

干旱地区河槽暗蓄雨洪资源化利用模拟

潘俊¹,滕炳麓^{1,2,3}

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098;3. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 目的 研究利用雨洪资源解决干旱地区用水短缺问题,提出利用河槽暗蓄收集雨洪最佳工程方案,为该工程的设计提供参考。**方法** 应用 Visual Modflow 软件模拟研究辽西喀左地区内第二牯牛河流域中不同调蓄方案和拦蓄入渗方案对河槽暗蓄雨洪资源化的影响。**结果** 通过不同调蓄方案的对比,采用可调控悬挂截渗坝代替现有截渗坝时,雨洪资源利用率可提高至 20.3%;通过不同拦蓄入渗方案的对比,“不清河床+坑塘+拦水堰”方案的雨洪资源入渗量为天然条件下雨洪资源入渗量 100 倍以上。**结论** 河槽暗蓄雨洪资源化工程最佳的拦蓄入渗和调蓄组合方案为在“不清河床+坑塘+拦水堰”的情况下采用可调控悬挂截渗坝,可显著提高雨洪资源利用率。

关键词 雨洪资源;多情景模拟;河槽暗蓄;调蓄方案;拦蓄入渗方案

中图分类号 TU991.11;TV873+.1

文献标志码 A

引用格式:潘俊,滕炳麓. 干旱地区河槽暗蓄雨洪资源化利用模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):945-951. (PAN Jun, TENG Binglu. Simulation of stormwater reclamation in underground water storage space of river channel in arid area [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024,40(5):945-951.)

Simulation of Stormwater Reclamation in Underground Water Storage Space of River Channel in Arid Area

PAN Jun¹, TENG Binglu^{1,2,3}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Key Laboratory of Integrated Management of Shallow Lakes and Resource Development, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, China, 210098; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing, China, 210098)

Abstract: This paper was proposed to study the use of rainwater resources to solve the problem of water shortage in arid areas, and to propose the use of river channel concealed storage to collect rainwater, and to find out the working conditions, so as to provide a reference for the design of this kind of project. Visual Modflow software was applied to simulate and study the effects of different regulation schemes and detention and infiltration schemes on rainwater resources collection by river

收稿日期:2022-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51908377)

作者简介:潘俊(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事水资源配置与应用等方面研究。

channel dark storage in the second downstream oxbows river basin within the Kazuo area of Liaoxi. The rainwater resource utilization rate can be increased to 20.3% when the existing check dam is replaced by an adjustable suspension check dam by comparing different storage schemes; the rainwater resource infiltration amount of the "unclean riverbed + pit pond + check weir" scheme is more than 100 times of that of the natural condition by comparing different storage and infiltration schemes. The infiltration volume of rainwater resources is more than 100 times that of rainwater resources under natural conditions. The best combination of storage and infiltration and storage in the river channel dark storage rainwater resource project is the use of adjustable suspension interception dams in the case of "unclear riverbed + pit ponds + interception weir", which can significantly improve the utilization rate of rainwater resources.

Key words: resource utilization of storm water; multi-scenario simulation; underground water storage space of river channel; regulation and storage schemes; retention and infiltration schemes

河槽雨洪资源暗蓄是指在丰水期利用工程或非工程措施将河道雨洪水收集起来蓄存到河道下及两侧地下储水空间的过程^[1]。姚旭初等^[2]利用数值模型对北京市“密怀顺”地区地下水的回灌规模和调蓄能力进行计算,为河槽暗蓄建设提供了依据。李凤丽等^[3]利用 Visual Modflow 软件模拟出河道拦蓄的最佳工程方案,提高了地表水及雨洪资源的利用率。孙思雨等^[4]建立了盘锦市城区雨水收集利用的综合系统,但仍存在雨洪利用率过低的问题。F. H. Li 等^[5]采用数学方法计算分析了石家庄市暴雨洪水资源利用的潜力,提出雨水资源化利用方案。C. F. Huang 等^[6]采用因子分析法对缺水城市的缺水程度进行评价,揭示了雨洪利用在缺水型城市的重要性。S. B. Lu 等^[7]对水库雨水水质处理和水库防洪水位动态控制进行了研究,弥补了水库雨洪资源利用研究的空缺。E. S. Vasil'eva 等^[8]应用 STREAM 2D CUDA 软件建立山区河流水库水域、大坝和从大坝到河口下游河段的模型,对暴雨洪水进行数值模拟,证明了雨洪资源利用在山区的重要性。C. X. Kang 等^[9]以新城为例研究雨洪水利用,通过自然与人工方案相结合,为新城区生态宜居建设提供新思路。Visual Modflow 是被公认的地下水流和溶质运移模拟软件系统^[10-12]。H. A. E. Rahman 等^[13]根据西奈半岛的水文地质和降雨资料模拟计算

了地下水资源储量及地下水开发潜力。Y. H. Dong 等^[14]基于 Modflow 软件模拟区域分布的降水补给、农业排放和灌溉入渗补给,提出了一种模拟区域地下水补给和排泄的简单而有效的方法。R. B. Thoms 等^[15]运用 Modflow 模型分析地下水和地表水相互作用的能力受季节所影响的程度,证明了该模型在水文调查中的实用性。C. Serrano-Hidalgo 等^[16]通过模拟自然公园地表水与地下水的交互关系,弥补了区域含水层与小型流域之间的关系没有被考虑的问题。通过工程手段拦蓄雨洪水,形成雨洪水-地表水-地下水的循环系统,用以补给地表及地下储水,可实现干旱地区水资源优化配置。河槽暗蓄雨洪化工程建造方案多种多样,主要有调蓄工程、拦蓄入渗工程及开采工程组成。综上所述,笔者利用 Visual Modflow 软件建立数值分析模型,对辽西喀左地区进行河槽暗蓄雨洪资源化研究,结合模拟区水文地质特征,建立五种不同拦蓄入渗工程和调蓄工程模拟工况,选出最佳方案。

1 研究概况

模拟区域位于辽宁省西部的喀左县,为严重缺水地区。降雨主要集中在夏季和秋季,降水量占全年的 93.8%。第二牐牛河全长约 52 km,流域面积为 1 092 km²,年蒸发量为 2 480 mm。流经喀左县的第二牐牛河

下游公营子河段上,以山间河谷特征为主,全长约4.2 km,河谷宽0.6~1.9 km,比降约为5‰;河道上现有截渗坝,截渗坝处最窄,向上游渐宽。枯水期水流通过路下暗管穿过,雨季发生洪水时,均通过路面流向下游。河槽暗蓄雨洪工程可拦蓄地表雨洪资源,使其渗入河床地下含水层中储存。模拟区主要供水对象为大型工业园区、屠宰场和食品加工厂,年平均需水量为260万m³。

通过滑动最小值法将河道径流量分割成河川基流量和雨洪资源量两个部分计算,运用典型年法对每个月基流量和雨洪资源量进行计算,可以得出各年雨洪资源量基本在500万m³以上^[17],表明模拟区具有充足的雨洪资源,合理利用可满足当地用水需求(见图1)。

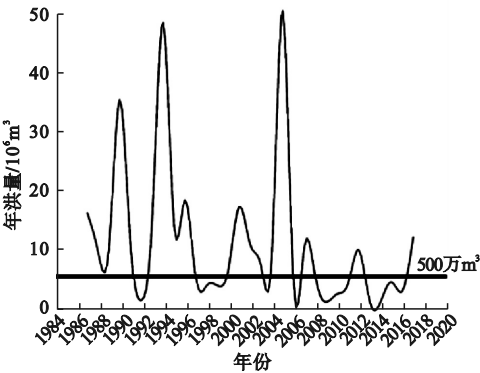


图1 模拟区历年洪量特征曲线

Fig. 1 Flood volume characteristic curve of the study area over the years

2 模型建立

2.1 模拟研究区确定

模拟区范围如图2所示。

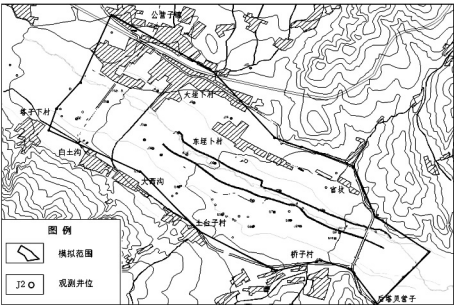


图2 模拟区范围图

Fig. 2 The map of simulated area

模拟区水文地质模型概化:

①含水层内部结构。将含水层概化为单一潜水含水层,将上更新统地层底板作为含水层底板。根据含水层的类型、岩性、厚度、导水特征等将模型概化为非均质各向同性含水层,局部可视为均质。

②含水层的水力特征。受枯水期和丰水期补给水量波动的影响,模拟区的地下水位存在上下波动,但在短时间内,总体区域的地下水流视为非稳定二维平面流,按层流运动进行模拟计算。

③模拟区边界。将模拟区边界处理为已知水位边界,个别边界点水位利用2020年不同月份的地下水位等值线图插值得出。

④源汇项。模拟区源项主要为大气降水入渗补给和河流入渗补给,汇项主要有蒸发排泄、农业用水开采、工业用水开采、地下水补给河流^[18-19]。

2.2 数学模型求解

地下水流数值模型采用有限差分法求解,利用 Visaul Moldflow 软件计算,根据区内流场特征、系统的结构特征、水力特征及边界条件,将全区划分为450行,450列,网格总数为202 500个。模拟计算中,应力期为30 d,计算时段为1 d,计算时间为2020年1月16日—2021年9月30日,以2020年1月16日实际观测到的地下水位作为初始水位。依据模拟区含水层结构、分布情况、渗水试验和抽水试验计算等水文地质参数将模拟区划分为6个参数区,I区为含水层底板埋深较浅区,II区为含水层底板埋深增大区,III区为两侧靠近边界附近的阶地区,IV区为上游阶地区,V区为截渗坝下游,VI区为截渗坝。模型水文地质参数分区及初值如表1所示,参数分区图及边界点水位变化如图3所示。模拟区边界处理为一类水头边界。模拟计算的边界充分利用已有观测井(J18、J22、BK5、BK6、J23、J29、G3、ZK5、G1、BK9)和其它观测井(B1、B2、B5、B6、B7、B8、B9、B10)

的水位通过地下水位等值线插值获得,以新建观测井地下水位进行验证。

表1 水文地质参数分区初值统计表

Table 1 The statistics table of initial value for hydrogeological parameters in division

| 分区编号 | 渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$) | 给水度 | 孔隙度 |
|------|---------------------------------------|------|------|
| I | 100 | 0.18 | 0.50 |
| II | 135 | 0.30 | 0.30 |
| III | 60 | 0.25 | 0.28 |
| IV | 40 | 0.15 | 0.18 |
| V | 90 | 0.10 | 0.08 |
| VI | 1 | 0.20 | 0.30 |

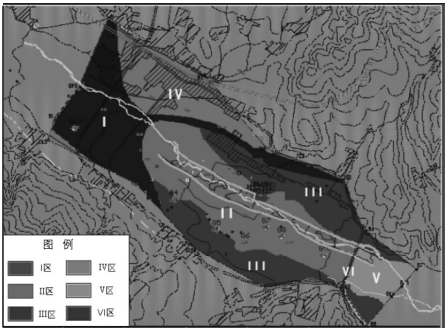


图3 参数分区图

Fig.3 The simulation area in division

2.3 模型校正

2.3.1 参数识别

选择2020年3月22日、5月11日和6月27日作为模型识别时段,根据现场勘测资料和各观测点的初始水位与水位变化情况,对模型进行调参,最终水文地质参数如表2所示。

表2 模型调参后水文地质参数统计表

Table 2 The statistical table of hydrogeological parameters after model adjustment

| 分区编号 | 渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$) | 给水度 | 有效孔隙度 |
|------|---------------------------------------|------|-------|
| I | 130 | 0.15 | 0.50 |
| II | 135 | 0.28 | 0.33 |
| III | 80 | 0.20 | 0.28 |
| IV | 30 | 0.15 | 0.18 |
| V | 90 | 0.25 | 0.30 |
| VI | 6 | 0.10 | 0.08 |

2.3.2 模型验证

利用识别后的模型模拟计算,选择2020年4月22日和8月22日作为验证时段,将计算水位值与实测水位值进行对比,绘制反映水力梯度变化的等水位线,如图4和图5所示。可以看出,计算地下水位与实测地下水位的等值线比较一致,模拟方法可行。

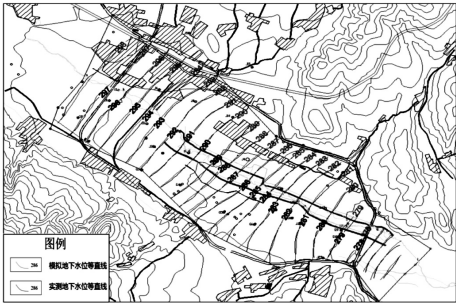


图4 4月计算与实测地下水位等值线对比图

Fig.4 The isolines comparison of calculated and measured groundwater level in April

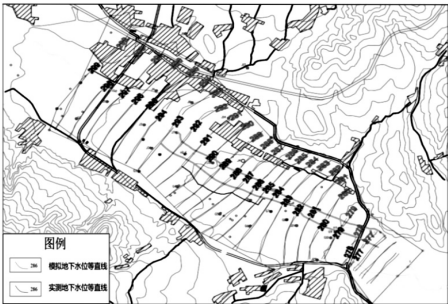


图5 8月计算与实测地下水位等值线对比图

Fig.5 The isolines comparison of calculated and measured groundwater level in August

选取具有代表性观测井 G1, G3, J18, BK5 水位观测曲线图进行对比,曲线拟合的相对误差小于时段水位变幅的5%,因此模型有效。

3 模拟计算

结合模拟区水文地质特征,分别对丰水典型年、平水典型年、枯水典型年下的不同入渗方案及调蓄方案进行数值模拟,分析计算不同拦蓄入渗方案和调蓄方案的雨洪年利用率,确定最佳方案。

3.1 方案设计

3.1.1 拦蓄入渗方案

雨洪具有短时、流量大的特点,以其作为补给源需在较短时间内将其入渗至地下含水层中。模拟区表层为岩土层,入渗条件较差,不能满足雨洪入渗要求,因此设计如下拦蓄入渗方案。方案 I:天然条件(不清理河床);方案 II:只清理河床;方案 III:不清理河床+坑塘;方案 IV:拦水堰+不清理河床+坑塘;方案 V:清理河床+拦水堰。

3.1.2 调蓄方案

为了使汛期的雨洪水有充足的有效储水空间,拟通过降低模拟区汛前地下水位的的方式,根据需求进行蓄放水,达到调蓄地下水的目的。设计对截渗坝进行调蓄改造的方案,方案一:不改造截渗坝;方案二:在截渗坝部位修建闸门,闸底下卧 0.5 m;方案三:在截渗坝部位修建闸门,闸底下卧 1.0 m;方案四:在截渗坝部位修建闸门,闸底下卧 2.0 m;方案五:采用可控悬挂截渗坝。

3.2 拦蓄入渗方案模拟计算

为排除干扰,假定含水层厚度无限大,地下水位较低,模拟区有充足的雨洪资源有效储存空间,使地下储水空间不对雨洪资源的人渗产生影响。在水文地质模型中将雨洪资源入渗概化为注水井入渗,并分别对不同雨洪资源年进行模拟计算。各入渗方案的年入渗量计算结果如表 3 所示,模拟结果如图 6 所示。

表 3 不同拦蓄入渗方案条件下雨洪年入渗量模拟计算结果

| Table 3 The simulation results of rainfall flood infiltration under different storage | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----|--------------------------------|
| infiltration schemes | | | 10 ⁴ m ³ |
| 方案编号 | 不同雨洪资源年 | | |
| | 丰水年 | 平水年 | 偏枯年 |
| I | 7.0 | 5.6 | 3.5 |
| II | 899 | 719 | 450 |
| III | 398 | 318 | 199 |
| IV | 678 | 542 | 339 |
| V | 1 053 | 842 | 527 |

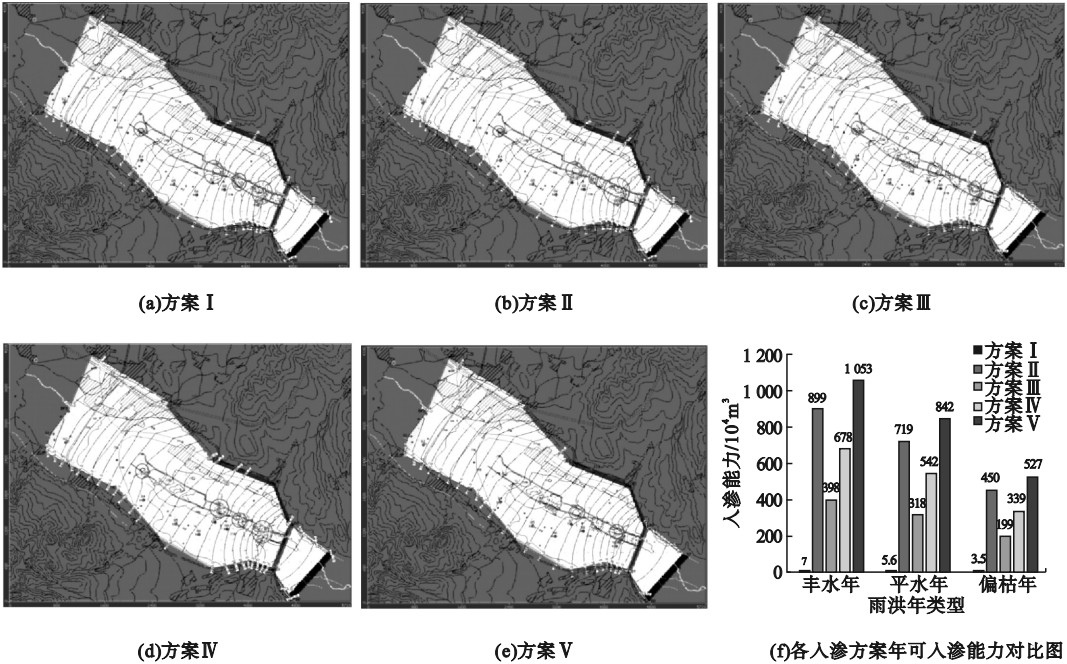


图 6 拦蓄入渗方案模拟结果

Fig. 6 The simulation results of storage infiltration scheme

3.3 调蓄方案模拟计算

在不开采地下水的条件下,通过在截渗坝溢流口处设计不同的闸门方式来设计不同调蓄方案来控制有效储水空间。不同调蓄方案下有效储水空间的大小通过模拟预测的地下水位以上非饱和带的容积计算得出。由于地层的入渗能力足够大,入渗量体现了各方案的调蓄水空间,不开采地下水条件下各方案,所提供的调蓄空间大小对比如表4所示模拟结果如图7所示。

表4 不同调蓄方案条件下雨洪资源利用率

Table 4 The utilization rate of rain flood resources under different regulation and storage schemes

| 方案编号 | 调蓄空间/(10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹) | 利用率/% |
|------|---------------------------------------------------------|-------|
| 一 | 16 | 1.6 |
| 二 | 60 | 6.0 |
| 三 | 143 | 14.3 |
| 四 | 192 | 19.2 |
| 五 | 209 | 20.9 |

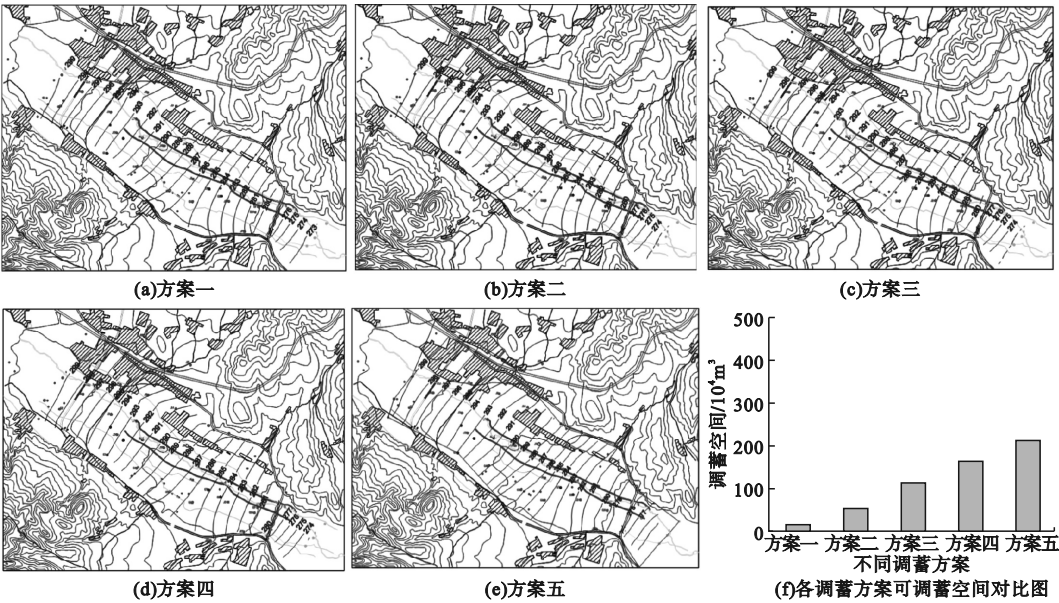


图7 各调蓄方案模拟结果

Fig. 7 The simulation results of each storage and regulation scheme

4 结 论

(1)拦蓄入渗方案中“拦水堰+不清理河床+坑塘”和“清理河床+拦水堰”两种方案均能保证较高的雨洪入渗量;“截渗坝闸底下卧2 m”和“可调控悬挂截渗坝”两种调蓄方案的雨洪资源利用率可达20%左右。

(2)模拟区需水量为260万 m³/a,考虑到生态环境保护、维护难度、及后期维护费用等因素,提出河槽暗蓄雨洪资源化工程最佳的拦蓄入渗和调蓄组合方案,即在“不清河床+坑塘+拦水堰”的情况下采用“可调控

悬挂截渗坝”,可最大限度保证模拟区河槽暗蓄对雨洪资源充分利用。

参考文献

[1] 李璇,束龙仓,鲁程鹏,等.石川河地下水库建库条件分析及地下水位动态预测[J].水资源保护,2017,33(3):13-18.
(LI Xuan, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Analysis of groundwater reservoir construction conditions and prediction of groundwater level variation in Shichuan river groundwater reservoir [J]. Water resources protection, 2017,33(3):13-18.)

[2] 姚旭初,柴福鑫,袁鸿鹄,等.地下水库库容和调蓄能力计算方法研究[J].水利水电技术,2019,50(增刊1):112-116.
(YAO Xuchu, CHAI Fuxin, YUAN Honghu,

- et al. A calculation method of regulation and storage capacity of underground reservoir [J]. Water resources and hydropower engineering, 2019, 50(S1):112–116.)
- [3] 李凤丽,徐嘉璐,张游,等. 母猪河地下水库数值模拟和调蓄分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(11):204–209.
(LI Fengli, XU Jialu, ZHANG You, et al. Research on the numerical simulation and regulation analysis of groundwater reservoir in Muzhu river [J]. China rural water and hydropower, 2020(11):204–209.)
- [4] 孙思雨. 海绵城市建设理念下盘锦市中心城区雨水资源综合利用研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2017.
(SUN Siyu. Research on comprehensive utilization of rainwater resources in the central city of Panjin under the concept of sponge city construction [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [5] FANGHONG L, AIFANG G, DUO L. Utilization efficiency and potential analysis of urban storm flood resources [J]. Energy procedia, 2012, 16:1283–1287.
- [6] HUANG C F, ZHOU J. Strategic research on urban stormwater resource utilization in the resource water shortage cities-base on stormwater data of 58 resource water shortage cities [J]. Advanced materials research, 2013, 777:380–385.
- [7] LU S, SUN H, SUN D, et al. Assessment on reservoir flood resources utilization of Ankang reservoir, China [J]. Resources policy, 2020, 68:101745.
- [8] VASIL'EVA E S, BELYAKOVA P A, ALEKSYUK A I, et al. Simulating flash floods in small rivers of the northern Caucasus with the use of data of automated hydrometeorological network [J]. Water resources, 2021, 48(2):182–193.
- [9] KANG C, LU Q, ZHANG Z, et al. Study on the construction mode of ecological and sustainable rain flood in new urban area of China [C]//E3S web of conferences. EDP sciences, 2019, 101:01002.
- [10] JAWORSKA-SZULC B. Groundwater flow modelling of multi-aquifer systems for regional resources evaluation: the Gdansk hydrogeological system, Poland [J]. Hydrogeology journal, 2009, 17(6):1521–1542.
- [11] ROSHAN S, KAORU T, YASUTO T, et al. Water resources assessment in a poorly gauged mountainous catchment using a geographical information system and remote sensing [J]. Hydrological processes, 2004, 18(16):3061–3079.
- [12] 郑亚楠, 吕红宾, 胡晓农. 基于 Visual Modflow 的地下水流量数值模拟:以四川垮梁子滑坡为例[J]. 人民长江, 2018, 49(6):50–56.
(ZHENG Ya' nan, LYU Hongbin, HU Xiaonong. Numerical simulation of groundwater flow in Sichuan Kualiangzi landslide based on visual MODFLOW [J]. Yangtze river, 2018, 49(6):50–56.)
- [13] RAHMAN H A E. Evaluation of groundwater resources in lower cretaceous aquifer system in Sinai [J]. Water resources management, 2001, 15(3):187–202.
- [14] DONG Y, LI G, XU H. An areal recharge and discharge simulating method for MODFLOW [J]. Computers & geosciences, 2012, 42:203–205.
- [15] THOMS R B, JOHNSON R L. Modelling groundwater/surface water interactions using MODFLOW-WhaT [J]. IAHS-AISH publication, 2005, 297:466–472.
- [16] SERRANO-HIDALGO C, GUARDIOLA-ALBERT C, HEREDIA J, et al. Selecting suitable MODFLOW packages to model pond-groundwater relations using a regional model [J]. Water, 2021, 13(8):1111–1114.
- [17] 冯浩, 邵明安. 黄土高原小流域雨水资源化潜力计算与评价初探[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2):140–144.
(FENG Hao, SHAO Ming'an. Calculation and assessment of developing potential for converting rainwater to resources in small watershed on the Loess Plateau [J]. Journal of natural resources, 2001, 16(2):140–144.)
- [18] TANG R, HAN X D, WANG X G, et al. Optimized main ditch water control for agriculture in northern Huaihe river plain, Anhui province, China, using MODFLOW groundwater table simulations [J]. Water, 2021, 14(1):521–532.
- [19] SERRANO-HIDALGO C, GUARDIOLA-ALBERT C, HEREDIA J, et al. Selecting suitable MODFLOW packages to model pond-groundwater relations using a regional model [J]. Water, 2021, 13(8):31–42.
(责任编辑:王国业 英文审校:范丽婷)