

污水泵站集水池臭气散发规律及其影响因素研究

陈 波¹, 许光明¹, 陈 俊¹, 陈 欢², 陈玮玮², 鹿世化²

(1.常州市排水管理处, 江苏 常州 213017)

(2.南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 城市污水泵站在正常运行过程中会产生难闻的恶臭气体, 严重影响到周边居民的身体健康和生活质量. 为了有效控制集水池中恶臭气体的散发, 需对其散发规律进行研究. 通过建立扩散传质数学模型, 利用积分变化得出污水中恶臭气体浓度的解析解以及集水池房间的臭气浓度, 分析讨论了室内换气速率、恶臭气体初始浓度、扩散传质系数、对流传质系数、分离系数等影响因素对臭气浓度分布、散发速率和散发量的影响. 研究结论可为污水泵站集水池臭气浓度的预测和控制提供重要的理论依据和求解方法.

[关键词] 污水泵站, 恶臭气体, 散发规律, 解析解

[中图分类号] TU834.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2018)03-0079-08

Study on the Law of Odor Emission and Its Influencing Factors in Sewage Pumping Station

Chen Bo¹, Xu Guangming¹, Chen Jun¹, Chen Huan², Chen Weiwei², Lu Shihua²

(1.Changzhou Drainage Management Office, Changzhou 213017, China)

(2.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: In the process of normal operation, urban sewage pumping station produces unpleasant odorous gases, seriously affecting the health and quality of life of the surrounding residents. In order to effectively control the odor of gas emitted from the sewage sump, its distribution rules need to be studied. In this paper, by establishing the mathematical model of diffusion mass transfer, we obtain the analytic solution of the concentration of malodorous gas in sewage and the odor concentration in the sump chamber with the integral transform method. The effects of indoor ventilation rate, initial concentration of malodorous gas, diffusion mass transfer coefficient, convective mass transfer coefficient and separation coefficient on the distribution of odor concentration are analyzed and discussed. The conclusions of the study can provide an important theoretical basis and solution for the prediction and control of the concentration of odor in sump of sewage pumping station.

Key words: sewage pumping station, malodorous gas, emission law, analytical solution

随着城市人口数量的快速增长和城市化的加剧, 污水泵站周边逐渐被新建的住宅、商业大厦等包围^[1]. 污水微生物分解产生的恶臭物质, 在污水的传输过程中散发出难闻的气味, 对周边居民的身体健康和生活质量造成严重影响^[2-4]. 在散发恶臭的各个污水处理单元中, 格栅是恶臭重点排放单元^[5]. 污水泵站格栅用于拦截及粉碎污水中存在的垃圾, 因此格栅处长期堆积着大量的恶臭物质, 持续产生恶臭气体并溶入集水池的污水中, 然后扩散至污水表面并进入泵房室内空气中^[6-8]. 为了有效地控制集水池中恶臭气体的散发, 需对其散发规律进行了解.

研究散发规律的方法一般来说有两种: 实验测定法和理论模拟法^[9]. 实验测定法虽然可靠、准确, 但无法了解散发的物理机制, 难以获得非实验条件下的散发情况^[10-11]. 因此, 建立传质模型分析集水池中恶臭气体的散发规律, 可在一定程度上弥补实验测定方法的不足^[12]. 本文首先建立污水泵站臭气传质的数

收稿日期: 2018-01-11.

基金项目: 中国博士后科学基金(2018M632332)、江苏省高等学校自然科学研究项目(18KJB470017).

通讯联系人: 鹿世化, 副教授, 研究方向: 建筑节能、制冷空调、室内空气品质等. E-mail: lushihua@njnu.edu.cn

学模型,假定集水池的相关物理参数,再根据假定参数求解得出室内恶臭气体的浓度、水面恶臭气体的浓度、恶臭气体的散发速率以及恶臭气体的散发总量随时间的变化关系.最后利用传质数学模型分析影响臭气散发规律的因素,得出相应的结论.

1 泵站臭气传质数学模型

图 1 为典型的城市污水泵站工作示意图.生活污水由各窨井排入泵站集水管,经过粗细格栅后,各种生活垃圾被拦截,然后进入集水池,此时进水井、格栅与集水池处皆会产生恶臭气体,需通过排气罩之类的设备收集后统一由除臭设备除臭,再由潜水泵提升水位至市政污水管网,最后经污水处理厂处理后排入河道.

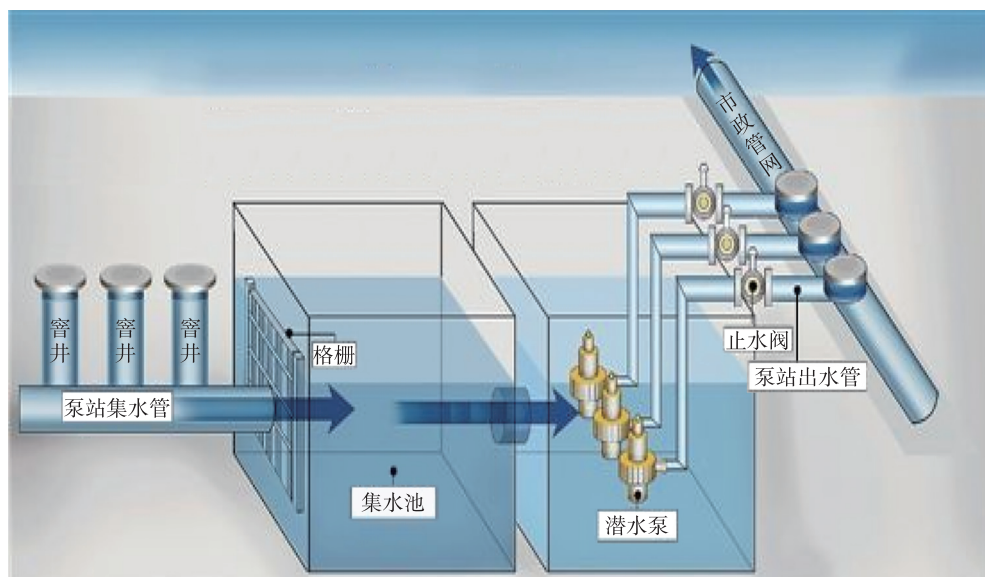


图 1 典型污水泵站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical sewage pump station

图 2 为泵房集水池恶臭气体散发过程示意图.已知:泵房的体积 V 和通风换气速率 Q ,集水池散发面积 A ,储水深 L 和恶臭气体在污水中扩散的相关特性参数(传质系数 D 、分离系数 K),以及恶臭气体在污水和室内空气初始浓度分布.恶臭气体的散发过程包括污水内部的扩散、污水表面的对流以及泵房空气中的混合,其控制机理可由传质方程来描述^[13-15].为了简化问题,需要提出一些合理的假设:集水池的水体保持静止,水中臭气的散发只有扩散;传质过程的相关特性参数在一定气候条件下为常数;集水池侧壁、底部与不渗透表面接触,不发生传质;室内空气充分混合,浓度均匀,新风不含恶臭气体.

污水中恶臭气体的质量扩散方程为:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

式中, $C(x,t)$ 为污水中恶臭气体的瞬时浓度, mg/m^3 ; x 为离池底的距离, m ; t 为时间, s ; D_m 为扩散传质系数, m^2/s , 假设为常数.

初始条件为:

$$C(x,t) = C_0(x), \quad t=0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (2)$$

式中, $C_0(x)$ 为污水中恶臭气体的初始浓度, mg/m^3 ; L 为池水深度, m .

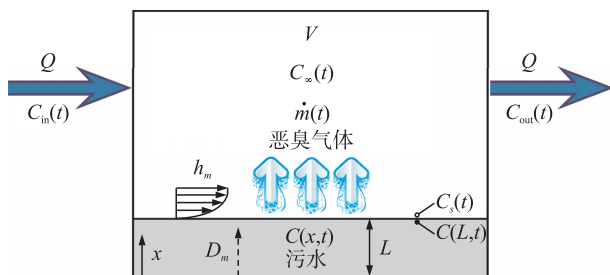


图 2 集水池恶臭气体散发过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of odorous gas emission in sewage sump

边界条件为:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = 0, \quad t > 0, \quad x = 0; \quad (3)$$

$$-D_m \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = h_m [C_s(t) - C_\infty(t)], \quad t > 0, \quad x = L. \quad (4)$$

式中, h_m 为池水表面对流传质系数, m/s ; $C_s(t)$ 为 $x=L$ 边界处的气体侧恶臭气体浓度, mg/m^3 ; $C_\infty(t)$ 为室内空气中恶臭气体浓度, mg/m^3 .

在 $x=L$ 边界处, 气体侧和液体侧恶臭气体浓度存在如下平衡关系式:

$$C(x,t) = KC_s(t), \quad t > 0, \quad x = L, \quad (5)$$

式中, K 为分离常数.

根据积分变换原理, 可得以上问题解析解的一般形式为:

$$C(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{X(\beta_m, x)}{N(\beta_m)} e^{-D_m \beta_m^2 t} \left[\int_0^L X(\beta_m, x') C_0(x') dx' + D_m \int_0^t e^{D_m \beta_m^2 \tau} M_2(\beta_m, \tau) d\tau \right], \quad (6)$$

式中, $X(\beta_m, x)$ 、 $N(\beta_m)$ 、 $M_2(\beta_m, \tau)$ 由式(7)~式(9)计算可得, $\beta_m (m=1, 2, \dots)$ 是超越方程(10)的正根:

$$X(\beta_m, x) = \cos(\beta_m x), \quad (7)$$

$$\frac{1}{N(\beta_m)} = \frac{2(\beta_m^2 + H^2)}{L + (\beta_m^2 + H^2) + H}, \quad (8)$$

$$M_2(\beta_m, \tau) = \frac{h_m}{D_m} X(\beta_m, L) C_\infty(\tau), \quad (9)$$

$$\beta_m \tan(\beta_m L) = H, \quad H = \frac{h_m}{KD_m}. \quad (10)$$

将以上各式代入式(6), 整理可得污水中恶臭气体的瞬时浓度解析解的具体形式为:

$$C(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} F(\beta_m) \cos(\beta_m x) e^{-D_m \beta_m^2 t}, \quad (11)$$

式中, $F(\beta_m)$ 是关于 β_m 的函数, 由式(12)计算可得:

$$F(\beta_m) = \frac{2(\beta_m^2 + H^2)}{L + (\beta_m^2 + H^2) + H} \left[\int_0^L \cos(\beta_m x') C_0(x') dx' + h_m \cos(\beta_m L) \int_0^t e^{D_m \beta_m^2 \tau} C_\infty(\tau) d\tau \right]. \quad (12)$$

集水池水面单位面积恶臭气体的散发速率的具体形式为:

$$\dot{m}(t) = -D_m \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=L} = D_m \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m F(\beta_m) \sin(\beta_m L) e^{-D_m \beta_m^2 t}. \quad (13)$$

集水池水面单位面积恶臭气体的累计散发量的具体形式为:

$$m(t) = \int_0^t -D_m \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x=L} dt = \int_0^t D_m \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m F(\beta_m) \sin(\beta_m L) e^{-D_m \beta_m^2 t} dt. \quad (14)$$

泵房空气中恶臭气体浓度平衡方程为:

$$\frac{dC_\infty(t)}{dt} \cdot V = A \cdot \dot{m}(t) - Q \cdot C_\infty(t) = AD_m \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m F(\beta_m) \sin(\beta_m L) e^{-D_m \beta_m^2 t} - Q \cdot C_\infty(t), \quad (15)$$

式中, A 为散发面积, m^2 ; V 为室内体积, m^3 ; Q 为室内换气速率, m^3/s .

根据有限差分方法, 式(15)可以离散为:

$$\frac{C_\infty(t^{n+1}) - C_\infty(t^n)}{\Delta t} \cdot V = A \cdot \dot{m}(t^n) - Q \cdot C_\infty(t^n), \quad (16)$$

式中, t^{n+1} 、 t^n 分别为两个紧邻的离散时刻, Δt 为时间步长, 整理得离散格式为:

$$C_\infty(t^{n+1}) = (1 - Q\Delta t/V) C_\infty(t^n) + A\Delta t V / \dot{m}(t^n), \quad (17)$$

$$C_\infty(0) = C_0, \dot{m}(0) = D_m \sum_{m=1}^{\infty} \beta_m F(\beta_m) \sin(\beta_m L). \quad (18)$$

2 泵站臭气浓度分布规律求解

一般来说,对于集水池恶臭气体的扩散问题,主要集中研究室内恶臭气体的浓度、水面恶臭气体的浓度、恶臭气体的散发速率以及恶臭气体的散发总量随时间的变化关系. 为了探讨以上问题,假定:集水池的有效深度 $L=2\text{ m}$,水面面积 $A=68.39\text{ m}^2$,室内有效空间 $V=400\text{ m}^3$,室内换气速率 $Q=3\times 400\text{ m}^3/\text{h}$;对流传质系数 $h_m=2.3\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{h}$,扩散传质系数 $D_m=4.5\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$,分离系数 $K=1\ 500$;室内初始恶臭气体浓度 $C_\infty(0)=3.0\text{ mg}/\text{m}^3$,污水恶臭气体呈均匀分布,初始浓度 $C_0(x)=9\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$,模拟时长 $\text{Time}=6\times 3\ 600\text{ s}$.

图 3 为以上已知参数条件下求解得出的室内恶臭气体的浓度、水面恶臭气体的浓度、恶臭气体的散发速率以及恶臭气体的散发总量随时间的变化关系. 由图 3 可知,由于室内存在通风且新风不含恶臭气体,通风带走的恶臭气体总量超过污水散发的总量,于是室内恶臭气体的浓度随时间迅速减小. 水气界面边界层内的恶臭气体与室内恶臭气体存在浓度差,在对流传质的作用下,其浓度从初始值 $9\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$ 随时间逐渐降低,6 h 后浓度下降至约 $1\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$. 恶臭气体的散发速率主要由水气界面两侧的浓度差决定,刚开始时,对流传质的驱动势最高,散发速率最大(约 $0.5\text{ mg}/\text{s}$),随之浓度差随时间逐渐减小,经过约 1 h,散发速率下降为初始值的 1/2 并趋于平缓. 恶臭气体的散发总量由散发速率在散发时间内的积分值来计算,刚开始散发总量迅速增大,随着散发速率的减小,散发总量增速逐渐缓慢,经过约 1 h,累计散发总量值约为 $1\ 000\text{ mg}$,随后缓慢上升,6 h 后散发总量超过 $3\ 000\text{ mg}$.

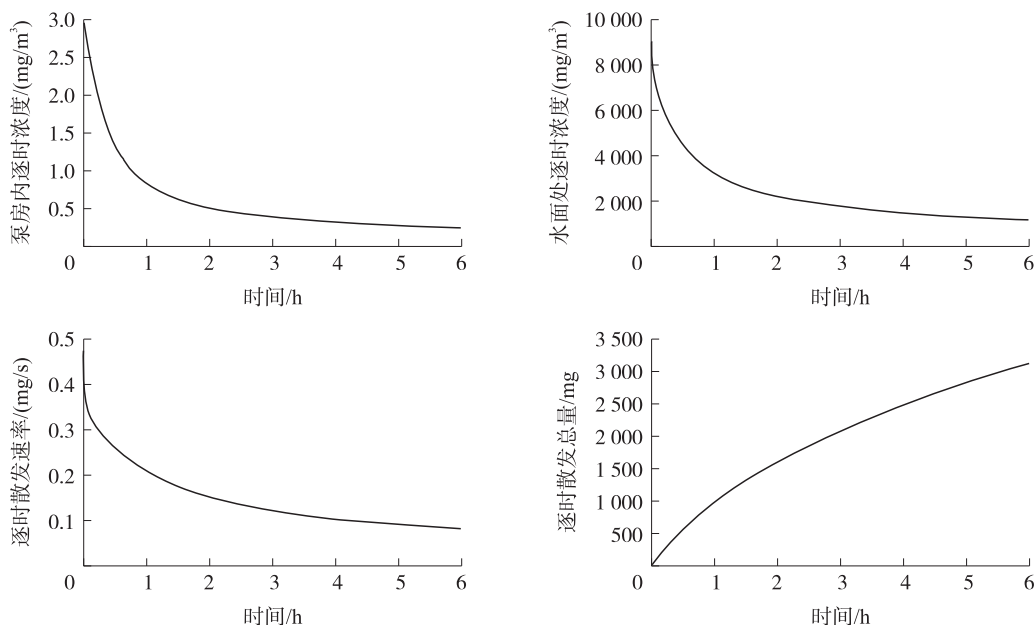


图 3 室内浓度、水面浓度、散发速率以及散发总量随时间的变化关系

Fig. 3 The relationship between indoor concentration, water surface concentration, emission rate and total emission quantity over time

3 泵站臭气散发规律影响因素分析

根据泵站臭气传质数学模型分析,泵站臭气散发规律的影响因素和室内换气速率值、恶臭气体初始浓度值、扩散传质系数值、对流传质系数值、分离系数值有关. 本节将改变部分参数,讨论在该参数条件下恶臭气体的扩散规律随时间的变化关系.

3.1 室内换气速率的影响

图 4 为室内换气速率值变化对恶臭气体扩散规律的影响关系图. 在通风条件下,室内恶臭气体的浓度、水气界面边界层内的恶臭气体浓度和恶臭气体的散发速率随时间逐渐减小,其中换气速率越大,初始阶段恶臭气体的浓度下降得越快,达到稳定浓度值所需的时间越短,最后缓慢趋近于同一值. 对于不通风条件,室内恶臭气体的浓度随着水气界面两侧的浓度差的减小逐渐趋于一个稳定值;水气界面边界层的恶臭浓度在很短的时间内(约 0.5 h)下降至约 $6\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$,并基本保持不变;散发速率在很短的时间内(约 1 h)下降至一

个非常小的值并基本保持不变. 恶臭气体的散发总量在 0.5 h 内增加至约 400 mg, 随后基本保持不变.

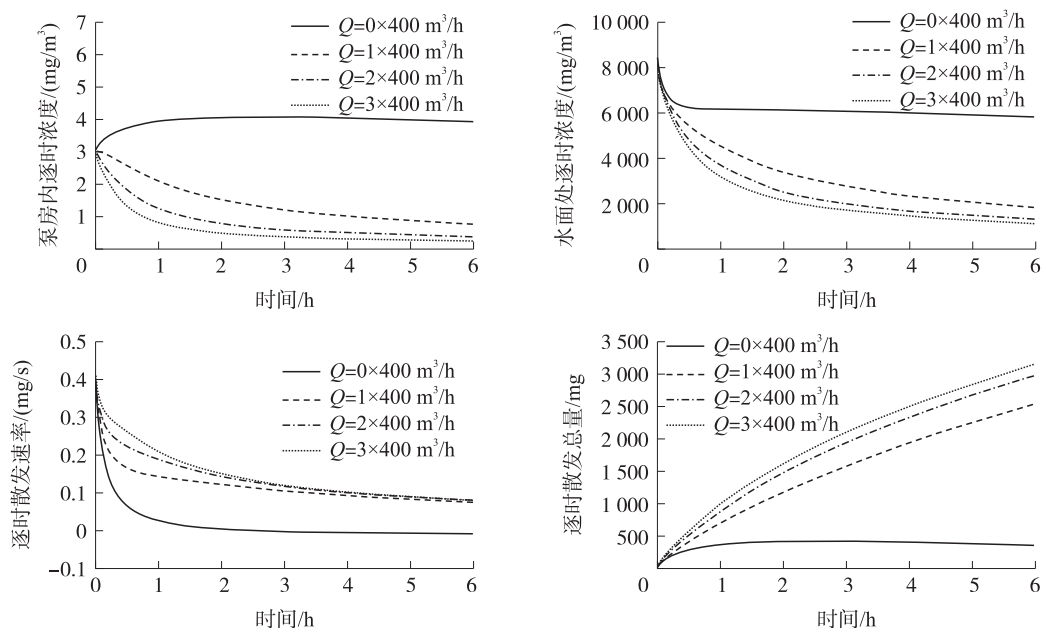


图 4 室内换气速率对逐时扩散规律的影响

Fig. 4 The influence of the indoor air exchange rate on the hourly diffusion law

3.2 恶臭气体初始浓度的影响

图 5 为恶臭气体初始浓度值变化对恶臭气体扩散规律的影响关系图. 室内恶臭气体的浓度随时间的增大逐渐减小, 初始阶段室内恶臭气体的浓度下降得越慢, 达到稳定的浓度值所需的时间越长, 最后缓慢趋近于同一浓度值 (约 $0.25 \text{ mg}/\text{m}^3$) 并基本保持不变. 污水恶臭气体初始浓度越大, 水气界面边界层内的恶臭气体浓度就越高, 而达到稳定的浓度值所需的时间相差不大, 最后缓慢趋近于同一浓度值 (约 $1000 \text{ mg}/\text{m}^3$) 并基本保持不变. 恶臭气体的散发速率最后缓慢趋近于同一散发速率 (约 $0.1 \text{ mg}/\text{s}$) 并基本保持不变. 恶臭气体的散发总量随时间的增大逐渐增大, 恶臭气体的散发总量越高, 达到稳定的散发总量所需的时间越短.

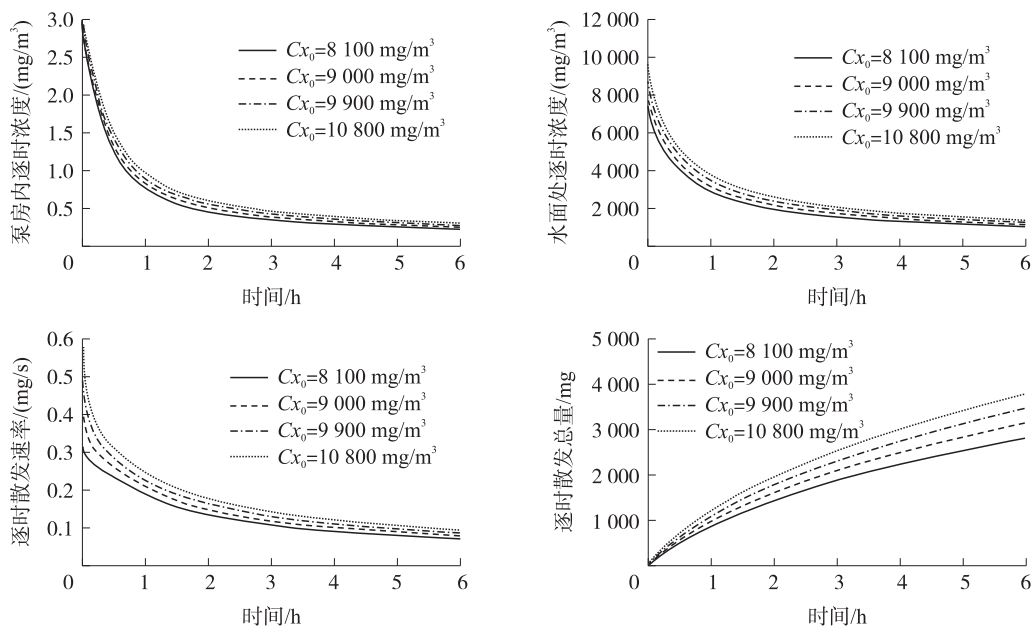


图 5 污水恶臭气体初始浓度对逐时扩散规律的影响

Fig. 5 The influence of the initial concentration of odorous gas on the hourly diffusion law

3.3 扩散传质系数的影响

图 6 为扩散传质系数变化对恶臭气体扩散规律的影响关系图. 扩散传质系数越大, 室内恶臭气体的浓度值越高且下降速度越慢, 达到稳定的浓度值所需的时间也就越长, 经过相当长时间后缓慢趋近于同一个浓度值并基本保持不变. 水气界面边界层内的恶臭气体浓度越高, 达到稳定的浓度值所需的时间也就越长, 经过相当长时间后缓慢趋近于同一个浓度值并基本保持不变. 恶臭气体的散发速率越高, 下降速度越慢, 达到稳定的散发速率所需的时间也就越长, 经过相当长时间后缓慢趋近于同一个散发速率并基本保持不变. 恶臭气体的散发总量越高, 总量累计速度越快, 达到稳定的散发总量所需的时间也就越短, 经过相当长时间后缓慢趋近于同一散发总量并基本保持不变.

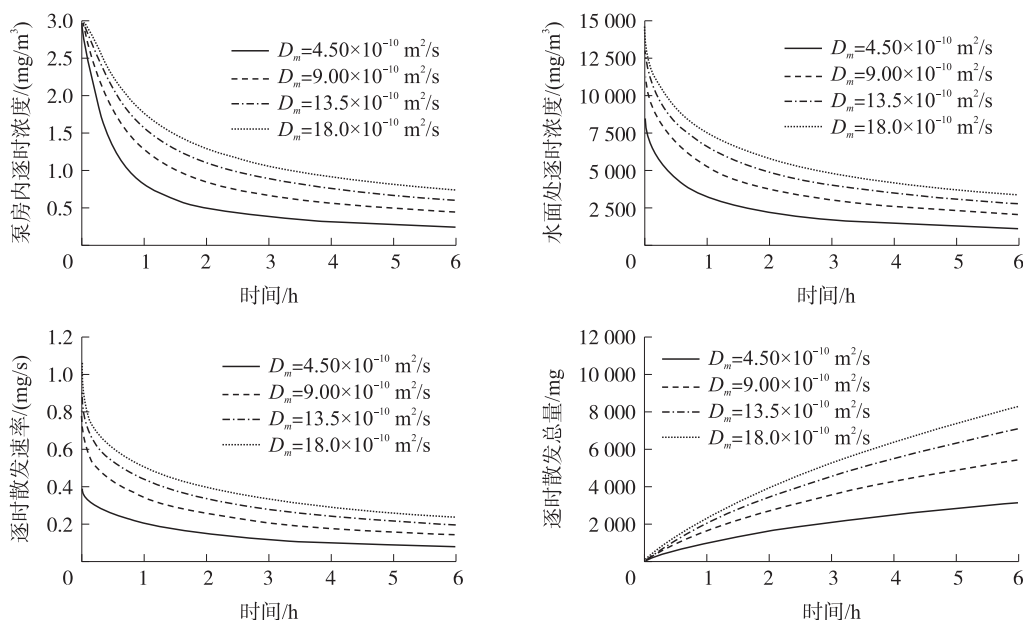


图 6 扩散传质系数对逐时扩散规律的影响

Fig. 6 The influence of the diffusion mass transfer coefficient on the hourly diffusion law

3.4 对流传质系数的影响

通过改变对流传质系数值, 可得不同对流传质系数条件下的恶臭气体扩散规律随时间的变化关系, 如图 7 所示. 对于不同的对流传质系数, 室内恶臭气体浓度随时间的增大逐渐减小, 其中对流传质系数越

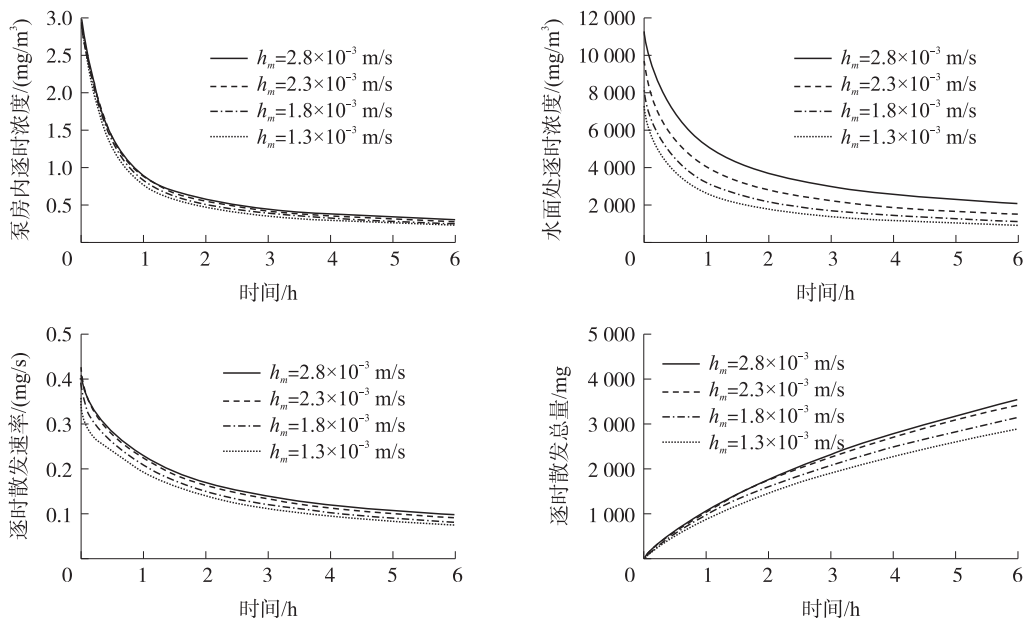


图 7 对流传质系数对逐时扩散规律的影响

Fig. 7 The influence of the convective mass transfer coefficient on the hourly diffusion law

大,室内恶臭气体的浓度值越高且下降速度越快,达到稳定的浓度值所需的时间也就越短,经过相当长时间后缓慢趋近于同一个浓度值并基本保持不变.水气界面边界层内的恶臭气体浓度随时间的增大逐渐减小,其中对流传质系数越大,水气界面边界层内的恶臭气体浓度越高,达到稳定的浓度值所需的时间也就越长,经过相当长时间后缓慢趋近于同一个浓度值并基本保持不变.恶臭气体散发速率随时间的增大逐渐减小,其中对流传质系数越大,恶臭气体的散发速率越大且下降速度越快,达到稳定的散发速率所需的时间也就越短,经过相当长时间后缓慢趋近于同一个散发速率并基本保持不变.恶臭气体散发总量随时间的增大逐渐增大,其中对流传质系数越大,恶臭气体的散发总量越高,总量累计速度越快,达到稳定的散发总量所需的时间也就越短,经过相当长时间后缓慢趋近于同一散发总量并基本保持不变.

3.5 分离系数的影响

图8为分离系数变化对恶臭气体扩散规律的影响关系图.其中分离系数越大,室内恶臭气体的浓度值越高,下降速度越慢,达到稳定的浓度值所需的时间也就越长,经过相当长的时间后缓慢趋近于同一个浓度值并基本保持不变.水气界面边界层内的恶臭气体浓度越大,达到稳定的浓度值所需的时间也就越长,经过相当长的时间后缓慢趋近于同一个浓度值并基本保持不变.恶臭气体的散发速率越高,下降速度越慢,达到稳定的散发速率所需的时间也就越长,经过相当长时间后缓慢趋近于同一个散发速率并基本保持不变.恶臭气体的散发总量越高,总量累计速度越快,达到稳定的散发总量所需的时间也就越短,经过相当长的时间后缓慢趋近于同一散发总量并基本保持不变.

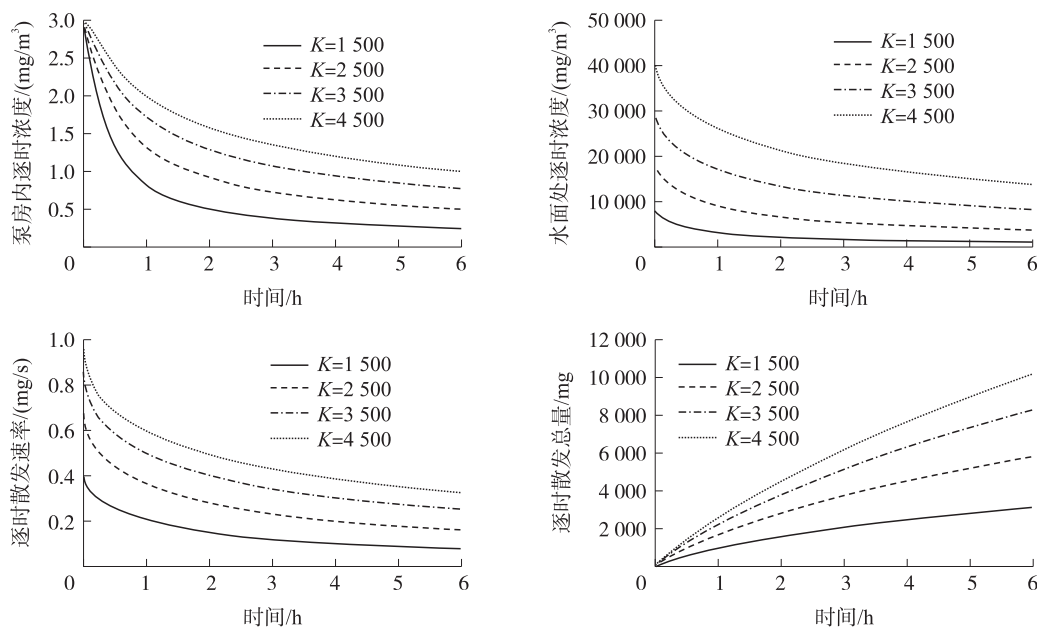


图8 分离系数对逐时扩散规律的影响

Fig. 8 The influence of the separation coefficient on the hourly diffusion law

4 结论

(1)建立了泵站臭气传质的数学模型,获得了污水中恶臭气体浓度的解析解以及集水池房间的臭气浓度.

(2)根据数学模型,求解得出了污水泵站臭气散发规律,即:室内恶臭气体的浓度、水面恶臭气体的浓度、恶臭气体的散发速率随时间逐渐减小,最后趋于稳定.恶臭气体的散发总量随着散发速率的增大而迅速增大,随着散发速率的减小而缓慢下降.

(3)由以上规律,求解分析出散发速率和散发量的影响因素:扩散传质系数值越小,池水表面对流传质系数值越小,换气速率值越大,界面分离系数值越小,污水中恶臭气体的初始浓度值越小,越利于室内恶臭气体浓度的降低.

[参考文献](References)

- [1] ESTRADA J M, KRAAKMAN N J, MUÑOZ R, et al. A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants[J]. *Environmental science and technology*, 2011, 45(3): 1100–1106.
- [2] 唐霞, 肖先念, 庞博, 等. 城镇污水厂除臭技术应用现状及发展前景概述[J]. *环境科技*, 2014, 27(2): 70–74.
TANG X, XIAO X N, PANG B, et al. A review on application status and development prospect of deodorization techniques in municipal sewage treatment plant[J]. *Environmental science and technology*, 2014, 27(2): 70–74. (in Chinese)
- [3] 郭静, 梁娟, 匡颖, 等. 污水处理厂恶臭污染状况分析与评价[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(2): 78–79.
GUO J, LIANG J, KUANG Y, et al. Analysis and appraisal on offensive odor situation occurring in wastewater treatment plant[J]. *China water and wastewater*, 2002, 18(2): 78–79. (in Chinese)
- [4] 刘锴, 何群彪, 屈计宁. 城市污水处理厂臭气问题分析与控制[J]. *上海环境科学*, 2003(增刊2): 4–7.
LIU K, HE Q B, QU J N. Odour analysis and control in sewage treatment plant[J]. *Shanghai environmental sciences*, 2003 (Suppl. 2): 4–7. (in Chinese)
- [5] 席劲瑛, 胡洪营, 罗彬, 等. 城市污水处理厂主要恶臭源的排放规律研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(21): 99–103.
XI J Y, HU H Y, LUO B, et al. Odorants emission characteristics in a municipal wastewater treatment plant[J]. *China water and wastewater*, 2006, 22(21): 99–103. (in Chinese)
- [6] FRECHEN F B. Odour emission inventory of German wastewater treatment plants—odour flow rates and odour emission capacity[J]. *Water science and technology*, 2004, 50(4): 139–146.
- [7] 刘锴, 白登明. 污水处理系统臭气污染问题的研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(5): 38–42.
LIU K, BAI D M. Research on odor from sewage treatment systems[J]. *Techniques and equipment for environmental pollution control*, 2004, 5(5): 38–42. (in Chinese)
- [8] 睦光华, 李建军, 孙国萍. 城市污水处理厂恶臭污染源调查与研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(3): 399–402.
SUI G H, LI J J, SUN G P. Investigation of odor pollution in a municipal wastewater treatment plant[J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2008, 2(3): 399–402. (in Chinese)
- [9] 王令, 丁忠浩. 恶臭污染分析及防治技术[J]. *工业安全与环保*, 2005, 31(3): 28–30.
WANG L, DING Z H. Analyses on malodor pollution and the preventive techniques for it[J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2005, 31(3): 28–30. (in Chinese)
- [10] 邹凯旋, 张勇强. 恶臭污染现状与处理技术[J]. *现代农业科技*, 2007, 457(11): 203–205.
ZOU K X, ZHANG Y Q. Current situation and treatment technology of odor pollution[J]. *Modern agricultural science and technology*, 2007, 457(11): 203–205. (in Chinese)
- [11] AOKI S, SUGIMOTO H, BAMBA D. Analysis of odor compounds in sewerage process water and deodor methods[J]. *Journal of Japan society on water environment*, 2004, 27(10): 643–649.
- [12] 刘晗, 张培玉, 于春燕. 城市污水处理厂的大气污染治理技术[J]. *环境工程*, 2009, 27(3): 75–78.
LIU H, ZHANG P Y, YU C Y. Air contamination and its treatment technology of wastewater treatment plant[J]. *Environmental engineering*, 2009, 27(3): 75–78. (in Chinese)
- [13] 石磊, 耿静, 徐金凤, 等. 欧洲的恶臭污染法规及测试技术进展[J]. *城市环境与城市生态*, 2004(2): 20–21.
SHI L, GENG J, XU J F, et al. Odor regulation and progress of odor measurement in Europe[J]. *Urban environment and urban ecology*, 2004(2): 20–21. (in Chinese)
- [14] MAHIN T D. Comparison of different approaches used to regulate odours around the world.[J]. *Water science and technology*, 2001, 44(9): 87–102.
- [15] 包景岭, 邹克华, 王连生. 恶臭环境管理与污染控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
BAO J L, ZOU K H, WANG L S. Management of odorous environment and pollution control [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]