basin in Yichang of Hubei Province. Based on the spring recession analyses, we found a new way to calculate the recharge coefficient of precipitation event, examined its characteristics and controlling factors, and certificated the scientific rationality of the calculating results. The results demonstrate that the hydrographs of the Wulongdong river can be described into segmented recession curve; precipitation intensity and underlying surface conditions before rain are the main influence factors for recharge coefficient of precipitation event calculation; the calculation method of recharge coefficient of precipitation event is rational and feasible, which has application value in karst water resources evaluation.

Keywords: spring recession analysis; recharge coefficient of precipitation event; Wulongdong; calculation method

收稿日期: 2015-06-19; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113103800); 国家自然科学基金项目(41301548)

第一作者: 尹德超(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩溶水文地质。E-mail: yindch@163.com

通讯作者: 周宏(1962-), 男, 副教授, 主要从事水文地质方面的教学与科研工作。E-mail: zhouhong_cug@126.com

降水入渗补给系数为年降水补给地下水量与该区年降水量的比值,表征大气降水补给地下水的份额^[1];次降水入渗补给系数(α)为某一汇水区某次降水对地下水入渗补给量与该区本次降水量的比值^[2]。

降水补给地下水水量的确定,十分重要而又复杂,目前常用的方法可分为几类:水均衡法、地中蒸渗仪法、包气带水分通量法,利用环境组分(同位素等)求算,人工投放示踪剂求算,以及数值模拟等^[3-8]。

山区大气降水补给地下水,具有不同于平原区的特点,多根据地下水排泄量推求山区入渗系数 α :

$$\alpha = Q / (P \times F \times 1000) \quad (1)$$

式中: Q ——汇水区地下水排泄量/ m^3 ;

P ——汇水区对应降水量/ mm ;

F ——汇水区面积/ km^2 。

大气降水补给地下水的影响因素众多,大体可分为气候、地质、地形、植被、土地利用等方面^[1-2]。不同因素组合下其次降水入渗补给系数也会有所差异。

南方岩溶槽谷区内岩溶洼地等负地形广布,多无地表水系发育,降水落到地面之后,除去植物截留、蒸散发外,其余部分全部经过岩溶漏斗、落水洞等灌入式补给或经过岩溶裂隙渗入式补给地下水,最终以地下河或岩溶大泉形式集中排泄。

传统上多利用泉流量观测数据,根据水量均衡原理求取降水入渗补给系数。获得较为精确的入渗补给系数往往依赖长时间序列多个水文年的泉流量观测数据。在无泉流量历史监测条件下,难以获取其准确降水入渗补给系数,限制了区域地下水资源量评价的精度。

本文在程俊贤^[9]提出的利用岩溶水流量动态法计算降水入渗系数方法基础上,进行探索改进,提出以流量衰减分析为基础的次降水入渗补给系数计算方法。并以雾龙洞地下河系统为实例,对计算方法的科学合理性及结果的准确性进行验证。

1 方法原理

1.1 流量衰减分析

据前人研究表明^[10-13],岩溶含水系统多重含水介质释水符合分段指数衰减规律,可采用指数函数即衰减方程描述流量的衰减过程:

$$Q_t = \begin{cases} Q_0 \cdot e^{-\alpha_1 t} & t \in (0, t_1] \\ Q_1 \cdot e^{-\alpha_2 (t-t_1)} & t \in (t_1, t_2] \\ Q_2 \cdot e^{-\alpha_3 (t-t_2)} & t \in (t_2, t_3] \\ \dots\dots \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_i = \frac{\lg Q_{i-1} - \lg Q_i}{0.4343(t_i - t_{i-1})} \quad (3)$$

式中: Q_t ——衰减开始后 t 时刻流量;

Q_i ——第 $(i+1)$ 衰减期初始时刻流量;

α_i ——第 (i) 衰减期流量衰减系数;

t_i ——第 (i) 衰减期结束时间。

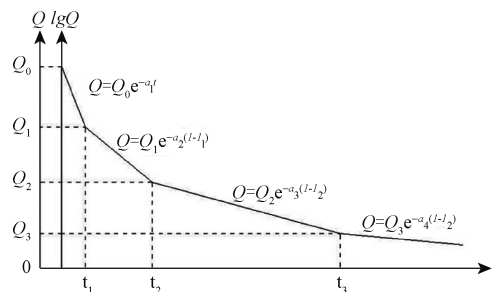


图1 岩溶泉流量衰减曲线

Fig. 1 Recession curve of a karst spring

流量衰减过程曲线见图1,该流量衰减过程存在四个衰减期,每一衰减期 $\lg Q - t$ 曲线的斜率即为该衰减期流量衰减系数,该过程每一衰减期衰减系数分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$,曲线斜率递减表明衰减系数随衰减期逐一递减。该流量衰减变化过程即反映了岩溶区多重含水介质的释水过程。

1.2 次降水入渗补给系数计算

对洪峰过程进行水文分割,计算该次降水引起的地下水排泄增量,反推此次降水入渗补给资源量,以此计算该次降水入渗补给系数。

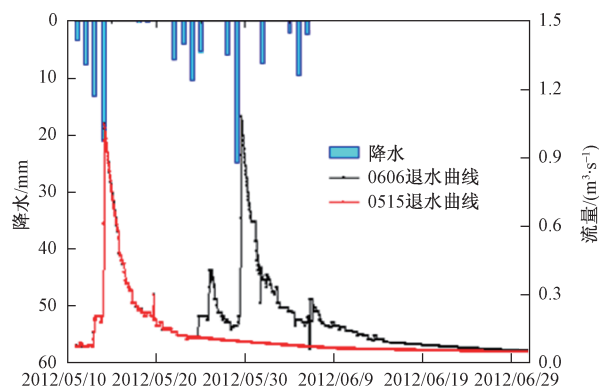


图2 次降水入渗补给量计算图

Fig. 2 Plot of recharge volume of precipitation event

图2为某一岩溶地下河流量随降水动态变化曲线。自2012.05.22降水开始之后地下河流量开始增大(图2),在降水影响下,地下河出现三次明显的洪峰过程,与降水量的大小有很好的对应关系,之后随着降水的停止,流量开始衰减,将此流量随时间变化过程记为 $Q_1(t)$ 。

气象站监测数据,数据精度为 0.1mm,时间间隔为 1h。

2.3 雾龙洞流量衰减分析

根据以上流量衰减分析方法,对 2011—2012 年雾龙洞地下河系统 9 个洪峰退水曲线进行分析,受实际降水情况限制,并非所有衰减过程都完整存在 4 个衰减期,个别仅存在第 I、II 衰减期,衰减期划分及衰减系数计算结果见表 1。

表 1 雾龙洞地下河系统多次洪峰流量衰减过程分析成果表
Table 1 Recession analysis of the Wulongdong underground river

开始时间	初始流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	衰减期 I		衰减期 II		衰减期 III		衰减期 IV	
		α	t/h	α	t/h	α	t/h	α	t/h
2011-07-27	1.38	0.0318	44	0.0064	140	0.0019	>360		
2011-08-21	0.457	0.0338	33	0.0053	67	0.0017	>156		
2011-09-19	0.671	0.0288	28	0.0059	157	0.0013	>111		
2012-05-14	1.07	0.0170	77	0.0048	>173				
2012-05-29	0.67	0.0200	45	0.0060	125	0.0020	350	0.0007	>230
2012-07-05	2.93	0.0200	24	0.0030	>54				
2012-07-22	0.543	0.0237	25	0.0046	125	0.0019	450	0.0008	>100
2012-08-21	0.45	0.0400	33	0.0050	88	0.0010	>187		
2012-09-12	1.32	0.0506	40	0.0063	110	0.0016	350	0.0004	>400
平均值		0.0300	39	0.0053	123	0.0016	383	0.0006	

计算统计结果表明,洪峰流量衰减过程可分为四个阶段,从第 I 到第 IV 阶段每一阶段衰减系数递减,持续时间递增,以 9 次退水过程参数平均值作为雾龙洞标准退水曲线;第 I 阶段衰减系数为 0.03,持续时间为 39h;第 II 阶段衰减系数为 0.0053,持续时间为 123h;第 III 阶段衰减系数为 0.0016,持续时间为 383h;第 IV 阶段衰减系数为 0.0006,直至退水过程结束。

2.4 次降水补给系数计算

按照次降水入渗补给系数计算方法,从 2011 年及 2013 年选取 11 次大小不同的降水过程,计算其次降水入渗补给系数,计算结果见表 2。

表 2 雾龙洞地下河次降水补给系数计算成果表
Table 2 Recharge coefficients of precipitation event of the Wulongdong underground river

编号	衰减期	降水时间	降水总量/mm	补给区降水总量 $P/(\times 10^4 \text{m}^3)$	补给资源量 $V/(\times 10^4 \text{m}^3)$	入渗补给系数 α
1	II	2012.06.04—06.06	14.2	12.35	2.05	0.166
2	III	2012.08.01—08.07	18.7	16.27	1.18	0.073
3	IV	2012.06.09—06.22	23.9	20.79	4.80	0.231
4	III	2012.08.18—08.21	34.4	29.93	7.45	0.249
5	III	2011.06.27	41.6	36.80	9.39	0.255
6	II	2012.05.27—06.10	54.8	47.68	28.26	0.593
7	III	2012.07.22—07.25	57.4	49.94	18.00	0.360
8	III	201205.07—05.19	66.7	58.03	31.91	0.550
9	III	2012.05.24—06.06	81.8	71.17	35.46	0.498
10	III	2011.07.07—07.20	87	75.69	24.33	0.321
11	II	2012.07.05—07.13	104.9	91.26	63.36	0.694

备注:①表中衰减期为该次降水处于上次洪峰退水过程的衰减阶段;
②次降水量 < 10mm 的次降水多被截留用于蒸散发,地下河流量无明显响应,故可认为对地下水未形成有效入渗补给,未列入以上计算统计结果。

表 2 计算结果显示,研究区次降水补给系数差别较大,最小仅为 0.073,最大可达 0.694,相差近 10 倍,图 4 为雾龙洞地下河系统次降水入渗补给系数分布图。图 4 显示,次降水入渗补给系数随次降水量的增

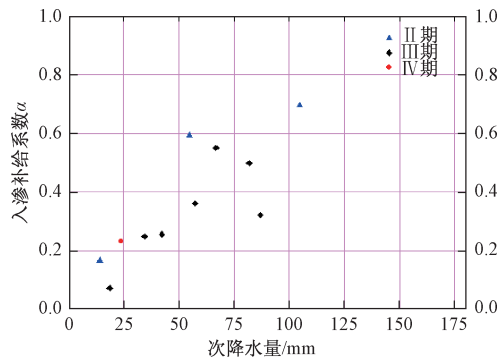


图 4 次降水入渗补给系数统计分布图
Fig. 4 Distribution of the recharge coefficients of precipitation event

大而增大,次降水量与次降水入渗补给系数两组数据相关系数为 0.803,表明二者具有较强的相关性。退水曲线表征地下水排泄流量衰减的过程,随时间推移,衰减期越靠后,地下水系统所储存水资源量越少,通过所处的衰减期,可大致反映当时地下河系统的含水程度。

以次降水量的大小按照 0 ~ 10mm,10 ~ 20mm,20 ~ 50mm,50 ~ 100mm,>100mm 五种情况进行分段统计,并计算不同次降水分段的降水入渗补给系数平均值,结果见表 3。

由表 3 可看出,次降水量相同情况下,此次降水时间位于上次流量衰减阶段越靠前,其次降水入渗补给系数越大,反之则小。存在这种规律是因为随着流量衰减,地下水系统含水量减小,其地表植被、土壤含水量越低,大气降水落到地面以后,被植被截留、吸收、用于蒸散发水量越大,有效入渗补给地下水的量也就越小,相应的次降水入渗补给系数也越小。

表 3 次降水补给系数分段统计成果表
Table 3 Recharge coefficients of precipitation event in different precipitation ranges

降水/mm 衰减阶段	降水/mm				
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 100	> 100
II	-	0.166	-	0.593	0.694
III	-	0.073	0.252	0.433	-
IV	-	-	0.231	-	-
均值	0	0.119	0.245	0.465	0.694

相比次降水量对降水补给系数的影响,此次降水所处的衰减期影响相对较小,在实际应用时,可仅考虑次降水量这一因素,在次降水统计结果基础上,应用于某段时间地下水补给资源量计算。

2.5 计算结果验证

选取 2012 年为验证期,用水量均衡法及次降水补给系数法两种方法分别计算该区地下水补给资源量,以验证次降水入渗补给系数计算结果的准确性。

(1) 水量均衡法

利用雾龙洞电站 2012 年发电量可反算雾龙洞地下河流量,根据水量均衡原理,该地下河系统全年排泄量即为本年度地下水补给资源量。

根据电站数据反算,2012 年雾龙洞地下河平均流量 $Q = 0.102\text{m}^3/\text{s}$,即 2012 年雾龙洞地下水补给资源量 $V = Q \cdot t = 322.0 \times 10^4\text{m}^3$ 。

(2) 次降水入渗补给系数法

为利用次降水补给系数进行地下水补给资源量计算,首先统计雾龙洞补给区 2012 年度降水数据。研究区高程及地理位置与黄粮气象站最为接近,利用黄粮气象站 2012 年度降水数据,统计不同次降水量在全年所占比重如表 4。

表 4 2012 年雾龙洞地下河系统次降水补给资源量计算结果
Table 4 Recharge volume of precipitation event of the Wunlongdong underground river in the year 2012

分段/mm	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 100	> 100	总计
降水量/mm	44.1	120.2	232.7	204.8	300.8	902.6
补给资源量/ 10^4m^3	0	12.4	49.6	82.9	181.6	326.5
占比	0.00%	3.81%	15.19%	25.37%	55.62%	100.00%

根据不同分段次降水补给系数参考值及每一分段降水量,计算 2012 年地下水补给资源量,计算结果见表 4。由次降水补给系数计算出 2012 年度雾龙洞地下河地下水补给资源总量为 $326.5 \times 10^4\text{m}^3$,其中次降水量大于 100mm 的地下水资源补给量占总补给量的 1/2。

对比以上两种方法的补给资源量计算结果,次降水补给系数计算结果的相对误差为 1.2%。

根据以上地下水补给资源量计算结果,得雾龙洞 2012 年年降水入渗补给系数为 0.416,与前人对溶丘洼地地区降水入渗补给系数认识相符。

由此证明次降水补给系数计算结果较为科学合理,利用流量衰减规律计算次降水入渗系数的方法合理可行。

3 结论

(1) 鄂西岩溶槽谷区雾龙洞地下河流量衰减过程符合分段的指数衰减规律,可分为四个衰减阶段,从第

I 到第 IV 阶段,每一阶段流量衰减系数依次递减,衰减持续时间依次递增。

(2)以泉流量衰减分析为基础,用流量分割求取次降水入渗补给系数的计算方法科学可行,计算结果合理。

(3)鄂西岩溶槽谷区次降水入渗补给系数随次降水量增大而增大,且受降水前下垫面条件影响。

(4)基于泉流量衰减分析的次降水入渗补给系数计算方法,可用于其他类似地区次降水入渗补给系数计算。

参考文献:

- [1] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,2011. [ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, *et al.* Hydrogeological basis [M]. Beijing: Geological Press, 2011. (in Chinese)]
- [2] 吴继敏,郑建青.次降水入渗补给系数的模型研究[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(6):7-11. [WU J M, ZHENG J Q. Model estimation of sub-coefficient of recharge by rainfall infiltration[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 1999, 27(6):7-11. (in Chinese)]
- [3] 王永义,王专翠,胡以高.降雨入渗补给规律分析[J].地下水,1998(2):74-75. [WANG Y Y, WANG Z C, HU Y G. Analysis of analysis of precipitation recharge [J]. Groundwater, 1998(2):74-75. (in Chinese)]
- [4] 郭会荣,靳孟贵,齐登红,等.基于地中渗透仪的入渗补给方式分析[J].水文地质工程地质,2007,34(4):107-111. [GUO H R, JIN M G, QI D H, *et al.* Characterization of groundwater recharge processes based on large lysimeters[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(4):107-111. (in Chinese)]
- [5] 王树芳.岩溶含水系统降水入渗补给研究进展[J].水文,2014(6):1-8. [WANG S F. Progress in Study on Precipitation Infiltration Recharge of Karstic Groundwater System [J]. Hydrology, 2014(6):1-8. (in Chinese)]
- [6] 张志才.降雨入渗补给地下水研究[D].南京:河海大学,2006. [ZHANG Z C. Study of precipitation recharge to groundwater [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)]
- [7] 李金柱.降水入渗补给系数综合分析[J].水文地质工程地质,2009,36(2):29-33. [LI J Z. Comprehensive analysis of precipitation infiltration recharge coefficient [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(2):29-33. (in Chinese)]
- [8] 钱静,王旭升,陈添斐.滞后补给权函数与包气带的关系[J].水文地质工程地质,2013,40(3):1-5. [QIAN J, WANG X S, CHEN T F. The relationship between lagged supply weight function and aeration zone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3):1-5. (in Chinese)]
- [9] 程俊贤.利用岩溶水流量动态法计算降水有效渗入系数[J].水文地质工程地质,1982(5):8-12. [CHENG J X. Utilization of the karst water flow dynamic method to calculate the effective rainfall infiltration coefficient [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1982(5):8-12. (in Chinese)]
- [10] 国家地质总局岩溶地质考察组.赴南斯拉夫岩溶地质考察技术报告[M].1978. [Karst geology study group in China National Administration of Geology. Karst geology investigation technical report from Yugoslavia [M]. 1978. (in Chinese)]
- [11] 黄敬熙.流量衰减方程及其应用——以洛塔岩溶盆地为例[J].中国岩溶,1982,1(2):118-126. [HUANG J X. Recession equation and its application—case history of luota karst basin [J]. Carsologica Sinica, 1982, 1(2):118-126. (in Chinese)]
- [12] 董贵明,束龙仓.地下水流量衰减方程研究进展及展望[J].水文地质工程地质,2014,41(4):45-51. [DONG G M, SHU L C. Research progress and prospects of groundwater flow attenuation equation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4):45-51. (in Chinese)]
- [13] 尹德超,罗明明,周宏,等.鄂西岩溶槽谷区地下河系统水资源构成及其结构特征[J],水文地质工程地质,2015,42(3):13-18. [YIN D C, LUO M M, ZHOU H, *et al.* Water resources composition and structure characteristics of underground river system in karst ridge-trough, Western Hubei Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3):13-18. (in Chinese)]
- [14] 王增海.水电站发电流量计算方法探讨[J].人民黄河,2012(8):117-119. [WANG Z H. Discussion on the calculation method of water discharge for power generation in hydroelectric station [J]. Yellow River, 2012(8):117-119. (in Chinese)]

责任编辑:张若琳