

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.018

雨水收集措施对周边地下水动态特征的影响分析

杜静雯¹, 刘佩贵², 黄璟胜^{1,3}, 杜新龙²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098)

摘要:为探究透水铺装和下凹式绿地2种雨水收集措施对周边地下水动态的影响,文章以在淮北平原地区的某所学校为研究对象,通过建立地下水流数值模型,定量分析不同降水频率下,地下水水位和可开采量对2种雨水收集措施的响应程度。结果表明:在雨水收集措施正常运行状况下,当降水频率为25%、50%、75%,可使地下水可开采量分别增加2.78%、2.79%、2.81%;基于2017—2018年年平均降雨量,安装雨水收集措施可使地下水水位抬升0~0.24 m,与含水层厚度相比,变化幅度为0~0.96%。该研究结果对增加研究区内地下水资源量具有一定的应用价值。

关键词:数值模型;允许降深;地下水可开采量;透水铺装;下凹式绿地

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)12-1698-06

Analysis of dynamic characteristics of groundwater due to rainwater collection measures

DU Jingwen¹, LIU Peigui², HUANG Jingsheng^{1,3}, DU Xinlong²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study investigates the groundwater dynamics due to two rainwater collection measures including permeable pavement and sunken green space. A primary school in Huaibei Plain is chosen as the study area. A numerical flow model is developed for quantitatively analyzing the responses of the groundwater level and exploitable amount to the two rainwater collection measures under different precipitation frequencies. Results suggest the exploitable amount of groundwater can be increased by 2.78%, 2.79% and 2.81% for the precipitation frequencies of 25%, 50% and 75%, respectively. The rainwater collection measures raise the groundwater level by 0-0.24 m under the average annual rainfall in 2017-2018. The ratio of such an increase to the aquifer thickness falls in the range of 0-0.96%. This study may be of importance in managing the groundwater resources in the study area.

Key words: numerical model; allowable drawdown; exploitable amount of groundwater; permeable pavement; sunken green space

0 引言

地下水资源在保障我国淮北地区生活供水发挥着重要作用。近年来,随着社会发展,部分地区出现了地下水水位下降、地面沉降等环境

地质问题。提高非常规水源的利用成为缓解供需水矛盾和环境地质问题的主要措施之一,其中,城市雨水以其水质较优的特点成为重点收集与利用的水源之一^[1-2]。在海绵城市建设过程中,中国、美国、德国、澳大利亚等多国针对水资源短缺诱发

收稿日期:2023-03-27;修回日期:2023-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52079042);安徽省自然科学基金资助项目(2208085US07)

作者简介:杜静雯(1999—),女,江苏扬州人,河海大学硕士生;

刘佩贵(1981—),女,山东日照人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:liupg2512@163.com;

黄璟胜(1984—),男,台湾新北人,博士,河海大学教授,博士生导师。

的环境地质问题实施了低影响开发(low important development, LID)措施,从城市到农村,形成了较为完善的雨水收集利用体系,为雨水收集利用的发展提供了可借鉴的思路^[3-7]。

现阶段主要研究聚焦于 LID 措施在控制径流、滞蓄洪峰、净化水质效果和介质渗透性能等方面,并用数据和应用案例证明了措施的可行性^[8-10]。文献^[11]通过水文水动力耦合暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)与 NewFlood 分析有、无 LID 措施下的内涝积水情况,结果表明 LID 措施可有效缓解城市内涝积水问题;文献^[12]利用模型 Hydrus-1D 探究 LID 措施在不同工况下的雨水径流控制效应,并给出 3 个研究对象(生物滞留池、下凹式绿地、透水铺装)的建议参数,在该参数下产生的雨水径流较少。LID 措施在发挥滞蓄洪峰等作用的同时,大部分雨水会下渗至包气带甚至饱和带,从而提高了土壤含水量,增加了地下水的补给量,可能引起该区域地下水可开采量和地下水动态发生

变化。

本文以淮北地区某小学学校为研究对象,通过建立数值模拟模型,量化分析透水铺装和下凹式绿地对地下水动态特征和可开采量的影响程度,以期为研究区雨水收集利用提供技术支撑。

1 研究区概况

研究区地下水数值模拟的平面范围及地理位置如图 1 所示。图 1 中,除建筑用地和绿地外的空白部分均表示道路。该小学学校位于安徽省阜阳市太和县境内,地处黄淮平原腹地,地理位置为:东经 $115^{\circ}25'$ ~ $115^{\circ}55'$,北纬 $33^{\circ}04'$ ~ $33^{\circ}35'$ 。属东部季风暖温带半湿润地区,季风气候明显,四季分明,多年平均降水量 933 mm,蒸发量 931.6 mm。多年监测表明,阜阳市浅层地下水受到不同程度污染,中深层地下水开采过度,地面沉降速率过快。目前研究区内无任何 LID 措施,资料显示至 2030 年,阜阳市城市建成区 80% 以上的面积将达到建设海绵城市的要求。

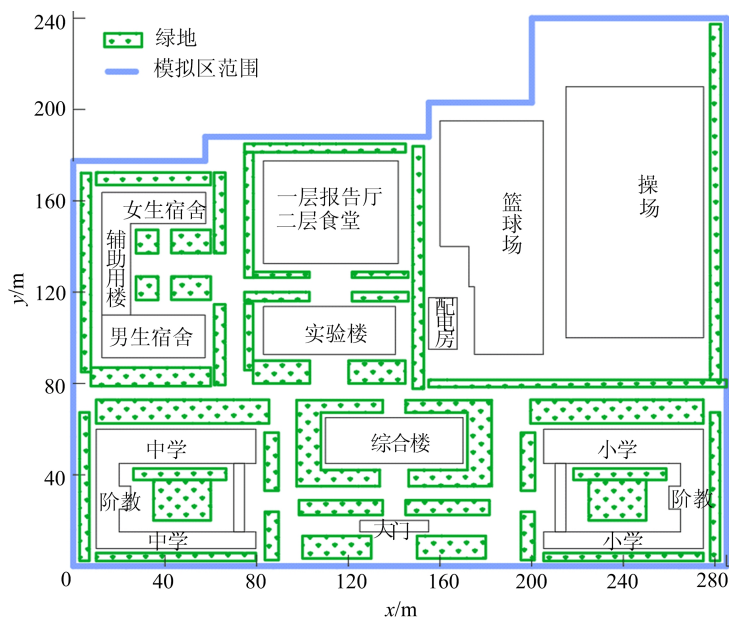


图 1 研究区地理位置示意图

区内地下水以松散岩类孔隙水为主,根据地下水的埋藏条件、水力特征及其与大气降水、地表水的关系自上而下划分为浅层孔隙水和深层孔隙水。浅层孔隙水赋存于 50 m 以浅的全新统、上更新统中,与大气降水、地表水关系密切,含水层底板埋深 29.0 m,岩性主要为灰黄、棕黄色粉砂,结构松散,分选性较好。现状评估地下水水位埋深在 4.0 m 左右,含水层厚度 25.0 m,单井涌水

量为 $500\sim 800\text{ m}^3/\text{d}$ 。该含水砂层的厚度主要受该地区古河道的控制,砂层之间没有稳定的黏性土相隔,各含水层之间的水力联系密切,属于潜水或半承压水。深层孔隙水赋存于 50.0 m 以下的地层中,单井涌水量 $100\sim 1\,000\text{ m}^3/\text{d}$,局部大于 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$,与大气降水、地表水水力联系微弱。

本文研究对象为浅层孔隙水,主要接受大气降水、河渠渗漏、灌溉水回渗及侧向径流补给,沿

沟河两侧入渗断面较大,降水入渗性好。包气带岩性主要为全新统黏质粉土,土质疏松,透水性较强,有利于降水入渗补给。径流流向总体自北西南向东南,天然条件下,径流速度缓慢,地下水动态属降水蒸发型;浅层孔隙水的排泄方式主要为人工开采和蒸发。现拟在研究区操场、篮球场部分铺设透水铺装,在原先校园内绿地部分铺设下凹式绿地;在铺设透水铺装和下凹式绿地处各布设一观测井,在未铺设 LID 措施、铺设透水铺装和下凹式绿地的边缘处分别布设 3 个观测井,监测地下水水位变化。

2 地下水数值模拟模型

2.1 水文地质概念模型

根据水文地质条件,本文研究对象为浅层孔隙水,将研究区概化成一个单层的水文地质模型,含水层顶板由地下水水位决定,地下水水位埋深 4.0 m;底板即为含水层底板,埋深 29.0 m,含水层厚度为 25.0 m。模型中底板相对高程设为 0 m,顶板相对高程设为 29.0 m,地下水水位相对高程设为 25.0 m。研究区为一局部区域,地下水水位已知,边界条件均概化为一类边界。顶部为潜水面边界,接受大气降水补给;底部为与地表水力联系微弱的深层孔隙水,概化为隔水边界。根据水流特征及地下水补径排关系,地下水动态属于降水蒸发型,体现地下水系统的非稳定性,可概化为非稳定二维流系统,水文地质参数随空间变

化,体现地下水系统的非均质性,可概化为非均质各向同性系统,因此,模拟区地下水流为非均质各向同性非稳定二维地下水流。

2.2 数学模型

根据水文地质概念模型,将模拟区地下水流概化成非均质各向同性非稳定二维地下水流系统,并建立相应的数学模型。具体公式如下:

$$\begin{cases} KB \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \alpha_i h + R = S_y \frac{\partial h}{\partial t}; \\ h(x, y, t) \Big|_{t=0} = h_0, \quad (x, y) \in D; \\ h(x, y, t) \Big|_{\Gamma=0} = h_1, \quad (x, y) \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: K 为含水层的渗透系数; B 为含水层平均厚度,本文取 25.0 m; h 为地下水水位; α_i 为降水入渗补给系数, $\alpha_i = K'/B'$, 默认研究区内道路处的降水入渗补给系数为 0, $i = 1$ 时代表操场和篮球场区域, $i = 2$ 时代表绿地, B' 为地表铺设材料厚度, K' 为地表铺设材料的渗透系数; S_y 为给水度; R 为降雨强度; h 为初始水位; t 为时间; D 为模拟区范围; h_1 为一类边界处的水位; Γ_1 为一类边界。

2.3 数值模拟模型

本文采用 Visual MODFLOW 对上述数值模型求解。模拟区计算面积 72 500 m², 根据区域大小及计算精度的要求, 利用有限差分法, 按 5 m × 5 m 共划分为 58 行、50 列的正方形网格, 网格总数为 2 900 个, 其中有效单元格 2 605 个, 如图 2 所示。

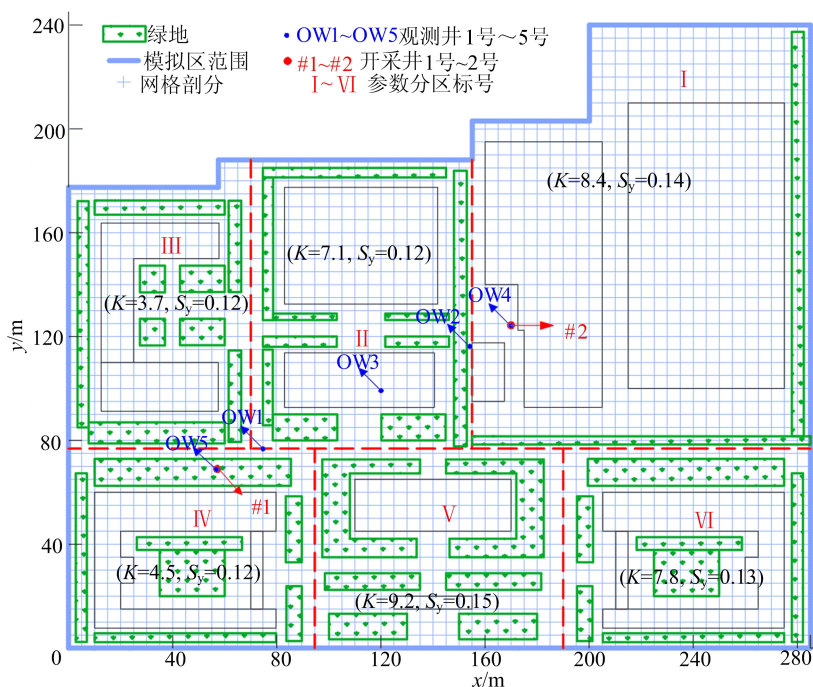


图 2 研究区数值模拟模型

将 2017 年 1 月至 2018 年 12 月选定为模拟期,时间步长均为 1 d。根据水文地质情况,将含水层参数分为 6 个区,由于研究区地下水流为二维流,不考虑垂直渗透系数 K_z ,且模型为各向同性,水平渗透系数 $K_x=K_y$,因此含水层渗透系数均用 K 表示,参数值根据经验进行赋值,具体分区及各区域参数值见图 2。

降雨入渗以面状补给形式添加到研究区,通过 Recharge 模块计算;地下水可开采量利用 Well 模块代入计算,在研究区操场及绿地附近分别布设一开采井,在全域布设 5 个观测井,观测因开采带来的地下水水位变化。开采井及观测井布设位置见图 2;区域蒸发量较小,蒸发极限埋深为 3.5 m,可忽略不计。

3 地下水动态特征分析

3.1 雨水收集措施布设

铺地作为校园内主要的雨水汇集面,面积较大,雨水汇集速度快,是校园内雨水收集利用的关键对象。因此,需将校园内部分铺地改为透水铺装(本次模拟选择将操场、篮球场部分的不透水铺装改为透水铺装),但不可将铺地全部改为透水铺装,需保留部分不透水铺装,如校园内道路等,辅助下凹式绿地进行雨水收集;在校园内绿地部分

安装下凹式绿地,作为一种特殊绿地,可以对雨水进行初步净化,控制初雨入渗对地下水体的污染,同时不透水铺装处的雨水会汇集引入下凹式绿地处,充分集蓄进行下渗。

3.2 不同降水频率下地下水可开采量变化

3.2.1 未安装雨水收集措施

根据研究区历年降雨统计资料,对其进行 P-III 型排频,选出降水频率(1966—2000 年间降水日数与区间总日数的比值)分别为 25%、50%、75%的降水年份。结果显示:降水频率为 25%、50%、75%的年降雨量分别为 1 007.93、864.61、705.44 mm。

在未安装雨水收集措施时,模型中操场、篮球场和绿地部分的降水入渗补给系数分别为 $\alpha_1=0.13$ 、 $\alpha_2=0.30$ 。利用 Well 模块计算发现,当降水频率为 25%时, #1、#2 开采井可开采量之和为 $1\ 115\ \text{m}^3/\text{d}$,研究区内地下水水位降深等值线如图 3 所示,此时研究区中心最大降深值为 12.0 m,未超过允许最大降深值(含水层厚度 $1/2$, 12.5 m),且模型中两口开采井在开采过程中未发生干涸,因此当降水频率为 25%时,地下水的可开采量为 $1\ 115\ \text{m}^3/\text{d}$ 。同理可得,当降水频率为 50%、75%时,地下水可开采量分别为 $1\ 110$ 、 $1\ 105\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

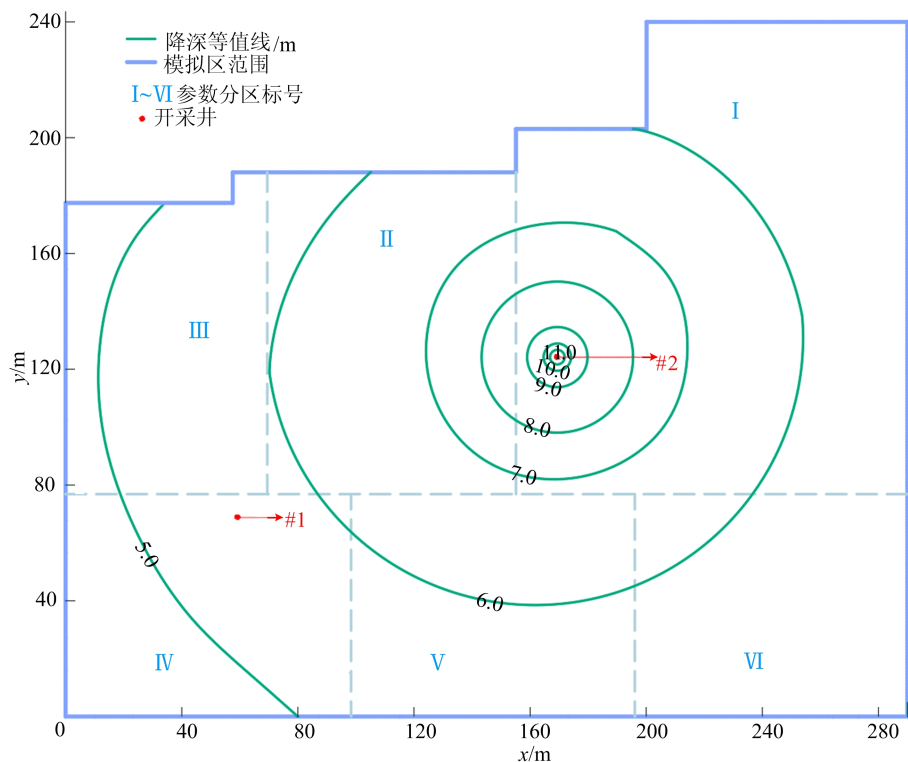


图 3 降深平面等值线图

3.2.2 安装雨水收集措施

考虑下凹式绿地植被根系的发育以及透水铺装上覆荷载承载力的作用情况,在学校内安装雨水收集措施后,模型中操场和篮球场的降水入渗补给系数设定为 $\alpha_1 = 0.40$,绿地部分的设定为 $\alpha_2 = 0.50$ 。通过模型计算后发现,降水频率为 25%、50%、75% 时,地下水可开采量分别为 1 146、1 141、1 136 m^3/d ,分别比未安装雨水收集措施时的地下水可开采量增加 2.78%、2.79%、2.81%。因此,安装雨水收集措施后,区域地下水可开采量会得到增加,具体对比如图 4 所示。

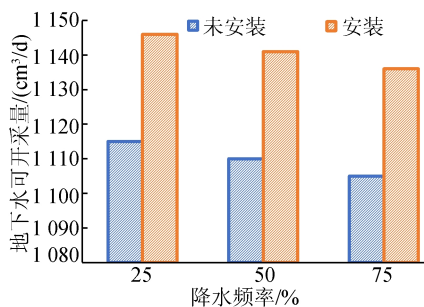


图 4 地下水可开采量对比

3.3 地下水运动特征变化

在 2017—2018 年年平均降雨量情况下,安装雨水收集措施后,观测模型中 OW4、OW5 观测井水位的前后变化,如图 5 所示,OW4 观测井处区域地下水水位抬升幅度约为 0~0.24 m,对比未安装雨水收集措施时的水位增加 0~0.96%,OW5 观测井地下水水位抬升幅度为 0~0.16 m,与含水层厚度相比,增幅为 0~0.64%。区域内地下水水位总体抬升 0~0.24 m,说明安装雨水收集措施后,地下水水位会逐渐抬升,可缓解区域

地面沉降、地下水水位下降过快等问题。

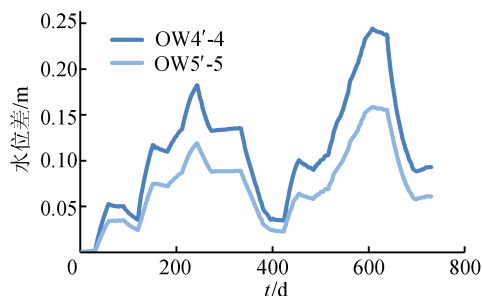


图 5 水位值变幅

根据模型,分别计算出 2017、2018 年安装雨水收集措施前后的水均衡情况,见表 1 所列。表 1 中:未安装雨水收集措施的 $\alpha_1 = 0.13$, $\alpha_2 = 0.30$;安装雨水收集措施的 $\alpha_1 = 0.40$, $\alpha_2 = 0.50$ 。

未安装雨水收集措施时,2017、2018 年降水入渗补给量分别为 156.00、172.82 m^3/a ,忽略蒸发,地下水总排泄量即为地下水可开采量,通过模型计算均为 13 200 m^3/a ,2017、2018 年区域水均衡值均呈现负均衡,说明地下水开采量大于补给量,因此该区域存在地下水超采现象,若不采取措施,会使区域内地下水资源量逐渐减少。

安装雨水收集措施后,与未安装时相比,2017、2018 年的降水入渗补给总量分别增加了 173.54、192.24 m^3/a ;安装雨水收集措施后,区域仍呈现负均衡,但相比未安装雨水收集措施时,2017、2018 年水均衡量分别增加 22.09、22.43 m^3/a ,增幅分别为 1.98%、2.01%,主要体现在降水入渗补给量增多,说明安装雨水收集措施后,会增加研究区的入渗补给量,能够从一定程度上缓解区域内地下水超采问题。

表 1 安装雨水收集措施前、后 2017、2018 年水均衡结果 单位: m^3/a

计算量	2017 年		2018 年	
	未安装	安装	未安装	安装
降水入渗补给量	156.00	329.54	172.82	365.06
侧向补给量	11 931.12	11 779.67	11 913.09	11 743.28
地下水开采量(排泄量)	13 200.00	13 200.00	13 200.00	13 200.00
水均衡量	-1 112.88	-1 090.79	-1 114.09	-1 091.66

注:水均衡量为总补给量与总排泄量之差。

4 结 论

本文通过 Visual MODFLOW 软件建立研究区地下水数值模型,分析安装雨水收集措施对周边地下水动态特征的影响。通过数值模拟方法

分析安装透水铺装和下凹式绿地后对周边地下水动态的影响,结果表明:安装雨水收集措施后,研究区内地下水可开采量增加,与原先地下水可开采量相比,增加幅度约为 2.80%;地下水水位得到抬升,与含水层厚度相比,增幅为 0~0.96%;

研究区在 2017、2018 年降水入渗补给总量增加;水均衡量增加,与原先相比,增幅分别为 1.98%、2.01%。研究结果对增加该地区地下水资源量及改善地下水超采问题具有一定的参考价值。

[参 考 文 献]

- [1] 王文. 城市雨水资源化利用分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(4):100-101,105.
- [2] 赵虎,母传伟. 推广雨水集用促进可持续发展[J]. 中国科技信息, 2014(5):44-45.
- [3] 王思思,张丹明. 澳大利亚水敏感城市设计及启示[J]. 中国给水排水, 2010, 26(20):64-68.
- [4] 乔晓罡,李文静. 从一些国家雨水利用情况谈我国的雨水利用[C]//“建设资源节约型、环境友好型社会”高层论坛论文集. 西安:西安地图出版社, 2007:239-242.
- [5] 郑兴,周孝德,计冰昕. 德国的雨水管理及其技术措施[J]. 中国给水排水, 2005, 21(2):104-106.
- [6] 李鸿敬,刘洪海,李明. 国外城市雨洪利用的发展现状[J]. 中国高新技术, 2013(14):75-76.
- [7] 车伍,吕放放,李俊奇,等. 发达国家典型雨洪管理体系及启示[J]. 中国给水排水, 2009, 25(20):12-17.
- [8] 赵婧. 基于雨水收集利用的海绵校园构建[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(19):91-92.
- [9] 董潇君,赵廷,红西北. 校园雨水收集利用的可行性研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(12):132-136.
- [10] 马箐,沙晓军,徐向阳,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发对城市住宅区非点源污染负荷的控制效果模拟[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9):53-57,52.
- [11] 周延,余敦先,夏军,等. 基于水文水动力模型的 LID 措施对城市内涝风险的影响研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(11):1090-1101.
- [12] 麦叶鹏,黄国. 如解河海等基于 Hydrus-1D 模型的 LID 措施雨水径流控制效应研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7):811-822.
- [3] 张兴梅,赵玺灵,段常贵. 质子交换膜燃料电池系统性能模拟[J]. 煤气与热力, 2009, 29(3):31-35.
- [4] SILVEIRA J L, GOMES L A. Fuel cell cogeneration system: a case of technoeconomic analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1999, 3(2):233-242.
- [5] 李晓嫣,陈维荣,刘志祥,等. 家用燃料电池热电联供系统的建模与仿真[J]. 电源技术, 2014, 38(12):2274-2277.
- [6] 李晓嫣,陈维荣,刘志祥,等. 基于热水温度的家庭 PEMFC-CHP 系统运行策略研究[J]. 电源技术, 2015, 39(3):491-493,501.
- [7] ZHANG Y Y, YU Q C, CAO G Y, et al. Research on a simulated 60 kW PEMFC cogeneration system for domestic application[J]. Journal of Zhejiang University(SCIENCE A), 2006, 7(3):450-457.
- [8] HWANG J J, ZOU M L. Development of a proton exchange membrane fuel cell cogeneration system[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195:2579-2585.
- [9] ARSALIS A, NIELSEN M P, SREN K K. Modeling and parametric study of a 1 kW e HT-PEMFC-based residential micro-CHP system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(8):5010-5020.
- [10] 辛英超,由蕤,杨秉润. PEM 燃料电池热电联供系统控制[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2019, 36(3):218-223.
- [11] PENG M, CHEN L, ZHANG R, et al. Improvement of thermal and water management of air-cooled polymer electrolyte membrane fuel cells by adding porous media into the cathode gas channel[J]. Electrochimica Acta, 2022, 412:140-154.
- [12] ZHAO C, XING S, LIU W, et al. Comprehensive anode parameter study for an open-cathode PEMFC[J]. Energy and Fuels, 2020, 34(6):7582-7590.
- [13] 汪殿龙,王梓鉴,杨代军,等. 质子交换膜燃料电池活化性能快速分析方法[J]. 电池, 2022, 52(2):139-143.
- [14] 赵兴强. 水冷型质子交换膜燃料电池热管理系统研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.

(责任编辑 吴 亮)

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1697 页)