

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.009

基于泉群流量与降水量相关性的明水泉域 岩溶水强径流带识别

余亚飞^{1,2}, 温忠辉^{1,2}, 商金华³, 张曼琦^{1,2}, 王 鑫³, 束龙仓^{1,2}, 王小博^{1,2}, 倪寒茜^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250200)

摘要:运用皮尔逊相关系数法分析了明水泉域各水文站月尺度最佳降水滞时,依据最佳降水滞时在旬尺度和日尺度条件下分别计算了 2006—2013 年泉群流量与各水文站降水量的皮尔逊相关系数,得出与泉群流量关系相对密切的水文站点,从而识别出明水泉域强径流带。结果表明:各水文站最佳降水滞时均为 5 个月;明水站、闫家域站和旭升站降水量变化与泉群流量过程有较大的一致性,对泉群流量的影响相对较大,3 站所在位置可能存在明水泉域岩溶水强径流带。

关键词:强径流带;降水量;泉群流量;皮尔逊相关系数;明水泉域

中图分类号:TV125;P642.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2021)03-0056-05

Identification of karst water strong runoff zone in Mingshui spring area based on correlation between spring discharge and precipitation//YU Yafei^{1,2}, WEN Zhonghui^{1,2}, SHANG Jinhua³, ZHANG Manqi^{1,2}, WANG Xin³, SHU Longcang^{1,2}, WANG Xiaobo^{1,2}, NI Hanxi^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College Of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250200, China)

Abstract: Pearson correlation coefficient method was employed to analyze the best precipitation lag time at the monthly scale of each hydrological station in Mingshui spring area. According to the best precipitation lag time, the Pearson correlation coefficients of spring discharge and precipitation of each hydrological station from 2006 to 2013 were calculated at the ten-day scale and the daily scale, respectively. Thus the hydrological stations closely related to spring discharge were found out and the strong runoff zone in Mingshui spring area was identified. The results show that the best precipitation lag time of each station is 5 months. The precipitation changes of Mingshui Station, Yanjiayu Station and Xusheng Station are greatly consistent with the spring discharge, which have a relatively large impact on the spring discharge. The strong runoff zone of karst water-bearing medium in Mingshui spring area may exist at the location of three stations.

Key words: strong runoff zone; precipitation; spring discharge; Pearson correlation coefficient; Mingshui spring area

岩溶水强径流带是以溶隙网络为主的地下水流比较集中的强岩溶含水带,是华北地区特有的一种宏观岩溶水文地质现象^[1]。南方地下岩溶以大型溶洞为主,主要形成地下河系,而华北地下岩溶则多为溶隙网络状,主要发育强径流带系统^[2]。大气降水是水循环系统的一个重要环节,大气降水入渗补给是影响岩溶地下水补给量变化的最主要因素^[3]。泉群往往是岩溶强径流带存在的典型标志,也是岩溶强径流带排泄的出口。强径流带的识别对于深入

了解岩溶水的含水系统及水流系统具有重要的理论意义,可为准确建立泉域水文地质概念模型提供科学依据。

国内外诸多学者对岩溶地区强径流带开展了研究工作,如裴捍华等^[4]根据成因特征,将山西岩溶水强径流带分为接触带型、河谷型、构造带型、向斜谷地型和复合型 5 种类型;Miao 等^[5]根据娘子关泉流域各子区的泉群流量和降水量,利用交叉小波变换识别岩溶地下水强径流带;An 等^[6]利用多窗口谱

基金项目:国家自然科学基金(41172203,41572210)

作者简介:余亚飞(1990—),男,硕士研究生,研究方向为地下水资源评价与管理。E-mail:495729856@qq.com

通信作者:束龙仓(1964—),男,教授,博士,主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail:lcsu@hhu.edu.cn

估计 (MTM) 法, 通过泉水流量对降水量的水力响应时间识别岩溶含水层的强径流带。

本文基于济南明水泉域多个水文站的多年监测资料, 运用皮尔逊相关系数法分析明水泉域泉群流量和各水文站最佳降水滞时, 通过最佳降水滞时分析明水泉域泉群流量与降水量皮尔逊相关系数较大的水文站点, 最终识别出明水泉域的强径流带。

1 明水泉域概况

如图 1 所示, 明水泉域位于济南市章丘区和淄博市境内, 西起文祖断裂带, 东至禹王山断裂带^[7]。南以地表分水岭为界, 北到奥陶纪灰岩顶板埋深 600 m 分界线, 总面积约 556. 14 km²。明水泉域地处鲁中低山丘陵与鲁西北冲积平原交接带上, 南部为泰山山脉, 北部为黄河平原。地貌类型由南向北依次为中山、低山、丘陵、山间平原和冲积平原, 地势南高北低。明水泉域地处中纬度内陆地带, 属暖温带大陆性气候, 平均降水量为 613 mm, 降水时空分布不均, 主要集中于 6—9 月, 多年平均气温为 14. 3 ℃, 多年平均陆面实际蒸发量为 586. 7 mm。泉域属于小清河流域^[8], 区内主要河流为青杨河和东巴漏河。泉群为位于明水泉域西北角、明水街道西侧的百脉泉群, 主要泉口为墨泉、龙泉、金镜泉和万泉湖等。明水泉域有明水、官庄、旭升、闫家峪、石匣和磁村共 6 个水文站。水文站点分布不均匀, 南少北多, 最远的磁村站距离百脉泉群 28. 7 km, 最近的明水站距离百脉泉群约 1. 7 km。

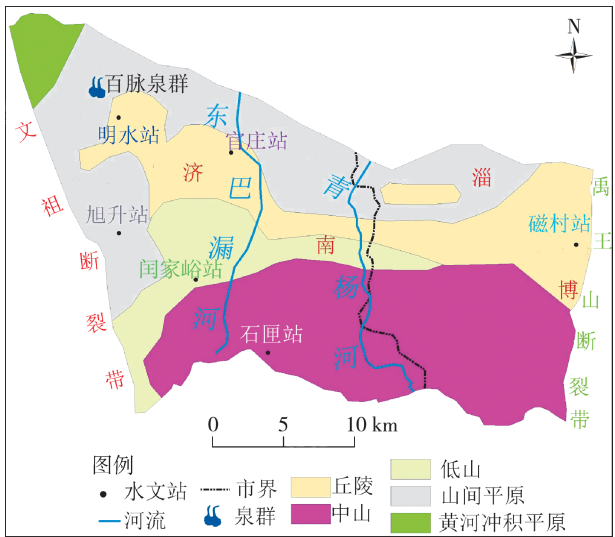


图 1 明水泉域概况

Fig. 1 General situation of Mingshui spring area

明水泉域最主要的地下水类型是奥陶系灰岩裂隙岩溶水, 百脉泉群泉水即为此类型, 具有典型的雨源型特征。大气降水沿灰岩裂隙渗入地下后, 沿着

岩层倾向向北东方向流动, 到达北部边界后, 受北部边界不透水层的阻挡折向西北。如图 2 所示, 百脉泉群为泉域排泄区最低点, 海拔 60 m 左右。汇集于百脉泉群的奥陶系灰岩裂隙岩溶水在西部受不透水的文祖断裂带阻挡而富集, 受上覆煤系地层阻挡而承压, 在特定的构造条件下, 沿断层破碎带裂隙涌出地表, 形成百脉泉群^[9]。

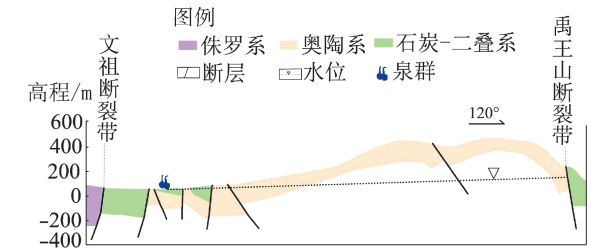


图 2 明水泉域地质剖面示意图

Fig. 2 Geological section diagram of Mingshui spring area

2 研究方法

本文主要采用 SPSS 统计软件^[10], 使用皮尔逊相关系数法进行降水滞时分析, 在此基础上, 对泉群流量与各水文站降水量之间的皮尔逊相关系数进行排序, 找出与泉群流量相关性较强的水文站点, 从而识别出岩溶水强径流带。

在自然科学领域中, 皮尔逊相关系数广泛用于度量两个变量之间的相关程度, 其值介于 -1 与 1 之间。两个变量之间的皮尔逊相关系数定义为两个变量之间的协方差和标准差的商:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\delta_X \delta_Y} \quad (1)$$

式中: ρ_{XY} 为变量 X 和 Y 的皮尔逊相关系数; σ_{XY} 为变量 X 和 Y 的协方差; δ_X 、 δ_Y 分别为变量 X 和 Y 的标准差。

3 结果与分析

3.1 降水年际变化对泉水动态的影响

利用降水年鉴分析统计 2006—2013 年的明水泉域年降水量作为年降水量, 以及百脉泉公园附近观测井同一时间的实际观测数据作为泉水年出流量。如图 3 所示, 在年尺度的同一时间轴上分析大气降水年际变化对泉群流量动态的影响, 可以看出, 年降水量在 2007 年开始下降, 2007—2011 年出现第一段相对长波谷, 2011—2013 年出现第二段相对短波谷; 泉水年出流量从 2008 年开始下降, 2008—2012 年出现第一段相对长波谷。泉水年出流量总体上与年降水量变化趋势基本一致, 且在时间上有一定的滞后性。

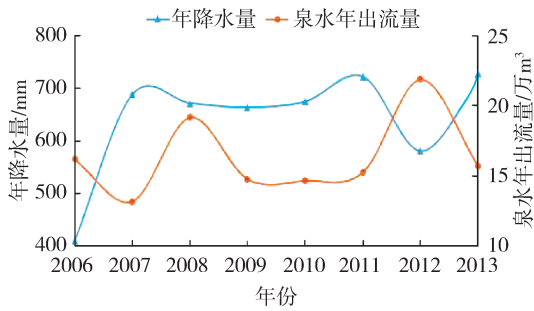


图3 泉水年出流量和降水量年际变化趋势

Fig.3 Interannual variation trend of spring discharge and precipitation

泉水年出流量变化趋势虽然与泉域降水量变化在总体趋势上基本一致,但各自的变化梯度却并不相同,年际泉水年出流量的衰减梯度较年际降水量来说下降幅度更大。分析原因,明水泉域所在济南市章丘区工业发展及城市化率明显加速,人工开采地下水量逐年增加。例如,2006年章丘市(2016年章丘市撤市划区,成为济南市章丘区)城镇化率为28.05%,2010年为40.25%,2015年为57.01%。城市扩建使市区面积增大,导致岩溶水直接补给区面积逐渐减少^[11]。

3.2 最佳降水滞时

由于岩溶水系统的调蓄作用,降水入渗补给泉水出现明显的滞后,滞后时间(降水滞时)视具体水文地质条件而定^[12]。降水滞时不同所对应的皮尔逊相关系数也会发生变化,当皮尔逊相关系数取得最大值时,所对应的降水滞时称为最佳降水滞时。由图3可以看出,降水滞时不超过1a。为了得到最佳降水滞时,采用皮尔逊相关系数法设置降水滞时分别为1~12个月,利用皮尔逊相关系数法在相同的滞时时间轴上绘出百脉泉群流量与各水文站降水量相关系数变化过程如图4所示,得到月尺度条件下不同降水滞时明水泉域泉群流量与各水文站降水量的皮尔逊相关系数变化过程。

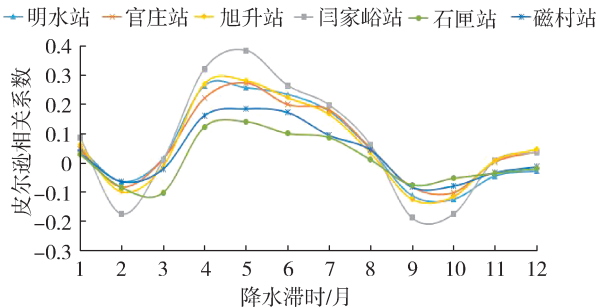


图4 泉群流量与水文站降水量皮尔逊相关系数随降水滞时的变化趋势

Fig.4 Variation trend of Pearson correlation coefficient of spring discharge and precipitation of each hydrological station with precipitation lag time

可以看出,泉域内各水文站到泉群的距离相差较大,其相关系数起伏过程却具有一致性,呈现“低—高—低”的变化趋势,6个水文站最佳降水滞时均为5个月。这说明在月尺度条件下,水文站到泉群的距离与泉群流量对各水文站降水量的响应滞时无显著关系,各水文站的皮尔逊相关系数变化趋势相似。表1为2006—2013年的各水文站月尺度条件下的最佳降水滞时。

表1 月尺度条件下明水泉域各水文站最佳降水滞时

Table 1 The best precipitation lag time of each hydrological station in Mingshui spring area at the monthly scale

年份	降水量/mm	泉水年出流量/万 m ³	最佳降水滞时/月
2006 年	410	16.2	10
2007 年	690	13.8	8
2008 年	675	19.1	6
2009 年	666	14.8	6
2010 年	686	13.9	6
2011 年	740	14.9	5
2012 年	593	20.7	7
2013 年	730	15.3	5

年降水量大小和泉群流量都与最佳降水滞时呈负相关关系,年降水量越大则滞时越短,说明降水量越大,越有利于降水入渗补给泉水,且在月尺度条件下,水文站到泉群的距离对最佳降水滞时的影响很小。

3.3 泉群流量和水文站降水量关系

在月尺度条件下,各水文站的最佳降水滞时趋于一致。在相同的月尺度最佳降水滞时条件下,通过增大和减小降雨计算周期(表2和表3),利用日尺度和旬尺度降水量来计算泉群流量与水文站降水量的皮尔逊相关系数,通过皮尔逊相关系数的平均值排序来筛选出旬尺度和日尺度条件下皮尔逊相关系数较大的水文站。

由表2和表3可知,随着时间尺度的增大,皮尔逊相关系数也逐渐增大。明水站、闫家峪站和旭升站的皮尔逊相关系数都排在前3位,且与后面3个水文站的皮尔逊相关系数相差较大,说明这3个水文站降水量变化与泉群流量过程有较大的一致性,对泉群流量的影响更大。因此推断明水站、闫家峪站和旭升站附近的降水能够集中高效入渗转化成地下水,形成强径流带。

3.4 强径流带的分布

地下水的运动方向垂直于地下水位等值线,因此强径流带在平面上的走向与地下水位等值线的分布规律相关。在明水站、闫家峪站和旭升站附近发育有甘泉断裂带和明水断裂带,明水泉域强径流带分布会受到断裂带分布的影响。

泉群是强径流带的排泄出口。强径流带的流向

表 2 日尺度条件下泉群流量与水文站降水量皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient of spring discharge and precipitation of each hydrological station at the daily scale

水文站	皮尔逊相关系数									排序
	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	平均值	
明水站	0.113	0.225	0.210	0.216	0.167	0.314	0.161	0.289	0.21	2
官庄站	0.151	0.153	0.180	0.204	0.132	0.258	0.124	0.257	0.18	4
旭升站	0.177	0.231	0.181	0.247	0.150	0.273	0.155	0.266	0.20	3
闫家峪站	0.134	0.201	0.243	0.278	0.186	0.303	0.153	0.293	0.22	1
石匣站	0.163	0.175	0.183	0.198	0.122	0.221	0.099	0.223	0.17	5
磁村站	0.141	0.200	0.166	0.164	0.142	0.182	0.102	0.176	0.16	6

表 3 旬尺度条件下泉群流量与水文站降水量皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficient of spring discharge and precipitation of each hydrological station at the ten-day scale

水文站	皮尔逊相关系数									排序
	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	平均值	
明水站	0.245	0.456	0.417	0.511	0.367	0.613	0.288	0.574	0.434	1
官庄站	0.169	0.400	0.338	0.392	0.199	0.541	0.257	0.519	0.352	4
旭升站	0.267	0.399	0.421	0.394	0.292	0.591	0.261	0.555	0.398	3
闫家峪站	0.236	0.413	0.440	0.431	0.307	0.631	0.274	0.537	0.409	2
石匣站	0.177	0.416	0.323	0.361	0.176	0.529	0.254	0.487	0.340	5
磁村站	0.171	0.361	0.316	0.325	0.168	0.488	0.245	0.474	0.319	6

应该垂直地下水位等值线,同时受到断裂带的走向影响。根据泉群流量与水文站降水量的相关性,可以识别出明水泉域强径流带结果如图 5 所示,强径流带自闫家峪站开始,考虑到明水泉域水文站点分布的不均匀性,强径流带起点在闫家峪站西侧,沿着甘泉断裂带左侧连接旭升站,再沿明水断裂带方向到达明水站,最后到达百脉泉群。

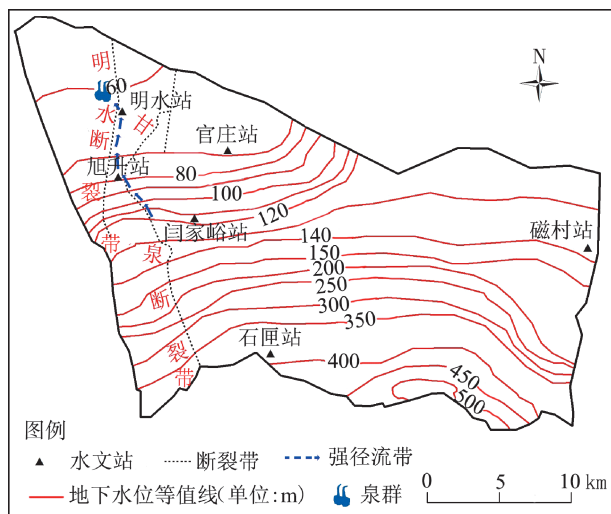


图 5 明水泉域强径流带识别结果

Fig.5 Identification results of strong runoff zone in Mingshui spring area

4 结 论

a. 年尺度条件下,明水泉域泉水出流量总体上与泉域降水量变化趋势基本一致,而且在时间上有一定的滞后性。月尺度条件下,明水泉域内泉群流

量与水文站降水量的皮尔逊相关系数最大时,所对应的降水滞时趋于一致,均为 5 个月,说明月尺度条件下,水文站到泉群的距离对降水滞时的影响很小。

b. 泉水年际出流量总体上与年际降水量变化趋势基本一致,而且在时间上有一定的滞后性。

c. 增大和减小时间尺度,筛选出旬尺度和日尺度条件下,明水泉域内泉群流量与降水量的皮尔逊系数较大的水文站点。明水站、闫家域站和旭升站降水量变化与泉群流量过程有较大的一致性,对泉群流量的影响更大,形成了强径流带。

d. 明水泉域的强径流带的识别过程需要考虑泉域内断裂带的发育情况和地下水位等值线分布,所得结果更为精确。

参考文献:

- [1] 邓启军,李伟,王雨山,等.鲁中南泰安纸坊泉域岩溶水强径流带成因及特征[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):182-188. (DENG Qijun, LI Wei, WANG Yushan, et al. The causes and characteristics of karst water strong runoff belts in Tai'an Zhifang spring area in Central and Southern Parts of Shandong [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 182-188. (in Chinese))
- [2] 刘光亚.中国北方的岩溶水强径流带[J].河北地质大学学报,2017,40(2):15-19. (LIU Guangya. Strong runoff zone in karst water in Northern China [J]. Journal of Hebei GEO University, 2017, 40(2): 15-19. (in Chinese))
- [3] 崔爱萍,于翠翠.百脉泉泉群流量动态特征及影响因素

- 分析[J]. 山东国土资源, 2016, 32(9): 30-35. (CUI Aiping, YU Cuicui. Analysis on dynamic characteristics of discharge and influence factors in Baimai Spring group [J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(9): 30-35. (in Chinese))
- [4] 裴捍华, 杨亲民, 郭振中, 等. 山西岩溶水强径流带的成因类型及其水文地质特征[J]. 中国岩溶, 2003(3): 55-60. (PEI Hanhua, YANG Qinmin, GUO Zhenzhong, et al. Hydrogeologic characteristics and formation of strong seepage flow zones of karst water in Shanxi [J]. Carsologica Sinica, 2003(3): 55-60. (in Chinese))
- [5] MIAO Jinjie, LIU Guoliang, CAO Bibo, et al. Identification of strong karst groundwater runoff belt by cross wavelet transform [J]. Springer Netherlands, 2014, 28(10): 2903-2916.
- [6] AN L, REN X, HAO Y, et al. Utilizing precipitation and spring discharge data to identify groundwater quick flow belts in a karst spring catchment [J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(10): 10-25.
- [7] 张宝柱, 陈振东. 明水泉岩溶水系统分析[J]. 河北地质学院学报, 1996, 19(1): 52-58. (ZHANG Baozhu, CHEN Zhenrong. The analysis of Mingshui Spring karst-water system in Shandong [J]. Journal of Hebei GEO University, 1996, 19(1): 52-58. (in Chinese))
- [8] 刘永红, 郑萍萍, 周明春. 章丘市泉群保护与泉水资源利用工程[J]. 山东水利, 2007(2): 44-45. (LIU Yonghong, ZHENG Pingping, ZHOU Mingchun. Spring group protection and spring water resource utilization project in Zhangqiu City [J]. Shandong Water Resources, 2007(2): 44-45. (in Chinese))
- [9] 刘伟, 袁传芳, 胡祖忠. 浅析明水泉的形成与保护[J]. 上海水务, 2005(4): 49-50. (LIU Wei, YUAN Chuanfang, HU Zuzhong. On the formation and protection of Mingshui Spring [J]. Shanghai Water, 2005(4): 49-50. (in Chinese))
- [10] 曹敏, 沈立成, 肖琼, 等. 基于 SPSS 的岩溶地下水水质变化及其影响因素: 以重庆市金佛山表层岩溶地下水为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2012, 35(2): 82-87. (CAO Min, SHEN Licheng, XIAO Qiong, et al. Application of factor analysis in the assessment of influence factors of karst groundwater quality: a case from epikarst groundwater at Jinfo Mountain in Chongqing [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2012, 35(2): 82-87. (in Chinese))
- [11] 王茂枚, 束龙仓, 季叶飞, 等. 济南岩溶泉水流量衰减原因分析及动态模拟[J]. 中国岩溶, 2008(1): 19-23. (WANG Maomei, SHU Longcang, JI Yefei, et al. Causes of spring's of flux attenuation and simulation of spring's regime: a case in Jinan karst spring area [J]. Carsologica Sinica, 2008(1): 19-23. (in Chinese))
- [12] 季叶飞, 邹靖, 顾锦, 等. 降水入渗补给滞时的确定及其在泉流量模拟与预测中的应用[J]. 水文, 2008, 28(6): 30-32. (JI Yefei, ZOU Qing, GU Jing, et al. Determination of precipitation recharge lag time: application in spring flow simulation and prediction [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(6): 30-32. (in Chinese))
- [13] 叶海东, 闫晋卫. 柳林泉域岩溶水强径流带的成因类型及水文地质条件分析[J]. 工程勘察, 2008(增刊2): 206-208. (YE Haidong, YAN Jingwei. Analysis on the genetic type and hydrogeological conditions of karst water strong runoff zone in Liulin spring area [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(Sup2): 206-208. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-05-16 编辑: 熊水斌)

(上接第 55 页)

- [23] 贾祎琳, 张文, 孟令奎. 面向 GF-1 影像的 NDWI 分割阈值选取方法研究[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 95-100. (JIA Yilin, ZHANG Wen, MENG Linghui. A study of selection method of NDWI segmentation threshold for GF-1 image [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(1): 95-100. (in Chinese))
- [24] 李科, 杜琳. 基于膨胀算法的缓冲区分析的设计与实现[J]. 测绘科学技术学报, 2005, 22(3): 229-231. (LI Ke, DU Lin. An algorithm of buffer zones based on algorithm of dialation [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2005, 22(3): 229-231. (in Chinese))
- [25] 王中挺, 李小英, 李莘莘, 等. GF-1 星 WFV 相机的快速大气校正[J]. 遥感学报, 2016, 20(3): 353-360. (WANG Zhongting, LI Xiaoying, LI Shenshen, et al.

Quickly atmospheric correction for GF-1 WFV cameras [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3): 353-360. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-07-08 编辑: 彭桃英)

