

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0115

倪寒茜,束龙仓,韩刚,等.城市化对趵突泉泉域降水入渗补给的影响[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):64-70,147. NI H X, SHU L C, HAN G, et al. Impact of urbanization on precipitation infiltration recharge in Baotu Spring basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 64-70, 147. (in Chinese)

城市化对趵突泉泉域降水入渗补给的影响

倪寒茜^{1,2},束龙仓^{1,2},韩刚³,张曼琦^{1,2},王鑫³,王小博^{1,2},
余亚飞^{1,2},OPOKU Portia Annabelle^{1,2}

(1. 河海大学 水文水资源学院,南京 210098;2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098;3. 济南轨道交通集团有限公司,济南 250101)

摘要:为研究济南城市化发展对大气降水入渗补给的影响,利用济南市1980、1990、2000、2018年的遥感数据和Feflow软件识别不同时段的趵突泉泉域大气降水入渗补给量,分析城市化发展引起的土地利用类型变化对趵突泉泉域降水入渗补给量的影响。结果表明:1980—2018年,研究区耕地和林地面积显著减少,建设用地面积大幅增加;2000—2018年,研究区不透水面积增加了213.13 km²,大气降水入渗补给量减少了2 625万 m³。研究成果可为济南市未来的城区规划提供科学的参考,也为济南保泉供水工作提供有效的数据支撑。

关键词:Feflow;城市化;大气降水入渗补给;遥感;土地利用类型

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Impact of urbanization on precipitation infiltration recharge in Baotu Spring basin

NI Hanxi^{1,2}, SHU Longcang^{1,2}, HAN Gang³, ZHANG Manqi^{1,2}, WANG Xin³, WANG Xiaobo^{1,2},
YU Yafei^{1,2}, OPOKU Portia Annabelle^{1,2}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd, Jinan 250101, China)

Abstract: To study the effects of urbanization and the impact of land-use on atmospheric precipitation infiltration recharge in Jinan of China, the Feflow software and the remote sensing data for the years of 1980, 1990, 2000, and 2018 were used to identify the atmospheric precipitation infiltration rate in different periods in Baotu Spring basin. The results revealed that: the area of cultivated land and forest land has decreased sharply, while the built-up areas have increased significantly for the years from 1980 to 2018; the impervious area had increased by 213.13 km², while the atmospheric precipitation infiltration rate has decreased by 26.25 million m³ for the years of 2000 and 2018. The results of this study could be used as a scientific reference for future planning of the Jinan city and also provide effective data to aid in the sustainability and protection of the Spring basin.

Key words: Feflow; urbanization; precipitation infiltration recharge; remote sensing; land-use type

济南是举世闻名的“泉城”,因趵突泉常年喷涌而享誉世界。泉水是济南的根,是济南经济发展的

动力与源泉。根据多年水位动态观测资料,济南地下水位及泉流量变化与大气降水密切相关^[1-2],而城

收稿日期:2020-01-02 修回日期:2020-04-07 网络出版时间:2020-04-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200417.1415.012.html>

作者简介:倪寒茜(1996—),女,江苏句容人,主要从事地下水数值模拟及开发利用研究。E-mail: nihanxi@hhu.edu.cn

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

市化进程不断推进,导致建设用地增加,不透水面积随之增加,造成降水入渗补给面积不断减少,继而严重影响了大气降水入渗补给量。大气降水入渗补给是济南岩溶水最主要的补给来源^[3],因此准确地计算和评价大气降水入渗补给量是研究水文循环规律、合理的水资源规划和实现地下水可持续利用的重要前提,对济南市保泉供水工作的顺利进行具有重要意义。

国内对大气降水入渗补给的研究较多:任永强等^[4]应用交叉相关法计算地下水位对降水的响应时间,并分析了降水入渗的时滞性;肖起模等^[5]在对降水入渗补给系数与地层进行相关分析的基础上,推求降水入渗补给量;霍思远等^[6]用 HYDRUS 软件建立一维变饱和流数值模型,模拟分析了衡水地区近 60 年在天然降水及不同灌溉条件下的降水入渗补给规律。国内外很多学者^[7-10]采用不同的方法计算大气降水入渗补给量,然而有关城市化发展对降水入渗补给影响方面的研究较少。现代遥感技术发展迅速,已越来越多地被应用到水文水资源的研究领域中^[11-13]。遥感数据因其周期短、信息量大、覆盖范围广和成本低的优势,为水文水资源研究提供了丰富的数据源^[14]。

本文在前人研究成果的基础上,采用济南市 1980、1990、2000、2018 年的卫星遥感数据,分析研究区土地利用类型变化情况,并利用数值模型识别趵突泉泉域 4 个时间段的大气降水入渗补给量,在此基础上分析济南城市化发展对降水入渗补给量的影响,为济南市城区规划提供科学参考,也为济南市保泉供水工作提供有效的数据支持。

1 研究区概况

趵突泉泉域行政区划隶属济南市,覆盖市中区、历城区、历下区、槐荫区及长清区,泉域范围(图 1)西起马山断裂,东至东坞断裂,北部以火成岩岩体和石炭、二叠系地层为界,南部以地表分水岭为界,整个研究区面积约 1 795.6 km²。

趵突泉泉域位于鲁中山地北缘,北临黄河,南依泰山。南部山区绵延起伏,标高为 500~600 m;北部是山前倾斜平原,标高为 25~50 m;北部有燕山期辉长岩体侵入^[15]。泉域发育的断裂带有东坞断裂、文化桥断裂、千佛山断裂、炒米店断裂和马山断裂。泉域内的两条主要河流为玉符河和北大沙河。

济南地下水由南部大气降水入渗补给和地表水

渗漏补给岩溶含水层后,沿地形和地层倾向自南向北流动,在山前受火成岩岩体阻挡后,岩溶水大量富集,在市区千佛山地垒内涌出地表,从而形成著名的四大泉群^[16]。



图 1 趵突泉泉域范围

Fig. 1 Location of Baotu Spring basin

济南市属于温带季风气候,受季风影响,降水年内分布不均,主要集中在 6—9 月,其降水量约占全年降水量的 70%。根据第六次全国人口普查数据,济南市的常住人口为 681.40 万人,相比于第五次全国人口普查的 592.17 万人,10 年共增加 89.23 万人,增长 15.07%,城市化水平达 64.5%^[17]。据《济南市土地利用总体规划(2006—2020 年)》,2020 年城市化水平约达 75%,随着人口增长,城市空间快速扩张,许多耕地、林地转变为建设用地^[18]。

2 趵突泉泉域地下水数值模拟

2.1 水文地质概念模型建立

2.1.1 边界条件概化

根据区域水文地质条件,将泉域边界条件^[19-21]概化如下:模型东边界为东坞断裂,其中徐家庄以北概化为侧向流入边界,以南为隔水边界;模型西边界为马山断裂,其在孙庄以北概化为侧向流入边界,以南为隔水边界;模型北部以灰岩顶板 600 m 埋深为界,南部以地表分水岭为界,两者均概化为隔水边界。

2.1.2 含水层概化

通过将收集的钻孔数据与研究区范围进行对比,共提取 368 个有效钻孔数据。根据钻孔的岩性描述及研究区水文地质条件,最终将研究区地下水系统概化为三层非均质各向异性的三维非稳定流。

第一层为孔隙含水层,为第四系全新统及上更新统地层,含水层岩性为中粗砂、砂砾石,含水层厚度 10~40 m。根据钻孔资料确定,孔隙含水层南部边界的西段为玉符河冲洪积扇首部,向东延伸至东坞断裂,其余边界与研究区边界相同。

第二层为弱透水层,为孔隙含水层以下的黏土层,厚度 5~40 m,范围与孔隙含水层一致。

第三层为岩溶含水层,该层是寒武系张夏、凤山组和奥陶纪地层,钻孔资料表明,岩溶主要发育在地表以下 600 m 深度以内,为此确定模型研究深度为 600 m 左右,岩溶含水层范围为整个研究区范围。

2.1.3 地下水均衡计算

经过分析,泉域内地下水补给来源主要有大气降水入渗补给、灌溉回归补给、河道渗漏补给、地下水侧向补给以及人工回灌补给,排泄项主要有人工开采、地下水侧向排泄以及泉排泄。由于趵突泉泉域内潜水位埋深大于 4 m,故此次模拟不考虑蒸发损失。

表 1 为趵突泉泉域 2012 年 10 月至 2013 年 9 月的水均衡计算结果,可以看出研究区总补给量为 21 700.8 万 m^3/a ,排泄量为 17 312.2 万 m^3/a ,总补给量大于总排泄量,为正均衡。

表 1 趵突泉泉域水均衡计算结果

Tab.1 Calculation result of water balance in Baotu Spring basin

分类项	分类项名称	数值/(万 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	比例/%
补给项	大气降水入渗补给 $Q_{\text{降补}}$	15 950.00	73.5
	河道渗漏补给量 $Q_{\text{河补}}$	2 638.95	12.2
	灌溉回归补给量 $Q_{\text{农补}}$	415.61	1.9
	地下水侧向补给量 $Q_{\text{径补}}$	1 816.24	8.4
	人工回灌补给 $Q_{\text{人补}}$	880.00	4.0
	补给项总计	21 700.80	100.0
排泄项	地下水侧向排泄量 $Q_{\text{径出}}$	996.27	5.7
	泉水排泄量 $Q_{\text{泉出}}$	6 903.69	39.9
	人工开采 $Q_{\text{开采}}$	9 412.24	54.4
	排泄项总计	17 312.20	100.0
均衡差		4 388.60	

2.2 数值模型建立

由折算渗透系数法及改进折算渗透系数法^[22]可知,岩溶管道中水流的 4 个分区流态用统一的流动规律表示,可使岩溶管道水流与孔隙、裂隙水流统一起来。因此,本研究可采用等效多孔介质模型模拟研究区岩溶地下水渗流问题。

Feflow 是由德国 WASY 开发的地下水流动及溶质运移模拟软件。该软件利用多维有限单元法(网格剖分)求解二维及三维的复杂孔隙-裂隙介质中地下水流、质量及热量运移控制方程,具备良好的 GIS 数据接口、优化的网格剖分技术、丰富实用的图形显示和数据结果分析工具等很多优点。

2.2.1 模拟期选择

选择 2012 年 10 月 1 日至 2013 年 9 月 30 日为模型的校正期,2013 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日为验证期。应力期长度为月,时间步长设置为 0.001 d。校正期与验证期均为一个完整的水文年,能较好地反映研究区年内的地下水动态情况。

2.2.2 网格剖分

采用 Triangle 法进行网格剖分,因为该方法网格剖分速度快,生成的有限单元网格质量好,有利于模型求解的稳定。利用该方法对研究区进行空间离散,共生成 56 964 个有限单元网格、38 796 个有限单元节点。

2.2.3 水文地质参数分区

水文地质参数是表征含水介质导水能力、储水能力和释水能力的指标^[23]。模型主要的水文地质参数为渗透系数、给水度、贮水率等,初始取值可以参考研究区钻孔岩性和抽水试验数据等。

2.2.4 源汇项

源汇项的处理:水源地开采、自备井开采、人工回灌补给按照井边界处理;泉排泄按渗流面处理;大气降水入渗补给、农业开采、灌溉回归补给三者进行叠加处理,以面状补给的形式进行赋值;河道渗漏补给按流量传输边界处理。

2.3 模型的校正与验证

模型参数的校正采用试估-校正法^[24],它属于反求参数的方法之一,通过反复调整参数,拟合同时期的流场、地下水水位动态变化过程,使模型尽可能符合研究区实际的水文地质条件。

经过多次调参拟合,得到孔隙含水层、弱透水层、岩溶含水层的水文地质参数分区,见图 2。孔隙水仅在研究区北部有赋存(图 2(a)),1 区、2 区水平渗透系数取值分别为 15、10 m/d,垂直渗透系数取值分别为 1.5、1 m/d,给水度分别取值 0.05、0.01;弱透水层的垂直渗透系数从 1 区至 5 区分别取值 0.3、0.01、0.1、0.04、0.01 m/d(图 2(b));岩溶含水层的参数分区及取值见图 2(c)及表 2。



图2 水文地质参数分区

Fig. 2 Hydrogeological parameter division

表2 岩溶含水层水文地质参数分区

Tab. 2 Division of hydrogeological parameter of karst aquifer

分区编号	水平渗透系数 $K_h/(m \cdot d^{-1})$	垂直渗透系数 $K_v/(m \cdot d^{-1})$	给水度/ 贮水率
1	50.0	5.00	0.000 10
2	5.0	0.50	0.000 10
3	0.1	0.01	0.000 10
4	100.0	10.00	0.000 50
5	50.0	5.00	0.100 00
6	30.0	3.00	0.006 00
7	5.0	0.50	0.050 00
8	50.0	5.00	0.000 01
9	0.1	0.01	0.000 10
10	10.0	1.00	0.100 00
11	0.1	0.01	0.020 00

拟合效果可以通过观测井拟合曲线来反应,图3、4分别为典型观测井(趵突泉、S-8、S-82A、53A)校正期和验证期内水位动态拟合曲线。在一般情况下,观测井地下水位的观测值与计算值的拟合误差应小于拟合计算期内水位变化幅度的10%。水位变化幅度较小($<5\text{ m}$)时,水位拟合误差应小于 0.5 m ^[25]。由图3、4可知,观测点处模型计算值与观测值拟合良好,模拟结果合理,基本反映了研究区的水文地质条件,可利用校正与验证后的数值模型开展不同场景下地下水动态预测及地下水资源评价。

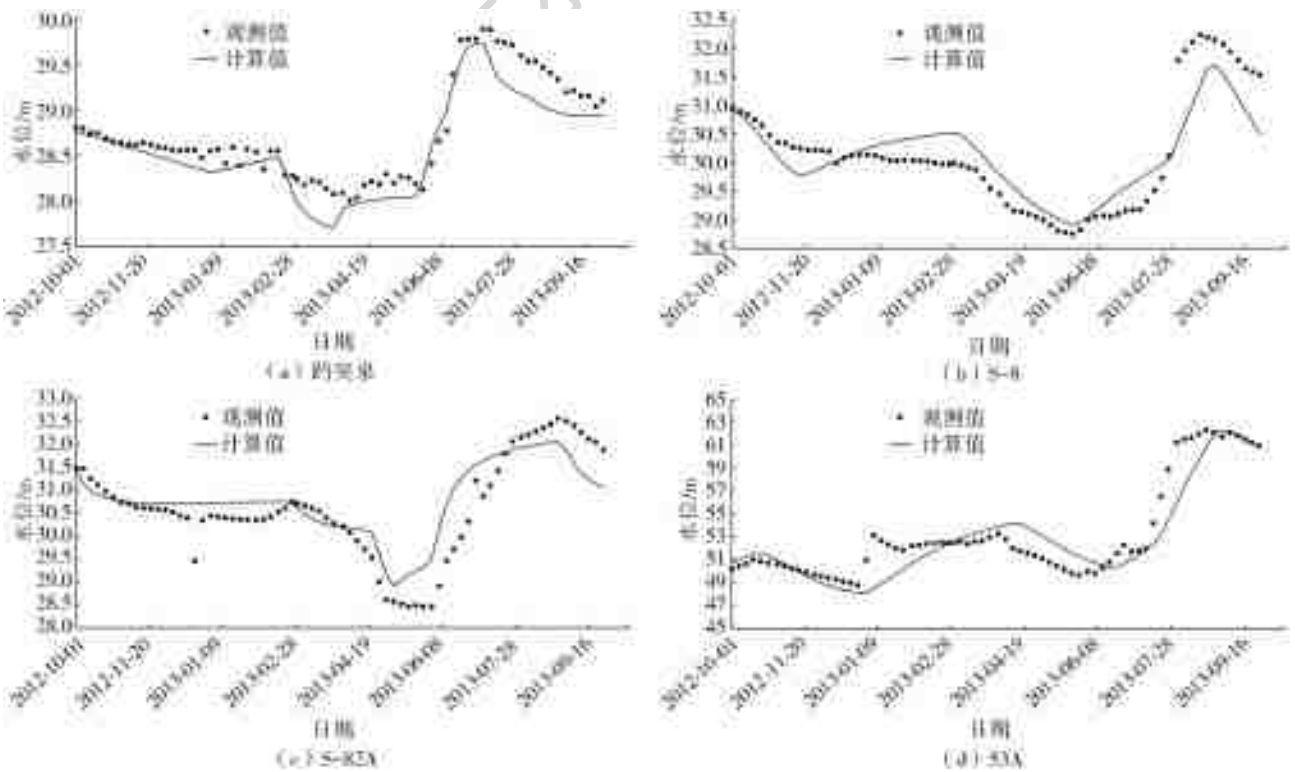


图3 典型观测井校正期水位拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of groundwater level for typical observation wells in calibration period

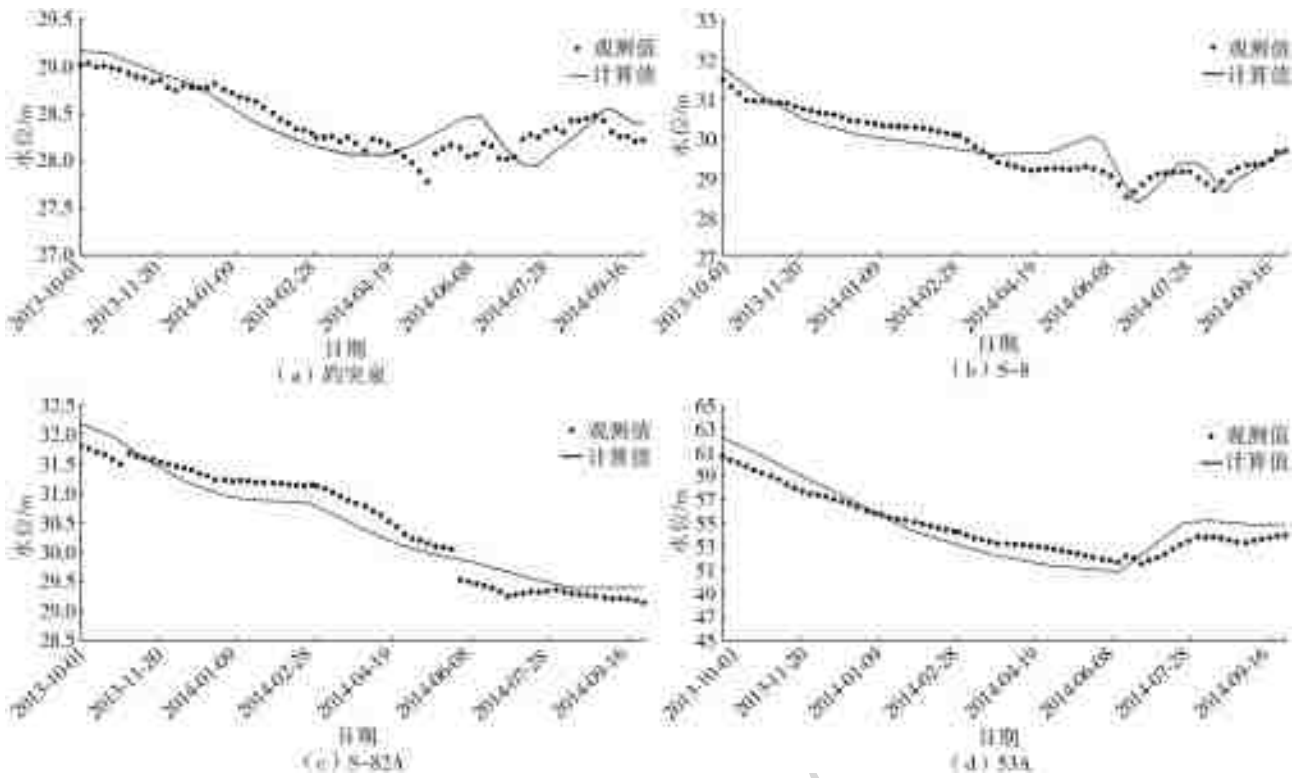


图 4 典型观测井验证期水位拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of groundwater level for typical observation wells in validation period

3 大气降水入渗补给量计算

本次研究首先将基于降水入渗系数法计算得出的降水入渗补给量与利用数值模型识别得出的降水入渗补给量进行对比,以验证和评价模拟结果的可靠性。

3.1 模型识别结果

从地下水系统的观点来看,地下水补给可以当作系统的边界条件,但在 Feflow 中将其作为介质特征来处理,介质特征不同于过程变量与边界条件的处理,不是对节点赋值,而是对单元赋值。将趵突泉泉域大气降水入渗补给量在大气降水入渗补给系数分区的基础上进行分区,并与其他面状补给项进行叠加处理,利用 Feflow 中 In/outflow on top/bottom 模块进行赋值。

时间上考虑了降水的动态变化,根据收集到的研究区逐日降水资料,将数据处理为具有时间序列的文件输入模型。

在不改变模型其他条件的情况下,仅改变不同不透水面积下的降水入渗补给系数分区,运行模型即可在 budget 面板得到经 Feflow 识别的研究区不同时段的大气降水入渗补给量。

3.2 模型识别结果与降水入渗系数法比较

大气降水入渗补给量计算公式^[26]为

$$Q_{\text{降}} = 10^{-3} \cdot P \cdot \alpha \cdot F \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{降}}$ 为大气降水入渗补给量, m^3 ; P 为年降水量, mm ; α 为降水入渗补给系数; F 为补给区面积, km^2 。

分析多个雨量站降水数据可知,2012 年 10 月至 2013 年 9 月期间降水量为 755.8 mm,有效降雨采用 80% 计算。根据入渗补给区岩性不同及济南保泉勘探报告,选取不同的入渗系数(表 3)。

表 3 大气降水入渗补给系数分区

Tab. 3 Coefficients of atmospheric precipitation infiltration

分区编号	面积/ km^2	大气降水入渗补给系数	备注
1	256.9	0.300	第四系
2	282.4	0.060	城区
3	198.1	0.450	奥陶系
4	328.7	0.010	寒武纪崮山、长山组
5	209.7	0.330	寒武纪张夏组
6	519.2	0.001	泰山群
合计	1 795.0		

在不改变降水量的条件下,利用公式(1)计算不同时期降水入渗补给量。

上述两种方法的计算结果见表 4。与降水入渗系数法相比,模型识别结果较低,两者相对误差小于 1%,由此可见,通过 Feflow 模型识别得到的大气降水入渗补给量结果合理可靠。

表 4 大气降水入渗补给量计算结果

Tab. 4 Calculation result of atmospheric precipitation infiltration recharge

年份	不透水面积/km ²	不透水面积增长率/%	模型识别值/万 m ³	降水入渗系数法计算值/万 m ³	相对误差/%
1980	78.90		18 471	18 637	0.9
1990	80.37	1.86	18 458	18 602	0.8
2000	118.92	47.97	17 938	18 088	0.8
2018	332.05	179.22	15 313	15 455	0.9

4 城市化对大气降水入渗补给量的影响

4.1 基于城市化的不透水面积变化

20 世纪 90 年代以来,济南城市化进程加快,耕

地和林地面积大幅减少,反之建设用地面积大幅增加。选用 1980、1990、2000、2018 年 4 个时段的遥感影像数据,利用 ArcGIS 软件进行数据处理,绘制 4 个时段的土地利用类型图(图 5)。

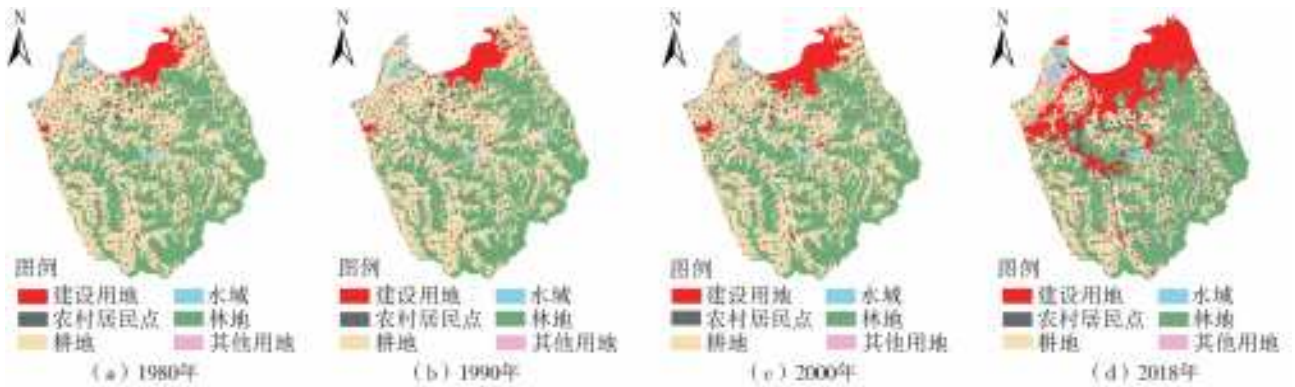


图 5 趵突泉泉域 1980、1990、2000、2018 年土地利用类型

Fig. 5 Land-use type of Baotu Spring basin in 1980, 1990, 2000, 2018

由图 5 及表 5、表 6 可知:1980、1990 年建设用地面积分别为 78.90、80.37 km²,仅占研究区总面积的 4.5%;2000 年建设用地面积增加至 118.92 km²,占研究区总面积 6.6%;到 2018 年,建设用地面积持续增加至 332.05 km²,占研究区总面积的 18.5%;2000 年建设用地面积较 1990 年增加了 38.55 km²,增幅为 47.97%,而 2018 年建设用地面积增加了 213.13 km²,增幅高达 179.22%,且在 2000—2018 年,耕地面积减少了 239.72 km²,降幅达到 28.3%,可见在此阶段建设用地扩张剧

烈,侵占了大量的耕地,使耕地锐减;建设用地演变规律为从城区由东到西,再向西北郊区和南部山区发展,建设用地主要由耕地转变,其次为林地,耕地主要从城区的西南部、东北部逐渐转变为建设用地,而林地主要从南部山区转变为建设用地。

在 1980 至 2018 年的近 40 年里,城市化面积增加了 253.15 km²,增幅近 320%。建设用地面积的增加必然导致不透水地面面积的增大,降水入渗补给面积减少,进而直接影响大气降水入渗补给量。

表 5 趵突泉泉域土地利用多年变化情况

Tab. 5 Land-use of Baotu Spring basin in different years

单位:km²

年份	建设用地	林地	耕地	水域	农村居民点	其他用地	总计
1980	78.90	709.63	872.15	35.57	97.54	1.76	1 795.55
1990	80.37	708.93	872.55	34.12	98.31	1.27	1 795.55
2000	118.92	708.84	845.84	29.14	91.54	1.27	1 795.55
2018	332.05	665.05	606.12	33.91	146.30	12.12	1 795.55

表 6 趵突泉泉域不同时段土地利用变化情况

Tab. 6 Land-use change of Baotu Spring basin in different periods

单位:km²

时段	建设用地	林地	耕地	水域	农村居民点	其他用地
1980—1990	1.47	-0.70	0.40	-1.45	0.77	-0.49
1991—2000	38.55	-0.09	-26.71	-4.98	-6.77	0
2001—2018	213.13	-43.79	-239.72	4.77	54.76	10.85

4.2 不透水面积变化对大气降水入渗补给量的影响

大气降水入渗补给量变化情况见表 7。由表 7 可知,趵突泉泉域 1980、1990、2000、2018 年大气降水入渗补给量分别为 18 471 万、18 458 万、17 938 万、15 313 万 m^3 。1980—2018 年,随着城市化水平不断提高,大气降水入渗补给量降低的幅度也越来越大。

表 7 大气降水入渗补给量变化情况
Tab. 7 Change of atmospheric precipitation infiltration recharge

年份	不透水面积/ km^2	不透水面积变化量/ km^2	大气降水入渗补给量/万 m^3	大气降水入渗补给变化量/万 m^3
1980	78.90		18 471	
1990	80.37	1.47	18 449	-22
2000	118.92	38.55	17 928	-521
2018	332.05	213.13	15 303	-2 625

由此可以看出,降水入渗补给量与不透水面积关系密切。随着城市化进程中建设用地扩增,土地利用类型发生巨大变化,建设用地的增加导致区域内不透水地面不断增多,植被覆盖区及其他用地则呈减小趋势,城市化使得降水大部分成为地表径流,致使降水入渗补给量减少。

5 结论

科学准确地计算大气降水入渗补给量是评价地下水资源的关键和基础。本文应用遥感数据,基于 Feflow 软件研究分析城市化发展对趵突泉泉域大气降水入渗补给量的影响,得出以下结论。

(1) 济南城市化使其土地利用类型发生较大改变。1980—2018 年,研究区耕地和林地面积大幅减少,而建设用地面积大幅增加,尤其是 2000—2018 年,建设用地面积增加了 213.13 km^2 ,增幅高达 179.2%;建设用地演变规律为从城区由东到西,再向西北郊区和南部山区发展,建设用地主要由耕地转变,其次为林地。

(2) 城市化发展对大气降水入渗补给的影响较大。城市化发展引起的土地利用类型改变、不透水面积增加导致 1980—2018 年趵突泉泉域大气降水入渗补给量减少了 3 167 万 m^3 。1980—1990、1991—2000、2001—2018 年 3 个时段降水入渗补给量分别减少了 22 万、521 万、2 625 万 m^3 ,随着城市化进程的加快,大气降水入渗补给量的减少幅度越来越大。

该研究结果表明,城市化引起的不透水面积增加对大气降水入渗补给量的影响较大,城市化对地下水补给的负面影响引起足够的重视,需要进一步优化城市化进程中的土地资源配

置,以保证泉域有良好的降水入渗补给条件,从而使城市化发展对泉水喷涌的影响降到最低。

参考文献:

- [1] 奚德荫,孙斌,秦品瑞. 济南泉水研究[M]. 济南:济南出版社,2017.
- [2] 王庆兵,段秀铭,高赞东,等. 济南岩溶泉域地下水流模拟[J]. 水文地质工程地质,2009,36(5):53-60. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2009.05.013.
- [3] 迟光耀,邢立亭,主恒祥,等. 大气降水与济南泉水动态变化的定量关系研究[J]. 地下水,2017,39(1):8-11. DOI:10.3969/j.issn.1004-1184.2017.01.002.
- [4] 任永强,宫辉力,潘云. 北京怀柔应急地下水源地降水入渗补给时滞性分析[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(6):93-96,136. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.06093.
- [5] 肖起模,邹连文,刘江. 降水入渗补给系数与地层的相关分析与应用[J]. 水利学报,1998(10):33-36. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.1998.10.007.
- [6] 霍思远,靳孟贵. 不同降水及灌溉条件下的地下水入渗补给规律[J]. 水文地质工程地质,2015,42(5):6-13,21. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.05.02.
- [7] TONKUL S, BABA A, ŞİMŞEK C, et al. Groundwater recharge estimation using HYDRUS 1D model in Alaşehir sub-basin of Gediz basin in Turkey[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(10): 610. DOI:10.1007/s10661-019-7792-6.
- [8] MARCIA S B, MARIA C B, BORIS F, et al. Effect of temporal averaging of meteorological data on predictions of groundwater recharge[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2018, 66(2): 143-152. DOI: 10.1515/johh-2017-0051.

(下转第 147 页)

- Occurrence pattern, spatiotemporal distribution and environmental risks[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 618(15): 409-418.
- [20] 陈卫平,彭程伟,杨阳,等.北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5074-5080. DOI: 10.13227/j. hjkx. 201704287.
- [21] 刘娜. 典型 PPCPs 繁殖毒性效应与水生态风险评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [22] 胡洪营,王超,郭美婷. 药品和个人护理用品(PPCPs)对环境的污染现状与研究进展[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 947-952. DOI: 10.1007/s10971-005-6694-y.
- [23] LIANG X X, JUNAID M, WANG Z F, et al. Spatio-temporal distribution, source apportionment and ecological risk assessment of PBDEs and PAHs in the Guanlan River from rapidly urbanizing areas of Shenzhen, China. [J]. *Environmental Pollution*, 2019 (250): 695-707. DOI: 10.1016/j. envpol. 2019. 04. 107
- [24] HERNANDO M. D., MEZCUA M., FERNANDEZ-ALBA A. R., et al. Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments[J]. *Talanta*, 2006, 69(2): 334-342.
- [25] 周爱霞. 潜水中磺胺抗生素迁移转化机理及修复技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [26] 童蕾,姚琳琳,刘慧,等. 抗生素在地下水系统中的环境行为及生态效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(2): 27-36. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20151127002.
- [27] 王鑫,李炳华,黄俊雄,等. 再生水及地下水 EDCs 和 PPCPs 污染特征分析与生态风险评估[J]. *北京水务*, 2019(6): 1-5. DOI: 10.19671/j.1673-4637.2019.06.001.
-
- (上接第 70 页)
- [9] 尹德超,罗明明,张亮,等. 基于流量衰减分析的次降水入渗补给系数计算方法[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(3): 11-16. DOI: 10.16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2016. 03. 03.
- [10] 孟素花,费宇红,张兆吉,等. 50 年来华北平原降水入渗补给量时空分布特征研究[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(8): 923-929. DOI: 10.11867/j. issn. 1001-8166. 2013. 08. 0923.
- [11] 杜军凯. 考虑垂直地带性的山区分布式水文模拟与应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [12] 谈英武,崔荃,曹海涛. 遥感技术在水北调西线工程中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2006, 4(1): 15-18, 22. DOI: 10.13476/j. cnki. nsbdqk. 2006. 01. 005.
- [13] 魏玲娜,陈喜,王文,等. 基于水文模型与遥感信息的植被变化水文响应分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(6): 18-28. DOI: 10.13928/j. cnki. wrahe. 2019. 06. 003.
- [14] 张文明,董增川,钱蔚,等. 遥感技术在水文水资源领域中的应用研究进展[J]. *节水灌溉*, 2007(8): 24-28, 32. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-4929. 2007. 08. 010.
- [15] 孙斌,彭玉明. 济南泉域边界条件、水循环特征及水环境问题[J]. *中国岩溶*, 2014, 33(3): 272-279. DOI: 10.11932/zgyr20140302.
- [16] 陈振鹏. 济南保泉供水研究[J]. *中国岩溶*, 1985(21): 28-36.
- [17] 山东省统计局. 山东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [18] 刘金花,岳兴玲,张庆业. 济南市土地利用景观格局时空变化研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2013, 28(4): 335-340. DOI: CNKI; SUN; SDJG. 0. 2013-04-013.
- [19] 孙斌,彭玉明,李常锁,等. 济南岩溶水系统划分及典型泉域水力联系[J]. *山东国土资源*, 2016, 32(10): 31-34, 38. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-6979. 2016. 10. 007.
- [20] 商广宇,王建军. 有的放矢 科学保泉: 济南泉域边界条件论证[J]. *地下水*, 2002(4): 191-194, 223. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-1184. 2002. 04. 001.
- [21] 董咏梅,苏光星,李占华. 从济西抽水试验探济南泉域西边界[J]. *水资源保护*, 2004(3): 58-59. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-6933. 2004. 03. 019.
- [22] 赵坚,赖苗,沈振中. 适于岩溶地区渗流场计算的改进折算渗透系数法和变渗透系数法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005(8): 1341-1347. DOI: CNKI; SUN; YS-LX. 0. 2005-08-015.
- [23] 王大纯,张人权. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [24] 李全友,任印国,程忠良. 地下水数值模拟模型识别和验证方法与标准[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(A02): 30-31.
- [25] 韩再生. 地下水资源数值法计算技术要求: 行业标准介绍[J]. *水文地质工程地质*, 1999(4): 49-52. DOI: 10.16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 1999. 04. 013.
- [26] 束龙仓,陶月赞. 地下水水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.