

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.04.010



徽州传统民居室内水体蒸发实测研究

黄志甲,程建,张恒

(安徽工业大学 建筑工程学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要:徽州传统民居室内水体蒸发对室内环境的营造起到了积极作用。根据水体蒸发热平衡,建立民居室内水体蒸发模型,用实地连续测试的蒸发数据对该模型进行验证。结果表明,该模型能有效计算徽州传统民居室内水体蒸发过程,计算和测试的水体蒸发量之间的均方根误差和平均相对误差分别为 $41.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 4.2% 。环境参数中地面温度、太阳辐射、风速、相对湿度和气温对水体蒸发的影响程度逐渐降低,蒸发量和环境参数之间的相关系数分别为 0.909 、 0.779 、 0.736 、 -0.654 和 0.622 。

关键词:传统民居;蒸发模型;实测;环境参数

中图分类号:TU111.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)04-0063-06

Field measurement of water evaporation in Huizhou traditional dwelling

Huang Zhijia, Cheng Jian, Zhang Heng

(School of Civil Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, 243002, Anhui, P. R. China)

Abstract: Water evaporation in Huizhou traditional dwellings has played a positive role in environment formation. Evaporation model was built by analyzing heat balance of water evaporation. The model was calibrated against evaporation data which were obtained from field measurement in traditional dwellings. The results show that the model could effectively predict the water evaporation process in Huizhou traditional dwellings. In addition, the error of standard deviations and the average relative error between calculate values and experimental values are $41.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and 4.2% , respectively. Correlation analysis results show that the water evaporation is most correlated to the ground temperature, followed by solar radiation, wind speed, relative humidity and air temperature, and the correlation coefficients are 0.909 , 0.779 , 0.736 , -0.654 and 0.622 , respectively.

Keywords: traditional dwelling; evaporation model; field measurement; environment parameters

被动蒸发冷却是古人在夏季最常使用的一种降温技术,对夏季室内环境的营造起着重要的作用。

长期以来人们从大尺度范围出发,利用各种方法对室外江、河、湖、海等大面积水体的蒸发量进行

收稿日期:2016-12-28

基金项目:国家自然科学基金(51478001)

作者简介:黄志甲(1963-),男,教授,博士,主要从事建筑节能和绿色建筑研究,(E-mail) hzj@ahut.edu.cn.

Received:2016-12-28

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51478001)

Author brief: Huang Zhijia (1963-), professor, PhD, main research interests: building energy efficiency and green building, (E-mail) hzj@ahut.edu.cn.

预测^[1-2]。

徽州传统民居作为极具特色的地域性建筑,蕴含着大量的生态设计经验。天井作为最活跃的元素,和室内环境的营造有着密不可分的关系^[3-4]。天井底部通常蓄有薄水层,夏季水体蒸发带走热量,降低室内温度,这一蒸发过程属于微气候、微尺度的范围,在现有的文献中还少有涉及。在大尺度空间的研究范围内,水体的蒸发量主要与环境参数有关^[5-7],但徽州传统民居的室内水体蒸发却更为复杂,需要通过测试和分析进行更加深入的探究。水体蒸发的研究方法主要包括利用气象因子的经验公式法^[8-9]和利用传热传质的热质平衡法^[10-11]。对于徽州传统民居室内水体蒸发的现状和蒸发模型问题的研究还有所欠缺。为此,通过在徽州传统民居中进行水体蒸发实验获取蒸发数据,在分析建筑室内微气候对水体蒸发蒸发量的影响的基础上,利用水体蒸发的热平衡,建立适用于徽州传统民居室内水体蒸发的蒸发模型。

1 测试方案和蒸发模型

1.1 测试方案

蒸发实验位于一栋建于明末清初的传统徽州民居,建筑位于安徽省宣城查济村(30.5°N,118.0°E,海拔 160 m),当地的民居内天井底部均有蓄水(图 1),也是古人们在炎热夏季最有效和最方便的降温方式。



图 1 传统民居室内水体图

Fig. 1 Water maps in traditional dwelling

蒸发实验时段为 2016 年 7 月 23 日—7 月 25 日。

如图 2 所示,在天井下依次设置 3 个蒸发水槽,蒸发水槽的尺寸为 0.15 m×0.1 m,三者同时进行试验减少误差,试验期间对蒸发量进行逐时测量,称重法由于方法简单易操作最常被人们使用^[12],将每

次电子秤称重的重量和上次称重的重量之间的差值作为水体的蒸发量,测量的时间间隔为 10 min;水体表面温度的测量使用红外测温仪,测量的时间间隔为 10 min。微气候的测量包括太阳辐射强度、空气温度、相对湿度、风速、大气压强和地面温度。太阳辐射测试时间间隔为 5 min;风速和温湿度测试的时间间隔为 1 min;地面温度的测试时间间隔为 10 min,具体的测试仪器及精度如表 1 所示。最终得到的测试数据以 30 min 作为时间基准单位,蒸发数据取平均值。

表 1 测试仪器
Table1 Test equipment

测试物理量	测试仪器(型号)	精度
空气温湿度	温湿度记录仪(TR72wf)	±0.5 °C
空气流速	微风速仪(Swema 03)	±0.03 m/s
水表温度	红外测温仪(RAYST80+)	±1 °C
辐射强度	太阳总辐射表(TBQ-2)	±2%
水体蒸发量	电子秤	1 g
地面温度	热电偶(K 型)	±0.1 °C

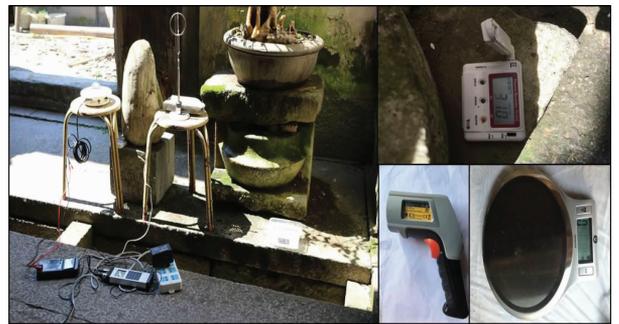


图 2 测试现场图

Fig. 2 View of on-site measurement

由于手动测试和自动测试的时间间隔都小于 30 min,所以可以通过取平均值的方式保证整个测试数据的一致性,另外,同时进行的 3 组相同试验之间形成比照,3 组实验在手动测试部分的误差较小(手动测试操作时间短),进一步提高了测试数据的一致性。由于文章的篇幅限制,表 2 中仅给出了 7 月 23 日的部分实测数据,此时的水体蒸发效果比较明显,具有代表性。

1.2 蒸发模型

天井底部水体是靠近地面的水面薄层,水体和环境的热交换包括辐射、蒸发和传导,以水体为研究对象,建立水体蒸发热平衡方程

$$q_{s \cdot in} + q_{g \cdot in} = q_{st} + q_{w \cdot out} + q_{c \cdot out} + q_{e \cdot out} \quad (1)$$

表2 徽州传统民居水体蒸发实测数据

Table 2 Measurement data of water evaporation in Huizhou traditional dwelling

时刻	$m_e / (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	T_w / C	$I_s / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	T_a / C	$\varphi / \%$	T_g / C
10:00	0	1.025	29.2	839	29.6	66.5	31.0
10:30	267	0.569	31.5	898	30.0	65.4	33.2
11:00	267	1.125	33.4	981	33.1	65.0	35.2
11:30	400	1.052	35.1	981	33.4	63.1	39.8
12:00	400	1.875	35.8	969	33.7	62.6	43.4
12:30	400	0.987	36.6	969	34.0	61.8	42.6
13:00	667	0.896	36.9	938	34.4	60.7	43.9
13:30	667	1.564	36.7	875	34.6	59.6	46.5
14:00	533	1.689	37.5	834	35.1	56.5	47.5
14:30	933	1.125	37.5	784	35.5	55.9	46.2
15:00	800	0.564	37.5	664	34.8	59.2	44.5
15:30	667	0.511	37.4	636	34.4	59.7	43.8
16:00	533	0.456	35.2	37	35.2	56.6	41.5

式中各分项的意义分别为

$$q_{s \cdot \text{in}} = \alpha_w I_s \quad (2)$$

式中: $q_{s \cdot \text{in}}$ 为水体吸收的太阳辐射热, W/m^2 ; α_w 为水体的太阳辐射吸收率,取 $0.55^{[13]}$; I_s 为水体接收到的总太阳辐射, W/m^2 。

$$q_{g \cdot \text{in}} = \frac{\lambda_w}{z_w} (T_g - T_w) \quad (3)$$

式中: $q_{g \cdot \text{in}}$ 为地面向水体传导的热量, W/m^2 ; λ_w 为水体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T_w 为水体温度, $^{\circ}\text{C}$; z_w 为水体深度,天井底部水体是紧贴地面的水面薄层,取 1.0 cm 。

$$q_{st} = C_w \rho_w z_w \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad (4)$$

式中: q_{st} 为水体储存的热量, W/m^2 ; C_w 为水体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ_w 为水体密度, kg/m^3 ; $\frac{\partial T_w}{\partial t}$ 为水体温度变化率, $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

$$q_{w \cdot \text{out}} = \sigma \epsilon_w (273 + T_w)^4 \quad (5)$$

式中: $q_{w \cdot \text{out}}$ 为水体长波辐射热, W/m^2 ; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ_w 为水面的长波发射率,取 $0.97^{[13]}$ 。

$$q_{c \cdot \text{out}} = h_w (T_w - T_a) \quad (6)$$

式中: $q_{c \cdot \text{out}}$ 为水体与空气的对流换热量, W/m^2 ; h_w 为水体表面的平均换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_a 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

水面与空气的对流换热可以认为是空气外掠平

板的换热,可以得到水体表面的平均换热系数为^[14]

$$h_w = \frac{\lambda_a}{L_w} \times 0.037 (Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad (7)$$

式中: λ_a 为空气导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; L_w 为蒸发槽的特征尺寸,在本次测试中采用蒸发槽的当量直径, m ; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数。

$$q_{e \cdot \text{out}} = m_e L \quad (8)$$

式中: $q_{e \cdot \text{out}}$ 为水体蒸发换热量, W/m^2 ; m_e 为水体蒸发量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; L 为水的汽化潜热, $\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 。

将式(2)~(8)带入式(1)中,得到水体蒸发量的数学模型如下:

$$m_e = \frac{1}{L} [\alpha_w I_s + \frac{\lambda_w}{z_w} (T_g - T_w) - C_w \rho_w z_w \frac{\partial T_w}{\partial t} - \sigma \epsilon_w (273 + T_w)^4 -$$

$$\frac{\lambda_a}{L_w} \times 0.037 (Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3} (T_w - T_a)] \quad (9)$$

该模型针对的是近地面的薄层水面,与前人研究的湖泊、水池相比,其研究的尺度更加微小。同时,模型将室内的环境参数和水体蒸发联系起来,可以为分析徽州传统民居室内水体蒸发对室内环境的影响提供基础。

2 测试结果分析

2.1 环境参数对蒸发量的影响

天井底部的水体蒸发试验,其蒸发量随着环境参数的变化而发生变化,蒸发过程主要包括水体表面水分子的蒸发过程以及蒸发后的水分子向周围空间中发生扩散的扩散过程。任何影响这两个过程进行的能量或参数都会影响整个水体的蒸发过程。环境参数中,影响水体蒸发的主要有太阳辐射、空气温度、空气相对湿度、风速,由于室外水体尺度较大,水体较深,底层土壤传入水体的热量较小,一般不计入蒸发模型中,但徽州传统民居天井底部水体是靠近地面的水面薄层,所以现将地面温度也作为环境参数考虑到水体蒸发中。这些参数正好提供了水体蒸发所需的全部因子(热力因子、动力因子和水分子因子)。

图3表示5种环境参数和水体蒸发量之间的关系。其中太阳辐射、地面温度及空气温度是水体蒸发的热力因子,太阳辐射直接作用在水体上,被水体吸收;地面土壤在有太阳辐射照射时吸收太阳辐射的热量再传输给水体,在没有照射时,土壤内部的热量向外输送进入水体;空气温度在比水体温度高时向水体传输热量,三者为水体的蒸发提供能量,因

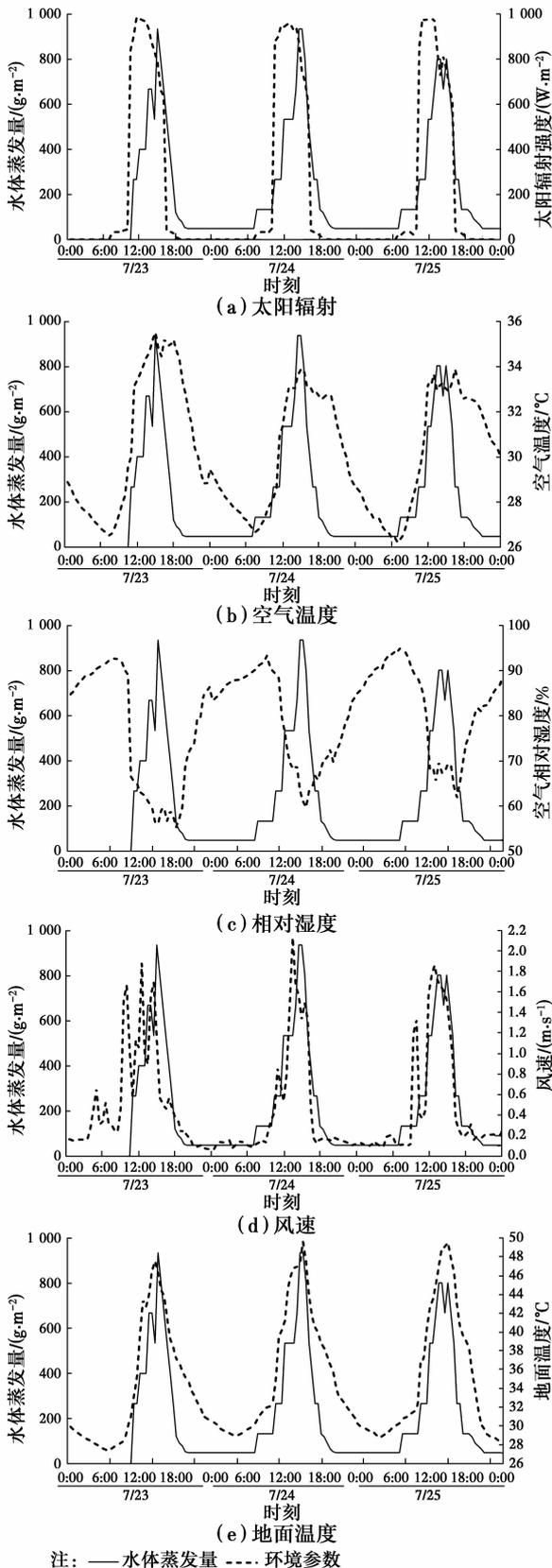


图 3 环境参数和蒸发量随时间变化图

Fig. 3 Environment parameters and evaporation variation with time

(a)、(b)、(e)), 太阳辐射、地面温度、空气温度和 水体蒸发量的相关系数分别为 0.779、0.909 和 0.622 (表 3)。空气相对湿度是水体蒸发的水分因子, 相对湿度越大, 空气和水体的水蒸气压差越小, 湿传递的能力越弱即蒸发量越小; 反之, 蒸发量越大, 所以呈现反对称的变化关系(图 3(c)), 二者之间的相关系数为 -0.654 (表 3)。风速是水体蒸发的动力因子, 在水体蒸发的时候可以快速的将水汽分子输送到外界环境中, 风速越大, 水体蒸发越剧烈(图 3(d)), 风速和水体蒸发量的相关系数为 0.736(表 3)。从相关性的角度可以看出, 与徽州传统民居室内水体蒸发最具直接关系的影响因素是地面温度, 也间接的证明了民居内水体蒸发不能忽略下垫面传入水体的热量。

表 3 环境参数与蒸发量的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of environment parameters and evaporation

太阳辐射	空气温度	相对湿度	风速	地面温度
0.779	0.622	-0.654	0.736	0.909

2.2 蒸发模型验证

利用式(9)和测试的相关数据, 进行水体蒸发量计算, 对测试值和计算值进行对比, 为了更进一步的验证该模型的准确性, 利用文献[15]中给出的 PenPan 模型进行对比(图 4)。从图中可以看出建立的模型能很好地模拟徽州传统民居天井底部水体的蒸发, 测试值和计算值之间的均方根误差 $RMSE = 41.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 平均相对误差 $MRER = 4.2\%$ 。计算值和测试值的回归分析如图 5, 图中的点是由测试值和计算值组成的二维点, 实线是通过点线性回归得到的拟合直线, 虚线表示的是测试值和计算值相等, 如果测试值和计算值之间越接近, 则二维点越接近虚线, 拟合直线的斜率越接近于虚线, 从图中可以看出, 夜间的点都集中在虚线上, 说明测试值和计算值之间的误差较小, 昼间的分布较为离散, 但几乎是相对虚线呈对称分布, 整体线性拟合的斜率为 0.914、截距为 0.029、 $R^2 = 0.890$, 进一步验证了建立模型的准确性。

与文献[15]中给出的蒸发皿蒸发模型相比, 建立的蒸发模型在蒸发时间上有明显的延迟, 这是由于太阳辐射的热量先被地面吸收再传入水体, 所以存在了延迟, 同时, 在夜间由于地面继续向水体输入热量, 本文的蒸发模型夜间的蒸发量要高于文献中

此, 与水体蒸发量的变化具有高度的一致性(图 3

给出的蒸发模型。说明本文建立的模型对计算徽州传统民居室内水体蒸发具有一定的优越性。

对误差为4.2%。

参考文献:

- [1] ROSENDERRY D O, WINTER T C, BUSO D C, et al. Comparison of 15 evaporation models applied to a small mountain lake in the northeastern USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(3/4): 149-166.
- [2] 张学知. 衡水湖水面蒸发量计算[J]. *水科学与工程学报*, 2014(2): 20-22.
ZHANG X Z. Calculation on water surface evaporation of Hengshui lake [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2014(2): 20-22. (in Chinese)
- [3] 石团团, 黄志甲, 钱伟. 徽州天井式建筑采光模拟与分析[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 31(4): 415-419.
SHI T T, HUANG Z J, QIAN W. Daylight simulation and analysis of traditional building with patio in Huizhou [J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2014, 31(4): 415-419. (in Chinese)
- [4] GOU S, LI Z, ZHAO Q, et al. Climate responsive strategies of traditional dwellings located in an ancient village in hot summer and cold winter region of China [J]. *Building and Environment*, 2015, 86: 151-165.
- [5] 陈伯龙, 左洪超, 高晓清. 干旱区气象因子对蒸发皿蒸发量的影响[J]. *高原气象*, 2014, 33(5): 1251-1261.
CHEN B L, ZUO H C, GAO X Q. Effect of meteorological factors on pan evaporation in arid region [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(5): 1251-1261. (in Chinese)
- [6] MCVICAR T R, RODERICK M L, DONOHUE R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 416/417(3): 182-205.
- [7] HE Y, LIN K, CHEN X, et al. Classification-based spatiotemporal variations of pan evaporation across the guangdong province, South China [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(3): 901-912.
- [8] 武金慧, 李占斌. 水面蒸发研究进展与展望[J]. *水利与建筑工程学报*, 2007, 5(3): 46-50.
WU J H, LI Z B. Advances and prospect of research on water surface evaporation [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2007, 5(3): 46-50. (in Chinese)
- [9] ZENG Z, PIAO S, LIN X, et al. Global evapotranspiration over the past three decades: estimation based on the water balance equation

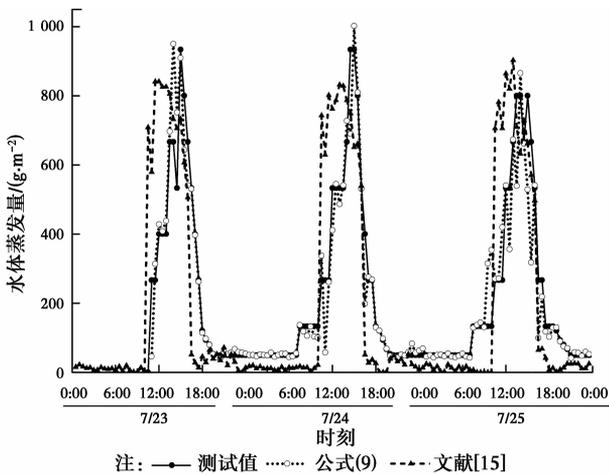


图4 测试值、本文模型和文献模型蒸发量对比图

Fig. 4 Comparison of evaporation obtained by three methods: measurement, model calculation and data from literature

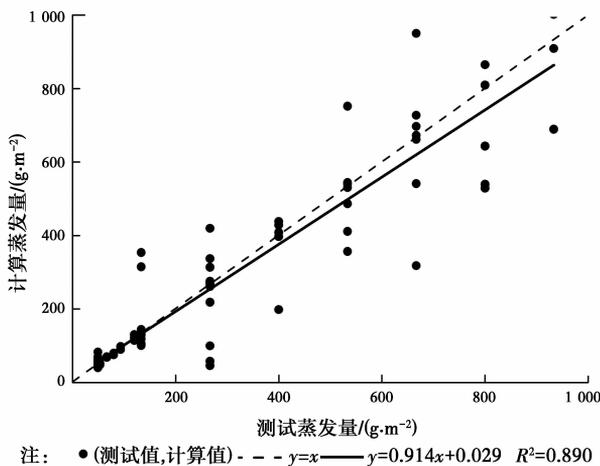


图5 测试值和计算值线性回归图

Fig. 5 Linear regression of measured and calculated evaporation

4 结论

1)对徽州传统民居室内水体蒸发进行现场测试,测试结果表明,环境参数中地面温度、太阳辐射、风速、相对湿度和气温对水体蒸发的影响程度逐渐降低,蒸发量和这些参数之间的相关系数分别为0.909、0.779、0.736、-0.654和0.622,相对湿度呈现负相关性,其余均为正相关,民居内水体蒸发中的地面温度不能被忽略。

2)通过水体蒸发的能量守恒建立了水体蒸发模型,通过对比发现该模型能很好地描述徽州传统民居室内的水体蒸发情况,计算值和测试值之间的相

- combined with empirical models [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1):1-8.
- [10] 张磊, 孟庆林, 舒立帆. 室外热环境研究中景观水体动态热平衡模型及其数值模拟分析[J]. *建筑科学*, 2007, 23(10): 58-61.
ZHANG L, MENG Q L, SHU L F. Analysis on dynamic thermal balance model of landscape water and its numerical simulation [J]. *Building Science*, 2007, 23(10): 58-61. (in Chinese)
- [11] LIM W H, RODERICK M L, FARQUHAR G D. A mathematical model of pan evaporation under steady state conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 641-658.
- [12] AL-SHAMMIRI M. Evaporation rate as a function of water salinity [J]. *Desalination*, 2002, 150 (2): 189-203.
- [13] 徐德林, 吴彤, 唐润生, 等. 浅水池太阳吸收率的计算 [J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2004(5): 47-53.
XU D L, WU T, TANG R S, et al. Estimating solar absorptance of a shallow water pond [J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2004(5): 47-53. (in Chinese)
- [14] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer theory [M]. 4th edition. Beijing: High Education Press, 2006. (in Chinese)
- [15] ROTSAYN L D, RODERICK M L, FARQUHAR G D. A simple pan-evaporation model for analysis of climate simulations: evaluation over Australia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(17): 165-173.

(编辑 胡玲)