

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0088-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.020

立式喷淋室内气-水逆流热湿交换的唯象研究

赵旭, 王佳颖, 苏秀, 鲍玲玲

(河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对湿空气与喷淋水传热传质的问题, 在唯象模型和实验分析上做了一些研究。首先以不可逆热力学理论为基础, 建立了描述系统内部传热传质的唯象模型。其次针对不同温度下的入口喷淋水和空气影响规律, 运用唯象方程组进行分析, 发现在本实验的研究条件下, 基于唯象模型的推动力研究与实际工程的参数变化趋势基本吻合, 说明该理论模型基本可靠, 可用于分析湿空气与喷淋水的传热传质研究。

关键词: 气-水系统; 传热传质; 唯象方程; 实验研究

中图分类号: TK123

文献标志码: A

The phenomenological model and experimental analysis on heat and mass transfer of humid air and spraying water in vertical spray chamber

ZHAO Xu, WANG Jiaying, SU Xiu, BAO Lingling

(College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: Aiming at the problem of heat transfer and mass transfer of wet air and spray water, hawse did some research on basic theory, phenomenological equation and experimental analysis. First of all, based on the irreversible thermodynamics theory, combining with the basic law, we established a system of phenomenological equations describing the heat and mass transfer. Secondly, the water and air influence law of inlet spraying water and air at different temperatures was analyzed by the phenomenological equations. It is found that under the condition of this experiment research, the theoretical model is basically reliable and the result is consistent with the change of the parameters of the actual project. It can be used to analyze the heat and mass transfer of wet air and spray water.

Key words: air water system; heat and mass transfer; phenomenological equation; the experimental study

在工业的多种余热利用技术中, 气-水热交换的效率较高, 且技术最直接。在非平衡态热力学的领域, 已经有了上百年的研究历史^[1-7]。近年来, 张旭等^[8]建立了非平衡态热动力学的理论模型, 用于描述热质传递的实际过程。湿空气与喷淋水传热传质的过程是传热、传质、相变共存, 且互相影响的非平衡态热力学过程。系统工艺组成、流动方向、气流和水滴的初参数等因素都会对其存在影响^[9]。国内外众多学者针对无填料冷却塔、喷水室等存在

的传热传质问题进行了实验和理论研究^[10-11]。然而, 矿井排风、南方空调系统的室外进风这类湿空气与喷淋水的传热传质过程, 与干燥空气和喷淋水传热传质理论在热湿传递的驱动力等方面有很大不同。本文将非平衡态热力学应用于湿空气与喷淋水传热传质过程, 根据其熵平衡方程及熵产表达式, 建立了基于非平衡态热力学理论的唯一模型, 并针对不同温度下的入口喷淋水和空气换热规律, 进行了实验研究及分析。

收稿日期: 2017-11-10

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408182); 河北省自然科学基金资助项目(E2015402139); 河北省教育厅科学技术处资助项目(QN2014064); 河北省在读研究生创新能力资助项目(171290080015)

作者简介: 赵旭(1992-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为传热传质、余热回收。

1 唯象模型

1.1 湿空气与喷淋水传热传质的过程

水滴在由喷嘴喷出后, 水滴表面与湿空气之间发生了传热传质。在传热传质的过程中, 根据水滴的温度, 有两种可能性, 一是单单发生显热交换, 二是同时发生显热交换和湿交换, 湿交换又伴随产生潜热交换。湿空气与水滴进行直接接触时, 由于在贴近水滴表面的地方, 存在水分子的不规则运动, 所以会形成饱和空气边界层, 边界层温度与水滴表面温度相等。此时若边界层温度与主体空气的温度之间存在差异, 那么将发生热交换; 若存在水分子浓度差, 将发生湿交换(质交换)。

1.2 唯象模型的建立

王志国^[12]在之前的研究中, 针对油藏多孔介质复杂渗流过程的耦合机制做出了一定的唯象研究, 油藏多孔介质复杂渗流过程主要包括油相、汽相、液相, 且油藏多孔介质孔隙组成及结构变化多样, 针对这种系统, 王志国等人在热流和质流方面推导出的唯象方程组如下。

$$\begin{cases} J_q' = -\lambda \nabla T - \lambda_{qo} \nabla p_o - \lambda_{qg} \nabla p_g - \lambda_{qw} \nabla p_w \\ J_o = -\lambda_{oq} \nabla T - K_o \nabla p_o \\ J_g = -\lambda_{gq} \nabla T - K_g \nabla p_g \\ J_w = -\lambda_{wq} \nabla T - K_w \nabla p_w \end{cases} \quad (1)$$

对于本系统而言主要存在汽、液两相, 且传热传质主要是由于湿空气与水滴进行直接接触时, 在贴近水滴表面的地方, 形成饱和空气边界层, 在边界层与空气之间存在温度和水分子浓度的差异。而油藏多孔介质复杂渗流过程是指蒸汽在油藏内的流动与换热属典型高温、高压条件下多孔介质内的多相(油、气、水三相)流动与传热问题。与湿分(除去不凝性气体的液体相和蒸汽相)的含量及分布形态有关, 主要受梯度的影响。在王志国等人的研究基础上, 针对本系统进行了唯象模型的建立。

本系统中的传热传质是在温度场、浓度场和速度场等互相作用下发生的。为了便于研究, 在此做出以下假设: (1) 系统中包括气、液两相, 气相为水蒸汽和空气, 液相为液态水; (2) 喷淋塔中的介质, 在宏观上是均匀且各相同性的连续介质, 同时各相处于局域的热力学平衡状态; (3) 气相作为理想气体处理; (4) 不考虑剪切粘性现象引起的热力学力; (5)

不考虑水滴的变形; (6) 系统内不发生化学反应。

根据线性唯象定律, 得出热流和质流的线性唯象方程组为:

$$\begin{cases} J_q' = -L_{qq} \frac{\nabla T}{T^2} - \sum_{k=1}^K L_{qk} \cdot \frac{(\nabla \mu_k)_T}{T} \\ J_k = -L_{kq} \frac{\nabla T}{T^2} - \sum_{k=1}^K L_{kk} \cdot \frac{(\nabla \mu_k)_T}{T} \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_{qq} 为温度梯度驱动热传导时的唯象系数; L_{kk} 为与扩散现象相联系的唯象系数; L_{qk} 为由浓度梯度引起热流的唯象系数; L_{kq} 为由温度梯度引起物质流动的唯一象系数。

1.3 唯象系数

(1) 热流唯象系数

湿空气与喷淋水传热传质过程的热流与表观导热、气相质导热、液相质导热有关。其中表观导热是由温度梯度引起的显热交换 q_1 ; 气相质导热和液相质导热是指质量变化所产生的热量, 在本系统中对应由相变引起的相变潜热 q_2 。

$$J_{q1} = -h \nabla T \quad (3)$$

$$J_{q2} = -\gamma h_m \nabla d_g \quad (4)$$

(2) 质流唯象系数

根据唯象方程组中气相质流相关唯象系数可知, 传质过程主要为扩散传质, 扩散传质包括热扩散 g_1 和对流扩散(薄膜传质) g_2 。其中由于水和空气之间存在温差, 会在温度梯度作用下产生热扩散质流, 另一方面, 在对流过程中, 会有运动中流体之间发生传质行为, 会产生对流扩散。

$$J_{g1} = -D_T \nabla T \quad (5)$$

式中, D_T —在温度 T 下, 组分的扩散系数, m^2/s 。

依据薄膜理论, 按照菲克定律确定的扩散传质通量为

$$J_{g2} = -h_m (d_{g,w} - d_{g,\infty}) \quad (6)$$

式中, h_m —对流传热系数, $\text{w}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

因此唯象方程组为

$$\begin{cases} J_q' = -h \nabla T - \gamma h_m \nabla d_g \\ J_g = -D_T \nabla T - h_m \nabla d_g \end{cases} \quad (7)$$

1.4 唯象方程组分析

(1) 推动力的影响

当温度梯度 ∇T 和唯象系数不变时, 唯象方程组中的流随着含湿量梯度 ∇d_g 的增大而增大, 随着含湿量梯度 ∇d_g 的减小而减小; 当含湿量梯度 ∇d_g 和唯象系数不变时, 唯象方程组中的流随着温度梯

度 ∇T 的增大而增大,随着温度梯度 ∇T 的减小而减小;当温度梯度 ∇T 和含湿量梯度 ∇d_g 都变化时,唯象方程组中流的变化,视这两个梯度的变化幅度和唯象系数的影响而定。

(2) 唯象系数的影响

当系统内存在流速变化、温度变化或相变等情况时,唯象方程组中的四个唯象系数也会相应发生一定的变化,从而对系统中流的数值产生影响。

(3) 唯象方程组的应用

主要可应用于探索湿空气与喷淋水传热传质过程中,热量传递和质量传递的规律,明确传递的驱动力以及驱动力与流的关系,在不可逆热力学的理论层面上分析各因素对系统传热传质的影响。

2 实验装置

2.1 实验流程图

实验装置工艺流程如图1所示,能满足本项目的实验研究和不同气流参数(温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $60\% \sim 90\%$)热湿处理性能测试的需要。实验模型主要包括四部分:

(1) 空气预处理段:主要设备包括加热、冷却、加湿等,以实现将空气处理到实验要求的进风状态。

(2) 空气与喷淋水热湿处理测试段:可对现行的普通低速和进一步研发的高速喷水室进行性能测试分析。该段主要包括喷水室、喷淋装置、集水池等;实验台基本参数如下:喷淋断面: $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$;断面风速: $0 \sim 4.0\text{ m/s}$;最大风量 $2\ 880\text{ m}^3/\text{h}$;最大水量: 0.768 kg/s ;风相对湿度: $50\% \sim 90\%$;风温: $15^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 测量控制系统:能自动监测和记录实验过程的有关数据,调节控制实验测试风量、水量等。包括干、湿球温度传感器、流量传感器等仪器设备,动力设备运行控制,参数监测软件和设备等;测试设备:空气入口和出口各布有四个温度测点、两个湿度测点、涡轮流量计、压力表。控制系统:变频器、PLC、触摸屏。

(4) 冷热源系统:为预处理段和测试段提供所需要的冷量、热量和加湿量等。

2.2 实验步骤

实验过程按照以下步骤进行:

(1) 加热前空气参数的测定。实验开始前首先测量换热器所在房间中空气的温度和湿度。

(2) 加热后空气参数的设定及测定。启动风机和空气温度控制装置,将温度控制器温度设定为 25°C ,当温度控制器显示气温为 25°C 时,记下此时空气的温度和湿度。

(3) 喷淋前水参数的测定。测量并记下喷淋前水的温度(水的初温)。

(4) 喷淋过程中水和空气参数的测定。通过集成控制装置中对喷淋循环水泵进行变频控制,将水压调至 0.2 MPa 位置,记下水压数值,并记录开始喷淋的时刻。喷淋过程中实时监测换热器出口空气温度、湿度以及从换热器中流出水的温度。

(5) 停止喷淋后水参数的测定。等出水温度恒定后停止喷淋,并记录水流量及水的温度 t_{w2} ,然后将水箱中的水放掉,第1次测量结束。

(6) 将温度控制器设定为 25°C ,当温度控制器显示气温显示为 25°C 并保持不变时,记下此时空气

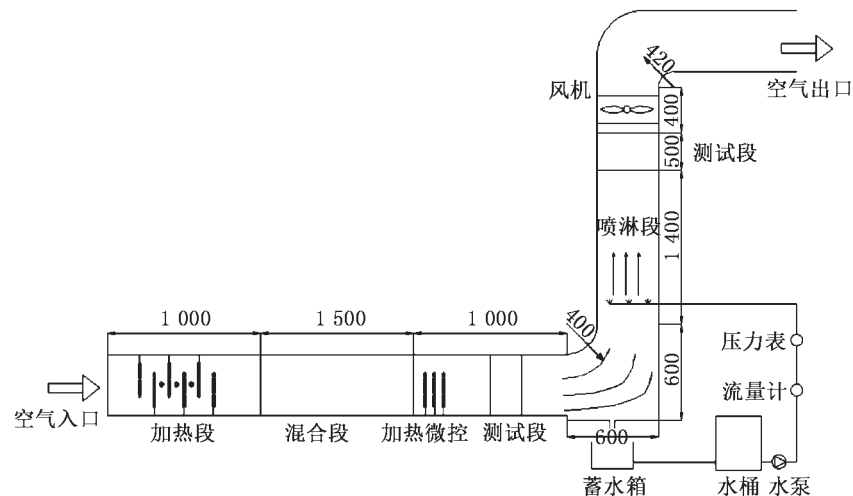


图1 气-水热湿交换实验台(单位:mm)

Fig.1 Moisture air-water heat and mass transfer test

的温度。

(7) 通过集成控制装置中对喷淋循环水泵进行变频控制, 将水压值调到与第1次实验相同的位置时记下水压读数及开始喷淋的时刻。喷淋过程中实时监测换热器出口空气温度、湿度以及从换热器中流出水的温度。

(8) 停止喷淋后水参数的测定。等出水温度恒定后停止喷淋, 并记录水流量及水的温度, 然后将水箱中的水放掉, 第2次测量结束。

(9) 重复以上步骤(6)一(8), 并记录实验数据。

3 实验方案和结果分析

3.1 实验方案

(1) 不同空气温度的实验

调节风道中加热管的工作排数, 增高或降低空气的温度, 保持其它各项参数不变, 测试系统的传热传质规律。由于喷淋塔内空气和水的温差对系统传热影响很大, 因此测量空气与水的换热前后的参数, 对结果进行分析。

(2) 不同水温度的实验

调节水桶中水的加热系统, 增高或降低水的温度, 保持其它各项参数不变, 测试系统的传热传质规律。通过测量和采集空气与水的运行参数, 对结果进行分析。

通过以上两个实验方案, 不仅可以计算气-水温差对传热的影响, 还可以比较空气、水温各自的变化对系统传热的影响程度。找出使系统高效运行的气-水温度参数。

(3) 不同空气流速实验

调节风机的转速, 增大或减小喷淋系统的空气

流速, 保持其它各项参数不变, 测试系统的传热传质规律。喷淋塔内空气流量对喷淋水雾的受力影响很大, 测量对空气及水换热前后的参数, 对结果进行分析, 计算其对传热传质的影响。

3.2 测试结果分析

(1) 不同空气温度的影响

本次实验通过改变加热管的工作个数, 调节空气入口温度, 对不同的空气温度进行对比实验分析, 由此将得到不同空气温度下全热交换效率、空气传热效率、水的冷却效率和加湿量, 见图2、图3。

在实验过程中室内温度变化较小基本可以认为保持稳定。水通过加热装置加热后, 基本保持在 $31.8^{\circ}\text{C} \sim 32.3^{\circ}\text{C}$, 因此大致认为在进入喷淋塔换热前, 水温度也不变。

图2、图3给出了当其他条件不变, 通用评价指标和唯象模型下空气入口干球温度分别为 15°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C 时, 对传热传质性能的影响。如图所示, 随着空气入口温度 t_1 的增大, 全热交换效率 η_1 、传热效率 X 、冷却效率 η_{wc} 和加湿量 W 均逐渐减小。接下来根据唯象方程组(7)来分析产生这种规律的原因。由表1可看出这种变化的主要原因是随着 t_1 的增大, 空气和水的温差减小(即 ∇T 减小), 含湿量梯度 ∇d_g 减小, 因此热流和质流的变化趋势都是减小的。具体推动力变化: ①传热方面: 温度梯度 ∇T 减小导致显热交换的热流($-h\nabla T$)减小, 含湿量梯度 ∇d_g 减小, 导致潜热交换的热流($\gamma h_m \nabla d_g$)减小; ②传质方面: 温度梯度 ∇T 减小导致热扩散质流($-D_T \nabla T$)减小, 含湿量梯度 ∇d_g 减小, 导致($h_m \nabla d_g$)减小, 虽然随着空气温度升高, 质流唯象方程中的热扩散系数也随之增大, 但由于其数量级很

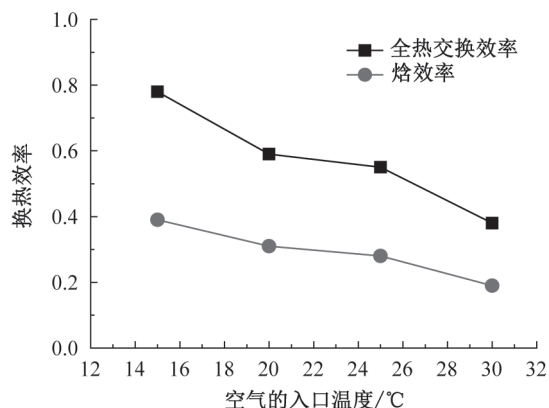


图2 不同空气入口温度下换热效率的变化

Fig.2 Thermal efficiency under different air temperatures

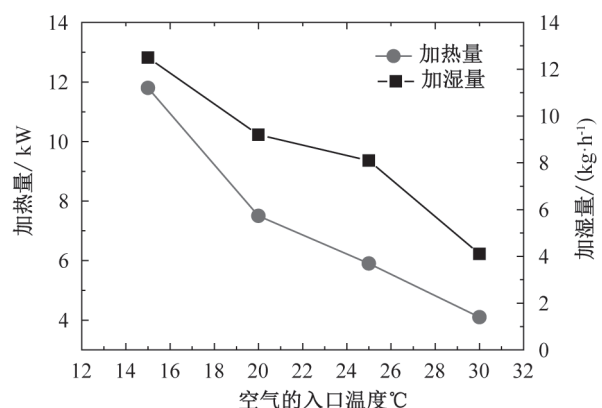


图3 不同空气入口温度下的加热量、加湿量

Fig.3 The adding heat and mass under different air temperatures

小,因此对质流的影响远小于温度梯度和含湿量梯度的影响。因此 η_1 、 X 、 η_{wc} 、 Q 和 W 均逐渐减小。

可见,空气入口干球温度对热湿交换单元传热传质的影响主要来自于空气和水的温差,为了增强夏季工况下热湿交换单元的传热传质性能,需要适当增大空气与水的温差。

(2) 不同水温度的实验

通过第一个实验,得到了空气-水温差对热湿交换单元传热传质推动力的影响。为了验证空气与水温差对系统的影响,进行第二个实验,实验数据如表2所示,即通过调节水流温度,得到传热传质效率和加湿量,分析系统传热传质推动力。

图4、图5给出了当其他条件不变,通用评价指标和唯象模型下水流入口温度分别为28℃、32℃、36℃、40℃时,对传热传质性能的影响。如

图所示,随着水流入入口温度 t_{w1} 的增大,全热交换效率 η_1 、传热效率 X 、冷却效率 η_{wc} 和加湿量 W 均逐渐增大。根据唯象方程组(7)分析产生这种规律的原因。可以看出趋势变化是由于随着 t_{w1} 的增大,空气和水的温差增大(即 ∇T 增大),含湿量梯度 ∇d_g 增大。具体推动力变化原因:①传热方面:温度梯度 ∇T 增大导致显热交换的热流($-h\nabla T$)增大,水温升高导致含湿量梯度 ∇d_g 增大,使得潜热交换量($-\gamma h_m \nabla d_g$)增大;②传质方面:温度梯度 ∇T 增大导致热扩散质流($-D_T \nabla T$)增大,含湿量梯度 ∇d_g 增大,导致对流传质($h_m \nabla d_g$)增大。因此 η_1 、 X 、 η_{wc} 、 Q 和 W 均逐渐增大。

通过实验二可见,水流入入口干球温度对热湿交换单元传热传质的影响主要来自于空气和水的温差,验证了实验一的结论,为了增强夏季工况下热湿交

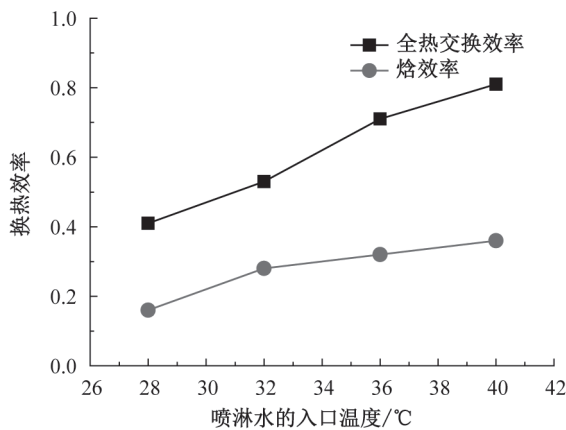


图4 不同喷淋水入口温度下换热效率的变化

Fig.4 Thermal efficiency under different water temperatures

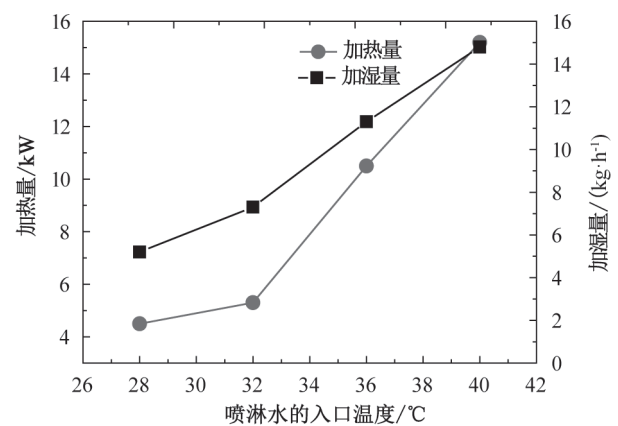


图5 不同喷淋水入口温度下的加热量、加湿量

Fig.5 The adding heat and mass under different water temperatures

表1 不同空气温度的实验

Tab.1 Experiments under different air temperatures

空气温度/℃	空气湿度/%	水温度/℃	空气流速/(m·s ⁻¹)	空气流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水气比	∇T /℃	∇d_g /(g·kg ⁻¹)(干空气)
15	80	32	3.5	0.56	0.6	17	22.12
20	80	32	3.5	0.56	0.6	12	18.91
25	80	32	3.5	0.56	0.6	7	14.65
30	80	32	3.5	0.56	0.6	2	9.06

表2 不同水温度的实验

Tab.2 Experiments under different water temperatures

空气温度/℃	空气湿度/%	水温度/℃	空气流速/(m·s ⁻¹)	空气流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水气比	∇T /℃	∇d_g /(g·kg ⁻¹)(干空气)
25	80	28	3.5	0.56	0.6	3	8.16
25	80	32	3.5	0.56	0.6	7	14.65
25	80	36	3.5	0.56	0.6	11	22.76
25	80	40	3.5	0.56	0.6	15	32.84

换单元的传热传质性能, 需要适当提高空气与水的温差。

4 结论

1) 本文的唯象研究与实际工程的参数变化趋势基本吻合, 说明该理论模型基本可靠, 可用于湿空气与喷淋水的传热传质研究。

2) 影响换热效果主要来自于空气和水的温差, 为了增强夏季工况下热湿交换单元的传热传质性能, 需要适当增大空气与水的温差。

参考文献:

- [1] 曾丹苓. 工程非平衡热动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 普利高津, 斯唐热. 从混沌到有序: 人与自然的新对话 [M]. 曾庆宏译. 上海: 上海译文出版社, 2005.
- [3] 史静, 孔祥伟, 王国栋, 等. 工作辊横移对工作辊温度场及热凸度的影响 [J]. 轧钢, 2002 (4): 7-9.
- [4] 德格鲁托, 梅休尔. 非平衡态热力学 [M]. 陆全康译. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [5] CAPLAN S R, ESSIG A. Bioenergetics and linear nonequilibrium thermodynamics: the steady state[M]. Harvard University Press, 1983.
- [6] BATTLE E H. The development of direct and indirect methods for the study of the thermodynamics of microbial growth[J]. Thermochemica Acta, 1998, 309(1-2): 17-37.
- [7] SPIEGLER K S, KEDEM O. Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): criteria for efficient membranes[J]. Desalination, 1966, 1(4): 311-326.
- [8] 张旭, 陈沛霖. 空气热湿处理的不可逆热力学分析及研究 [J]. 同济大学学报, 1999, 27(5): 561-566.
- [9] 许为权. 热质交换过程与设备 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [10] JICHA M, BAKLIK J, KARKI K C, et al. Numerical study on direct contact evaporative cooling using Lagrangian approach[C]//IMEchE Transactions-D4th UK National Conference on Heat Transfer, 1995: 392-397(C510/101/95).
- [11] 李莎. 高速空调喷水室典型处理过程的工程实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [12] 王志国. 基于非平衡态热力学理论的油藏多孔介质复杂渗流过程耦合机制研究 [C]// 中国力学学会, 上海交通大学. 中国力学大会 2015 论文摘要集. 2015: 1.
(责任编辑 王利君)
- (上接第 87 页)
- [6] 陈黎黎, 金腊华. 湖泊富营养化的改进型模糊综合评价方法研究 [J]. 中国环境科学, 2014(12): 3223-3229.
- [7] 刘建伟. 三种挺水植物对富营养化景观水体的净化效果 [J]. 湿地科学, 2015(1): 7-12.
- [8] 李俊龙. 中国河口富营养化对营养盐负荷的敏感性分类 [J]. 中国科学: 地球科学, 2015(4): 455-467.
- [9] 李晶. 水生植物修复重金属污染水体研究进展 [J]. 世界林业研究, 2015(2): 31-35.
- [10] 丁自立. 植物修复土壤重金属污染机制与应用研究 [J]. 湖北农业科学, 2014(23): 5617-5623.
- [11] 王庆海, 却晓娥. 治理环境污染的绿色植物修复技术 [J]. 中国生态农业学报, 2013(2): 261-266.
- [12] 钱嫦萍. 人工湿地技术削减雨水初期径流污染负荷研究进展 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2011(1): 55-62.
- [13] 岳晓彩. 生态浮床原位修复对海水养殖池塘底栖动物群落结构的影响 [J]. 水生态学杂志, 2014(1): 22-27.
- [14] 邓玉, 倪福全. 污染水体的生态浮床修复研究综述 [J]. 环境科技, 2014(1): 52-57.
- [15] 赵安娜. 沉水植物氧化塘对污水厂尾水深度净化效果与机制的小试研究 [J]. 湖泊科学, 2010(4): 538-54.
- [16] 赵安娜. 复合型人工湿地模型对污水厂尾水的深度净化效果 [J]. 生态与农村环境学报, 2010(6): 579-585.
- [17] 胡旭. 富营养化湖泊围隔中重建水生植被及其生态效应 [J]. 湖泊科学, 2014(3): 349-357.
- [18] 胡小兰. 淮河流域 3 个小流域不同植物群落下土壤粒径分布与分形特征 [J]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [19] 刘颖. 秦岭北麓太平河平原段植物群落配置模式研究 [J]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [20] 于志会, 赵红艳. 校园绿地植物群落配置模式的抑菌功能 [J]. 湖北农业科学, 2014(8): 1832-1834.
(责任编辑 王利君)