

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.02.008

光触媒降解室内甲醛的影响因素研究

胡秋明¹, 武雪梅²

(1. 融创华北发展集团有限公司, 天津 300450; 2. 中国建筑第八工程局有限公司华北公司, 天津 300450)

摘要:通过分析室内装修中污染的现状, 指出用光触媒降解甲醛的优越性。采用实验研究了光照种类和强度、温度、湿度及喷涂面积对光触媒降解甲醛的影响。结果表明: 强的紫外线光照、大的喷涂面积、高温能促进光触媒降解甲醛, 而高湿度不利于光触媒降解甲醛。

关键词:光触媒; 甲醛; 降解; 因素

中图分类号:X131.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-0062(2020)02-0050-07

Study on the Influencing Factors of Photocatalytic Degrading Formaldehyde Indoor

HU Qiuming¹, WU Xuemei²

(1. Sunac North China Development Group Co. Ltd., Tianjin 300450, China; 2. China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd. (Huabei), Tianjin 300450, China)

Abstract: The advantages of photocatalytic degrading formaldehyde were pointed out by analyzing the current situation of pollution in interior decoration. The effects of light type and intensity, temperature, humidity and spraying area on the degradation of formaldehyde by photocatalyst were studied with experiment. The results showed that strong ultraviolet light, large spraying area and high temperature could promote the degradation of formaldehyde by photocatalyst, while high humidity could not.

key words: photocatalytic; formaldehyde; degradation; factor

0 引言

近年来,随着生活水平的提高,人们室内环境

的舒适性追求越来越高,各种豪华装饰材料层出不穷。而这些建筑材料中大部分含有以甲醛为代表的大量污染物,能够持续释放,累计超过某一限

收稿日期:2019-05-10

基金项目:河北省科技厅资助项目(14964206D-07);河北省教育厅科学技术处资助项目(QN2014064)

作者简介:胡秋明(1990-),男,工程师,硕士,主要从事室内空气净化关键技术方面的研究。E-mail:huqiuming1990@163.com

定值后,室内空气污染随之产生^[1-2]。有关调查数据表明,人每天有一半以上的时间在室内度过,室内环境严重影响人的身心健康和工作效率^[3-4]。根据相关研究,甲醛等室内污染物将作用于人体呼吸系统、神经系统及免疫系统,将产生气管炎、哮喘等症状,严重的将引发致脑瘫、白血病及癌症等重大疾病^[5-6]。另外,甲醛是室内空气最重要的污染物之一,已经被国际相关机构(World Health Organization 和 American Red Cross)认定为 I 类致癌物和致畸物,是公认的变态反应源^[7]。由此可见,如何去除甲醛等室内空气污染物显得十分重要。

光触媒作为一种新型空气污染物处理产品,具有全面性、持续性、安全性、高效和节能性,其操作简单、处理效果佳且无二次污染,被公认为降解室内污染的理想材料^[8-9]。目前,对于光触媒的相关研究较多^[10-13],大部分体现在其作用特性和效果方面,而涉及到光触媒降解室内甲醛的影响因素研究尚不太全面^[14-15],有待进一步深入。本文

通过正交实验法设计了实验方案,研究了光照种类和强度、温度、湿度及喷涂面积对光触媒降解甲醛的影响。

1 实验设备及方法

1.1 实验材料和设备

主要实验材料和设备如表 1 所示。实验在模拟气候舱中进行,其装置示意图详见图 1,主要由敞口玻璃箱、水浴、气候舱、光触媒喷涂板、灯光、加热装置、电风扇及相关测试仪器组成。其中,敞口玻璃箱与气候舱之间充满水,由数显加热棒来控制水温。气候舱中布置了若干光触媒喷涂板,使用可调移液枪向气候舱中注入甲醛溶液,作为甲醛释放源。气候舱中电风扇可以让甲醛在舱内流通均匀,同时让气候舱中的每个位置的空气参数均相同。通过甲醛检测仪来测定气候舱中的甲醛浓度。气候舱连接了自动加湿器,以控制气候舱中的空气湿度。除此之外,在气候舱中设置了温湿度计,用来测定气候舱中的温度和湿度。

表 1 主要实验材料和设备
Table 1 Main experimental materials and equipment

序号	名称	特性	作用
1	气候舱	1 m×1 m×1 m(长×宽×高)	实验容器
2	光触媒喷液	纳米二氧化钛,质量浓度为 1.6%	降解甲醛
3	甲醛溶液	质量浓度为 3%	甲醛来源
4	数显加热棒	型号:HS-4 自控范围:-10℃~90℃ 精度:±0.01℃	控制水浴温度
5	电风扇	功率:10 W	加快空气流动
6	甲醛检测仪	型号:INTERSCAN 便携式 4160 范围:0~26.77 mg/m ³ 精度:0.01 mg/m ³ ,响应时间:60 s,带数显功能	测试甲醛浓度
7	温湿度计	型号:TES-1360,范围:温度-10℃~90℃,湿度 10%~99%RH 精度:温度 0.1℃,湿度 0.1%RH	测试气候舱温度和湿度
8	自动加湿器	型号:HUMOR 20,加湿量:6 kg/h,可调范围:10%~95%RH 精度:0.1%RH,误差:0.1%RH,功率:100 W	控制气候舱湿度
9	喷涂板	0.4 m×0.4 m(长×宽),每个面积为 0.16 m ² ,带有凹槽	喷涂光触媒
10	日光灯	额定功率分别为 15 W、20 W、25 W、30 W	照射催化
11	紫外线灯	额定功率分别为 15 W、20 W、25 W、30 W	照射催化
12	可调移液枪	型号:DL-10 量程:2~10 mL,精度:0.1 mL	注入甲醛溶液

1.2 实验方法

1.2.1 实验方案

考虑到甲醛的自然挥发,在实验中分别设置实验舱和对照舱。其中对照舱中不喷涂光触媒,作为对照实验。采用正交实验法,通过改变单一变量,而控制其他条件不变,研究其影响结果。本实验中,分别改变光照种类(日光灯和紫外线

灯)、光照强度(15 W、20 W、25 W 及 30 W)、实验舱温度(10℃、20℃、30℃及 40℃)、实验舱湿度(30% RH、40% RH、50% RH 及 60% RH)、光触媒喷涂面积(0.16 m²、0.32 m²、0.48 m²及 0.64 m²),测试在不同条件下实验舱及对照舱的甲醛浓度,从而研究光照种类和强度、温度、湿度及喷涂面积对光触媒降解甲醛的影响。具体实验设置条件如

表 2 所示。考虑到现实生活中室内一般都使用日光灯这一实际情况,所以,在研究光照强度、温度、

湿度及喷涂面积的影响时,均采用日光灯照射。

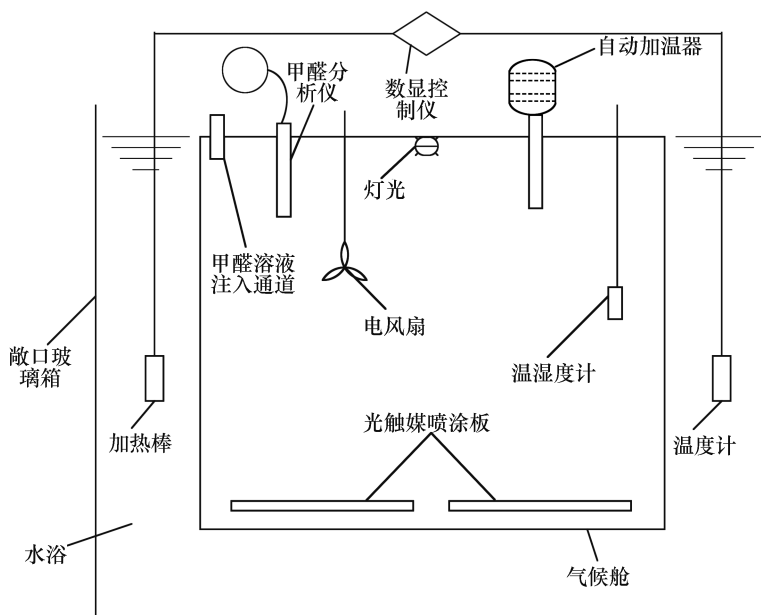


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device

表 2 实验设置条件

Table 2 Experimental conditions

参数	实验值
光照种类	日光灯, 紫外线灯
光照强度 L/W	15, 20, 25, 30
温度 $T/^\circ\text{C}$	10, 20, 30, 40
湿度 H	30% RH, 40% RH, 50% RH, 60% RH
喷涂面积 A/m^2	0.16, 0.32, 0.48, 0.64

由于在本实验中,共用实验舱进行研究,为了消除上一次实验的影响,在进行下一次实验前,均对实验舱以及各种设备和材料进行清洗干净处理,以避免产生较大误差,从而保证实验数据的准确性。

1.2.2 甲醛和光触媒用量

根据我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)的规定^[16],室内甲醛质量浓度限值为 $0.1 \text{ mg}/\text{m}^3$,同时,考虑到一般室内装修后甲醛浓度特征^[17],所以,每次实验加入甲醛的量均为 100 mL。

另一方面,根据光触媒降解甲醛反应原理,为了使实验舱中甲醛在理论上全部被光触媒降解,则气候舱中光触媒每次喷涂量为 200 mL。

1.2.3 甲醛降解率的计算

在实验的过程中,每隔 1 个小时分别检测实验舱和对照舱中的甲醛质量浓度,持续测试 12 h。则甲醛降解率的计算公式为:

$$W = \frac{Q_k - Q_s}{Q_k} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Q_k 为对照舱中甲醛体积浓度, Q_s 为气候舱中甲醛体积浓度。

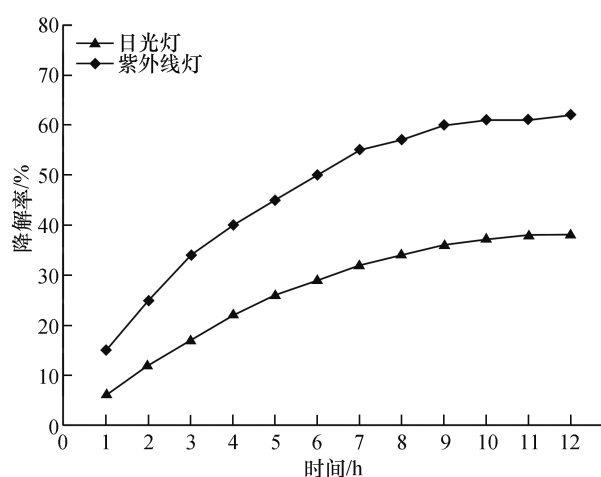
2 实验结果及分析

2.1 光照种类对光触媒降解甲醛的影响

在气候舱中分别使用 20 W 日光灯和紫外线灯照射,其它实验条件在图 2 下方已标明(下同),每隔 1 个小时检测甲醛浓度,计算得到的甲醛降解率变化情况如图 2 所示。从图 2 中可以得知:在紫外线灯的照射下,光触媒降解甲醛的效果明显高于日光灯,甲醛降解率在 10 h 时趋于稳定。

这是因为在光触媒降解甲醛的过程中,光照的效力是催化引发反应的进行和提供足够的能量。当射入光子本身携带的能量大于光触媒禁带宽度的能量时,处于价带状态的电子被激发,飞跃

到导带,此时价带上会出现一个空穴^[18]。由于这个过程是在光照的情况下发生的,所以把产生的电子-空穴对又称为光生载流子。如果要在光照的条件下使得光触媒产生光生载流子,就需要继续飞跃一个带隙,这个过程中消耗约 3.2 eV 的能量。常用的光照波长在 200 nm 至 780 nm 之间,其中紫外线光波长较短(小于 388 nm),根据能量与波长的关系可知,紫外线光具有更高的能量^[19]。因此,紫外线光更能激发光触媒产生具有超强氧化还原能力的光生载流子,从而促进对甲醛的降解作用。相比之下,其它光照能量低,对光触媒的催化作用效果不佳^[20-21]。所以在紫外线灯的照射下,甲醛降解效率比较高。



温度 20 ℃, 湿度 50% RH, 光照强度 20 W, 喷涂面积 0.48 m²

图2 不同光照种类下的甲醛降解率

Fig. 2 The degradation rate of formaldehyde under different light types

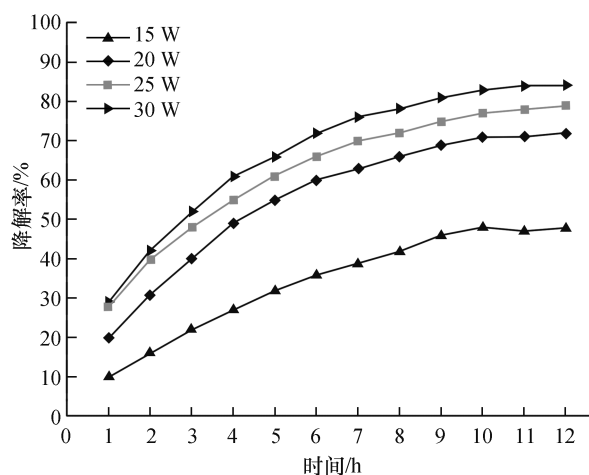
2.2 光照强度对光触媒降解甲醛的影响

在气候舱中,分别使用 15 W、20 W、25 W 和 30 W 的日光灯照射,计算得到的甲醛降解率如图 3 所示,可以看出,光照强度影响光触媒降解甲醛,随着光照强度的增加,甲醛的降解率不断增大,在 10 h 时基本达到平稳。

这是由于反映初始甲醛浓度较高,与光触媒表面接触的机会越多,反应速度越快,甲醛降解量越大,经过一段时间反应后,甲醛浓度变低,与催化剂表面接触的几率减小,反应越慢,此时,甲醛降解率的曲线趋于平缓。

根据光触媒光催化原理,光触媒在光照条件下产生羟基自由基,而羟基自由基的寿命很短,只有足够多的羟基自由基连续补充,才能维持光触

媒的反应进行,而在强的光照下,有足够的能量激活光触媒生成更多的羟基自由基^[22-23]。所以,甲醛的降解率与光照强度成正相关。另一方面,随着光照强度的增大,甲醛的降解率并不是成正比例升高,而升高速率明显减小,这是由于当光照超过光触媒降解甲醛反映过程中的能量需求后,光照强度不再是影响其反应进行的主要因素^[24]。



日光灯, 温度 20 ℃, 湿度 50% RH, 喷涂面积 0.48 m²

图3 不同光照强度下的甲醛降解率

Fig. 3 The degradation rate of formaldehyde under different light intensity

2.3 温度对光触媒降解甲醛的影响

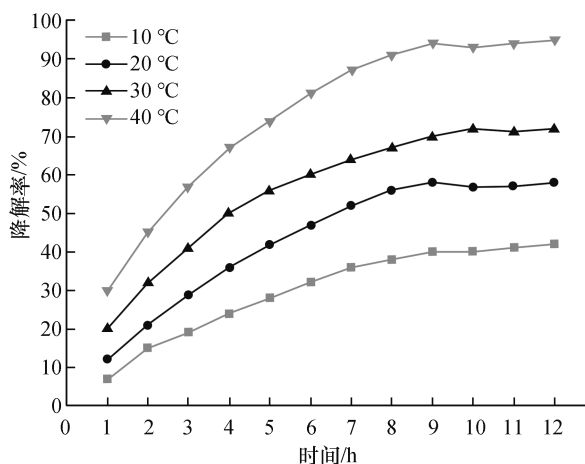
在实验中,通过使用加热棒控制水浴温度,从而达到调节气候舱内温度的目的。设置的温度分别为 10 ℃、20 ℃、30 ℃及 40 ℃,控制其它条件不变,计算得到的甲醛降解率如图 4 所示。由图 4 可知:温度越高,光触媒对甲醛的降解效果越好。在 40 ℃的条件下,甲醛降解率可达到 95%。

这是由于温度越高,甲醛分子运动越快,从而增大与光触媒的碰撞次数,加快催化反应速度。另一方面,高温会促使光触媒产生更多的自由基超氧离子,提升了光催化反应速率^[25]。在 40 ℃的条件下,当反应时间达到 9 h 后,甲醛的降解率趋于平稳,相比其它实验结果,表明高温减少了光触媒降解甲醛的时间。

2.4 湿度对光触媒降解甲醛的影响

通过使用加湿器调节气候舱内湿度,分别计算在湿度为 40%、50%、60% 和 70% 条件下的甲醛降解率如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着湿度的升高,甲醛的降解率呈现先增大后减小的趋势,在湿度为 60% 时,甲醛的降解率达到最大,

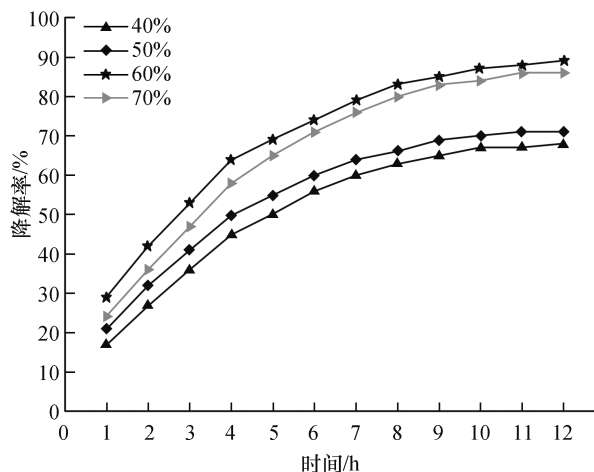
此时,若再增大湿度,将对甲醛的降解产生不利影响。



日光灯,光照强度 20 W,湿度 50% RH,喷涂面积 0.48 m²

图 4 不同温度下的甲醛降解率

Fig. 4 The degradation rate of formaldehyde under different temperature



日光灯,光照强度 20 W,温度 20 °C,喷涂面积 0.48 m²

图 5 不同湿度下的甲醛降解率

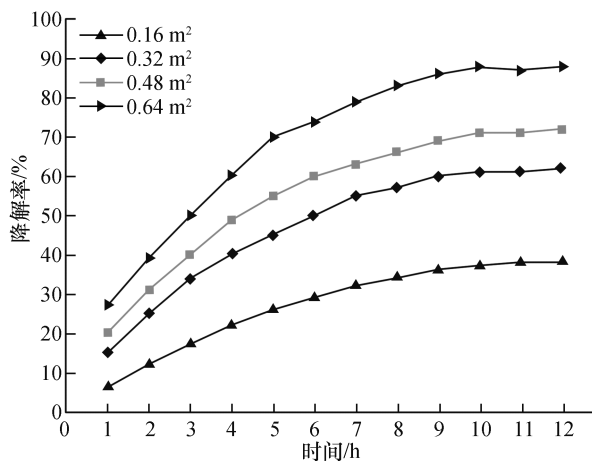
Fig. 5 The degradation rate of formaldehyde under different humidity

这是由于水分子能够促成光触媒在降解甲醛的过程中捕获价带上空穴,从而产生羟基自由基,以加快甲醛降解。在这个过程中,水分子和甲醛分子都与光触媒表面的羟基结合,水分子通过氢键结合,甲醛则是弱键能吸附,而光触媒表面有限,即吸附点位过少,所以水分子和甲醛分子之间存在吸附竞争关系^[26]。当湿度超过一定值以后,过多的水分子与即将参加反应的甲醛分子会竞相在光触媒表面吸附。另一方面,水分子在光触媒

表面与羟基结合形成强氢键,进而在光触媒表面吸附成一层薄薄的水膜,它相当于一道物理屏障,有效地阻挡了甲醛分子与光触媒表面接触^[27-29]。所以,光触媒降解甲醛的过程需要适宜的湿度条件,从而达到降解甲醛的最佳效率。从本实验来看,湿度为 60% 时,适合光触媒降解甲醛的反应。

2.5 喷涂面积对光触媒降解甲醛的影响

在实验过程中,取 100 mL 光触媒喷液,分别均匀喷涂在 1 块喷涂板 (0.16 m²)、2 块喷涂板 (0.32 m²)、3 块喷涂板 (0.48 m²) 和 4 块喷涂板 (0.64 m²) 上,控制其它条件不变,放入气候舱中,计算的甲醛降解率如图 6 所示。根据图 6 可知:甲醛的降解率与光触媒的喷涂面积成正比,喷涂面积越大,甲醛降解越快。



日光灯,光照强度 20 W,温度 20 °C,湿度 50% RH

图 6 不同喷涂面积下的甲醛降解率

Fig. 6 The degradation rate of formaldehyde under different spraying area

这是由于光触媒与甲醛的接触面积影响其催化反应,光触媒的喷涂面积越大,甲醛与光接触的机会越多,在光触媒表面形成的光生电子和光生空穴越多,氧化能力越强,所以甲醛降解越快^[30-31]。随着光触媒的开发和研制,有关其表面积的研究将进一步提升光触媒的降解甲醛的能力。

3 结 论

光触媒降解甲醛的过程是一个催化反应过程,受到外界条件的影响较大。通过研究这些外界条件的影响,为后期光触媒的研究指明了方向。本文通过正交实验法研究了光照种类和强度、温

度、湿度及喷涂面积对光触媒降解甲醛的影响,得出以下结论:

1) 光照种类影响光触媒降解甲醛的效果,紫外线灯和日光灯相比,更具有明显促进光触媒对甲醛的降解作用;

2) 光触媒在强的光照强度下,对甲醛的降解率越高,但随着光照强度的增大,甲醛降解效果增强并不明显;

3) 温度越高,光触媒对甲醛的降解效果越好。在本实验中,温度为 40℃ 的条件下,甲醛的降解率可达 95%;

4) 随着湿度的升高,甲醛的降解率呈现先增大后减小的趋势,在湿度为 60% 时,甲醛的降解率达到最大,若再增大湿度,甲醛的降解率反而降低。这说明一味地增大环境湿度,并不一定对光触媒降解甲醛有利,在光触媒降解甲醛的过程中存在一个最适湿度;

5) 光触媒的喷涂面积对降解甲醛的反应有较大影响,喷涂面积越大,甲醛降解率越高,关于光触媒表面积的研究可进一步深入。

参考文献:

- [1] 李艳莉,尹诗,王宝妍. 室内甲醛对人体健康的危害[J]. 环境与职业医学,2004,21(增刊1):549-551.
- [2] 赵立峰. 室内甲醛污染对人体健康影响的研究[J]. 河南预防医学杂志,2019,30(1):78-80;88.
- [3] AOC H, LEE S C. Combination effect of activated carbon with TiO₂ for the photodegradation of binary pollutants at typical air level[J]. Journal of photochemistry and photobiology A: chemistry, 2004, 161(2/3):131-140.
- [4] 胡秋明. 建筑室内空气净化技术及其评价方法研究[J]. 山东工业技术,2019(11):101-102.
- [5] 岳伟,金晓滨,潘小川,等. 室内甲醛与成人过敏性哮喘关系的研究[J]. 中国公共卫生,2004,20(8):12-14.
- [6] 贾磊娜,丁文清,杨生秀,等. 室内甲醛污染与儿童哮喘关系的研究[J]. 科技信息,2012(35):436-437.
- [7] 杨建忠,王耀武. 室内甲醛检测方法和限定标准[J]. 毛纺科技,2003(4):55-58.
- [8] 王丽涛. 光触媒技术防治室内空气污染[J]. 辽宁大学学报(自然科学版),2006,33(2):124-126.
- [9] 杨华明,崔森. 光触媒净化技术的研究及其应用[J]. 中国消毒学杂志,2004,21(4):95-97.
- [10] 齐峰,李福林. 光触媒治理室内空气污染的实验研究[J]. 化学工程师,2010,24(8):44-46.
- [11] 谢昌平,王曙光,周彩楼,等. TiO₂ 光触媒降解甲醛影响因素的分析[J]. 天津城市建设学院学报,2011,17(2):132-134.
- [12] 刘伟,任玉杰,吕建,等. 光触媒降解室内甲醛的季节性实测研究[J]. 煤气与热力,2016,36(12):27-29.
- [13] 郭锐. 光触媒喷液净化空气污染的研究[D]. 北京:北京化工大学,2007:21-24.
- [14] 史乔升,汪光文,程湛,等. 光触媒技术原理与国内研究现状[J]. 科技视界,2017(1):14-15.
- [15] 彭丽婧,李宗伦,李凌. 纳米二氧化钛光催化降解室内甲醛气体的研究进展[J]. 大气与环境光学报,2017,12(2):93-99.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 室内空气质量标准:GB/T18883—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002:3-4.
- [17] SALTHAMMER T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings[J]. Building and environment, 2019, 150:219-232.
- [18] MAMAGHANI A H, HAGHIGHAT F, LEE C S. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art[J]. Applied catalysis B: environmental, 2017, 203:247-269.
- [19] ZHONG L, HAGHIGHAT F, BLONDEAU P, et al. Modeling and physical interpretation of photocatalytic oxidation efficiency in indoor air applications[J]. Building and environment, 2010, 45(12):2689-2697.
- [20] 曾红. 光触媒 TiO₂ 催化机理及空气净化方法探悉[J]. 重庆工学院学报,2006,20(8):66-68.
- [21] WANG Y, HE Y, LAI Q, et al. Fan, review of the progress in preparing nano TiO₂: An important environmental engineering material[J]. Journal of environmental sciences, 2014, 26(11):2139-2177.
- [22] VERBRUGGEN S W, MASSCHAELE K, MOORTGAT E, et al. Factors driving the activity of commercial titanium dioxide powders towards gas phase photocatalytic oxidation of acetaldehyde[J]. Catalysis science & technology, 2012(2):2311-2318.
- [23] ARAHA J, ALONSO A P, RODRIGUEZ J M D, et al. FTIR study of photocatalytic degradation of 2-propanol in gas phase with different TiO₂ catalysts[J]. Applied catalysis B: environmental, 2009, 89(1/2):204-213.
- [24] DOMINGUEZ S, RIBAO P, RIVERO M J, et al. Influence of radiation and TiO₂ concentration on the hydroxyl radicals generation in a photocatalytic LED reactor. Application to dodecylbenzenesulfonate degradation[J]. Applied catalysis B: environmental, 2015, 178:165-169.

(下转第 61 页)

境质量和健康风险,选址方案 A 优于方案 B。

4) 对燃煤电厂进行选址时应充分考虑人体健康风险,尽量选择简单地形、主导风向无环境敏感目标的区域。

参考文献:

- [1] CHEN L, LIANG S, LIU M D, et al. Trans-provincial health impacts of atmospheric mercury emissions in China[J]. *Nature communications*, 2019, 10(1):1484.
- [2] 孙阳昭,陈扬,蓝虹,等. 中国汞污染的来源、成因及控制技术路径分析[J]. *环境化学*, 2013, 32(6): 937-942.
- [3] 王璇. 火力发电厂选址研究[D]. 大连:大连海事大学, 2018.
- [4] MARIA A, ELENA F, GILBERT L. The capacity and distance constrained plant location problem[J]. *Computers and operations research*, 2007, 36(2): 597-611.
- [5] 乜璐. 模糊层次分析法在国华永州电厂选址中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学, 2015.
- [6] 王占武,唐凯,严良. 基于熵权 TOPSIS 法的火电厂选址综合决策[J]. *安全与环境工程*, 2011, 18(5): 103-106.
- [7] 马向春,焦红,陈巍,等. 基于粗糙集和多目标规划的火电厂优化选址[J]. *陕西电力*, 2013, 41(5): 58-61.
- [8] 杨多兴,杨木水,赵晓宏,等. AERMOD 模式系统理论[J]. *化学工业与工程*, 2005, 22(2): 130-135.
- [9] US EPA. User's guide for the AMS/EPA regulatory model-AERMOD[R]. US EPA, 2004: 6-7.
- [10] 杨军. AERMOD 模式在火电厂大气环境影响预测中的应用[J]. *环境影响评价*, 2013, 35(增刊1): 35-39.
- [11] 邓聪,邱飞,王健,等. AERMOD 在高原山地城市大气预测中的应用——以某电厂为例[J]. *环境科学导刊*, 2016, 35(6): 113-118.
- [12] 赵伟,范绍佳,谢文彰. AERMOD 和 CALPUFF 对沿海电厂烟气扩散模拟对比研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(3): 189-194.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 工业企业设计卫生标准: TJ36—79[S]. 北京:中国标准出版社, 1979: 2.
- [14] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 大气污染人群健康风险评估技术规范: WS/T 666-2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019: 1.
- [15] NG D K K, CHAN C H, SOO M T, et al. Low-level chronic mercury exposure in children and adolescents: meta-analysis[J]. *Pediatrics international*, 2007, 49(1): 80-87.
- [16] 汪芳琳. 兰州市大气环境中 VOCs 的污染特征及其健康风险评价[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
- [17] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (part A) [EB/OL]. (2013-05-29) <http://www.epa.gov/iris/search-keyword.htm>.
- [18] DOMINICI F, PENG R D, BELL M L, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases[J]. *JAMA: The journal of the American medical association*, 2006, 295(10): 1127-1134.
- [19] 康真,白宇娜,杨光锦,等. 哈尔滨市大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35(6): 504-507.

(责任编辑:扶文静)

(上接第55页)

- [25] OBEE T N, HAY S O. Effects of moisture and temperature on the photooxidation of ethylene on titania[J]. *Environmental science & technology*, 1997, 31(7): 2034-2038.
- [26] MARKOWICZ P, LARSSON L. Influence of relative humidity on VOC concentrations in indoor air[J]. *Environmental pollution and control*, 2015, 22(8): 5772-5779.
- [27] MAMAGHANI A H, HAGHIGHAT F, LEE C S. Photocatalytic degradation of VOCs on various commercial titanium dioxides: Impact of operating parameters on removal efficiency and by-products generation[J]. *Building and environment*, 2018, 138: 275-282.
- [28] 宋巍巍. 纳米二氧化钛光催化降解甲醛的相关评价[J]. *生物化工*, 2018, 4(6): 75-77; 83.
- [29] OBEE T N, BROWN R T. TiO₂ photocatalysis for indoor air applications: Effects of humidity and trace contaminant levels on the oxidation rates of formaldehyde, toluene, and 1,3-butadiene[J]. *Environmental science & technology*, 1995, 29: 1223-1231.
- [30] 丁晓勇,陈顺金,张红,等. 光触媒在实验室的应用和影响[J]. *现代检验医学杂志*, 2003, 18(6): 56-58.
- [31] MAMAGHANI A H, HAGHIGHAT F, LEE C S. Gas phase adsorption of volatile organic compounds onto titanium dioxide photocatalysts[J]. *Chemical engineering journal*, 2018, 337: 60-73.

(责任编辑:周泉)