

通风速率及源项特性对室内甲醛扩散规律的影响

杨小妮^{1,2}, 尚旭光³, 徐扬帆⁴, 王丹¹

(1. 西安建筑科技大学华清学院, 陕西 西安 710043; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 中节能西安启源机电装备有限公司, 陕西 西安 710018; 4. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:采用 Airpak 软件模拟研究在通风速率、源项强度和源项面积多因素作用下的室内甲醛扩散规律。结果表明, 在室内甲醛初始为零时, 源项散发甲醛后, 在 2 000 s 室内甲醛浓度升高较快, 之后处于平衡状态。在通风速率加倍时甲醛最高浓度降低 56%, 源项强度减半时甲醛最高浓度降低 16%, 源项散发面积减少 37% 时甲醛最高浓度降低 24%。说明通风速率对室内甲醛浓度的影响最大, 其次依次为源项散发面积和源项强度。

关键词:室内甲醛; 通风速率; 源项特性; 扩散规律

中图分类号: TU834; X512

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2020)02-0017-05

Influence of Ventilation Velocity and Source Characteristics on Indoor Formaldehyde Diffusion Law

YANG Xiao-ni^{1,2}, SHANG Xu-guang³, XU Yang-fan⁴, WANG Dan¹

(1. Huaqing College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710043, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 3. CECEP Xi'an Qiyuan Mechanical and Electrical Equipment, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: The influences of ventilation velocity, source intensity and emission area on indoor formaldehyde diffusion law were researched by Airpak software simulation. Results showed that in 2 000 seconds, formaldehyde concentration increased quickly from initial concentration of 0 mg/m³, then reached to balance. When the ventilation velocity doubled, the maximum concentration of formaldehyde decreased by 56%, as the source intensity decreased by half, the maximum concentration decreased by 16%, while the source emission area decreased by 37%, the maximum concentration reduced by 24%. It concluded that the ventilation velocity had the greatest impact on formaldehyde concentration, the next was emission areas, and the source intensity had the least influence.

Key words: Indoor formaldehyde; Ventilation velocity; Source characteristic; Diffusion law

人造板被普遍用于现代建筑室内装修, 其中的胶黏剂会释放甲醛, 其会对人体皮肤、黏膜等产生刺激和致敏作用, 甚至致癌。了解甲醛在室内的扩散规律, 有助于寻找出更高效的控制方法^[1-2]。以往, 学者们采用实验手段或数值模拟方法对环境中污染物扩散规律开展了相关研究^[3-4]。1974 年 Nielsen^[5]首次将 CFD 技术应用于室内空气流动模

拟。严彦等^[6]在环境气候舱内完成了 11 种木质人造板材甲醛释放量的研究, 得到甲醛释放浓度随时

收稿日期: 2019-01-04; 修订日期: 2020-01-02

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划基金资助项目 (16JK2092)

作者简介: 杨小妮 (1986—), 女, 陕西咸阳人, 讲师, 硕士, 主要从事室内污染物防治及控制研究。

间的变化规律。王牧日等^[7]模拟研究了不同通风速率时室内甲醛浓度的分布变化。岳高伟等^[8]采用 CFD 方法,研究不同通风方式、不同送风速度对室内甲醛浓度分布的影响。李晓庆等^[9]利用 Fluent 软件模拟了不同通风工况下室内甲醛浓度场和速度场分布。田太阳等^[10]采用 Airpak 软件研究了不同通风方式对某大型轮胎厂炼胶车间污染物的排出效果。张磊等^[11]采用 Fluent 模拟了不同气流组织对办公区域甲醛浓度分布的影响。吴迪^[12]采用 Airpak 模拟了不同通风和人造板封边时室内甲醛的分布和扩散状况。今在已有研究基础上,采用 Airpak 软件模拟通风速率、源项强度和源项面积 3 类工况下室内甲醛浓度分布,以期对多因素作用下的甲醛扩散规律进行更全面的对比研究,为控制室内甲醛污染提供科学合理的建议。

1 模型建立及计算条件

1.1 建筑物理模型

建筑物理模型尺寸为 10 m × 4.5 m × 3.3 m, 坐标原点 O(0,0), 其中衣柜、鞋柜、橱柜、电视柜和壁柜为室内甲醛主要释放源,位置分布及具体信息分别见图 1 和表 1。

1.2 计算条件

干建材 VOC 散发模型分为经验或半经验模型和传质模型。综合考虑,选择一阶衰减经验模型,即 $5.6 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ^[13-15],模拟过程中考虑到流速不高,故对空气压缩效应在计算时适当忽略,按不可压流体处理。假设天花板、地板及墙壁都是绝热状态。结合影响室内污染物扩散的因素,分别模拟不同通风速率、源项强度和源项面积 3 类工况(见表 2)下的室内甲醛浓度分布。

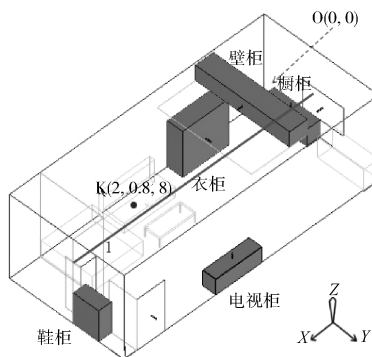


图 1 物理模型三维立体分布

Fig. 1 3D image of the physical model

表 1 物理模型各要素及源项信息

Table 1 Basic information of the physical model and the pollution resource

要素名称	(X_S, X_E)	(Y_S, Y_E)	(Z_S, Z_E)	散发面积 A/m^2
衣柜	(0,0.5)	(2.9,4.5)	(0.1,1.7)	2.56
鞋柜	(9.5,10)	(2.5,3.5)	(0,1.2)	0.60
橱柜	(0,0.5)	(0.4,2.2)	(0.1,0.7)	1.08
电视柜	(4.6,6.4)	(4,4.5)	(0,0.6)	1.08
壁柜	(2,2.7)	(0.8,4.5)	(2.6,3.2)	2.22
房间	(0,10)	(0,4.5)	(0,3.3)	
单窗户	(0,0)	(1.5,3.1)	(0.7,1.8)	
窗户 1	(0,0)	(1,1.8)	(0.7,1.8)	
窗户 2	(0,0)	(2.7,3.5)	(0.7,1.8)	
门	(8.3,9.5)	(4.5,4.5)	(0,2)	

表 2 模拟工况设定

Table 2 Simulation condition setting

工况	开窗数量 $n/\text{个}$	风速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	源项面积 A/m^2	源项强度/ [$\text{mg} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$]	
标准工况	Case0	1	1.6	7.54	$5.6 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$
通风速	Case1	1	0	7.54	$5.6 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$
率变化	Case2	1	3.2	7.54	$5.6 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$
	Case3	2	1.6	7.54	$5.6 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$
源项强	Case4	1	1.6	7.54	$1.12 \times 10^{-6} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$
度变化	Case5	1	1.6	7.54	$2.8 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$
源项面	Case6	1	1.6	6.94	$2.8 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$
积变化	Case7	1	1.6	4.72	$2.8 \times 10^{-7} e^{-7.47 \times 10^{-7} t}$

1.3 网格计算结果

结合房间尺寸,网格 X, Y 和 Z 方向最大尺寸分别定为 0.225 m、0.5 m 和 0.165 m,先后进行粗略和细密网格的划分。经计算,粗略网格参数报告如下:节点数 12 104,六面体网格数 10 266,四面体网格数 3 938,计算网格质量 3 个标准参数值分别为细长比 0.886 953、扭曲率 0.594 72、最小网格体积 $1.564 202 e^{-6} \text{ m}^3$ 。细密网格参数报告如下:节点数 89 917,六面体网格数 82 777,四面体网格数 15 318,计算网格质量 3 个标准参数值分别为细长比 0.991 112、扭曲率 0.888 877、最小网格体积 $1.531 01 e^{-6} \text{ m}^3$ 。均符合网格质量要求。

2 结果与讨论

2.1 特殊点处的甲醛浓度变化规律

今进行的是非稳态模拟,为了获得室内甲醛浓度随时间的变化规律,首先选择人员活动最频繁的点区域,即客厅 K(2,0.8,8)点(见图 1),模拟得到 0 s ~ 360 000 s 的甲醛质量浓度变化,见图 2。

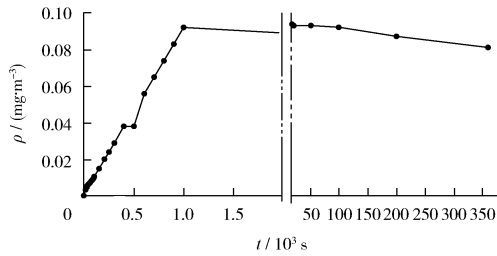


图 2 K 点处甲醛质量浓度随时间的变化

Fig.2 Formaldehyde concentration change with time at point K

由图 2 可见, K 点处的甲醛浓度经历了先增高后趋于平缓的过程。这是由于室内甲醛初始为零, 源项开始散发甲醛后, 其会较快聚集以致浓度升高, 尤其在前 2 000 s 的过程中呈现出持续增高趋势; 随着时间推移, 甲醛在室内气流的作用下与空气形成混合气体进行互扩散, 散发稳定后其在室内进行自扩散, 扩散趋势比较稳定。

2.2 全室的甲醛浓度分布规律

针对标准工况下的甲醛浓度分布作定性分析。首先, 在 X 方向 X = 3 m 和 X = 5.5 m 处进行模拟, 主要因为这两处位于客厅中央, 人员活动频繁, 其甲醛质量浓度分布分别见图 3(a)(b)。比较两图可见, X = 3 m 处, 靠近源项处的甲醛浓度明显高于其他区域, 且其他区域甲醛浓度较为均匀; 而 X = 5.5 m 处, 虽然靠近源项处的甲醛浓度明显高于其他区域, 但是随着距离源项越远, 其他区域的甲醛浓度呈现出逐渐降低趋势。此外, 结合两图可见, 沿 X 轴正方向距离增大时, 除了靠近源项处的甲醛浓度有明显变化外, 其他区域并未有明显变化

(两剖面的甲醛质量浓度均仅差 0.1 mg/m³)。

其次, 在 Y 方向 Y = 1.2 m 和 Y = 3 m 处进行模拟。其中 Y = 1.2 m 处是客厅沙发中心, Y = 3 m 处是房间中间最宽敞的地方, 这两处都是人员活动较频繁区域, 具有代表性。其甲醛质量浓度分布分别见图 3(c)(d)。由两图可见, 两剖面处甲醛质量浓度在 0.15 mg/m³ 左右。相比而言, Y = 3 m 处的甲醛浓度整体高于 Y = 1.2 m 处, 这是由于前者位置更靠近污染物散发源鞋柜、电视柜和衣柜。另外, 由于风速影响 Y = 3 m 剖面靠近窗户处的甲醛质量浓度最低, 仅为 0.03 mg/m³。

再次, 在 Z 方向选取 Z = 0.6 m 和 Z = 1.6 m 处进行模拟, 其分别是人员坐姿和站立时呼吸水平面所处的高度, 代表性突出。其甲醛浓度分布分别见图 3(e)(f)。由两图可见, 由于存在电视柜、鞋柜和衣柜等源项, 近地面 Z = 0.6 m 处的甲醛浓度略高于 Z = 1.6 m 处。靠近窗户区域甲醛浓度明显降低, 其他远离源项的区域甲醛浓度分布均匀。且由图 3(f) 也反映出, 电视柜和衣柜两处源项所产生的甲醛并未明显垂直扩散至较高区域。

此外, 由图 2 可见, 源项在释放出甲醛后, 较短时间内即能达到平衡状态, 故将研究重点放在关注甲醛扩散达到平衡状态时, 各工况下全室甲醛平均浓度(见图 4), 以便更直观地分析其影响因素。由图 4 可见, 在室内风速发生改变时, 全室甲醛浓度呈现出明显的变化, 源项散发面积发生改变时, 全室甲醛浓度变化趋势不显著。说明通风能够对室内甲醛的浓度分布造成较大影响。

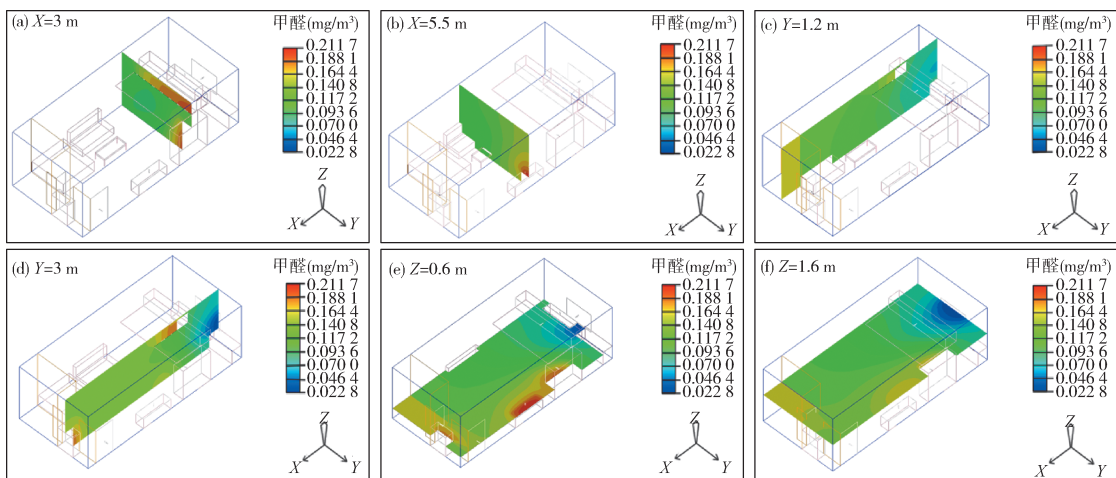


图 3 6 个典型剖面处的甲醛质量浓度分布

Fig.3 Distribution of formaldehyde concentration at six typical profiles

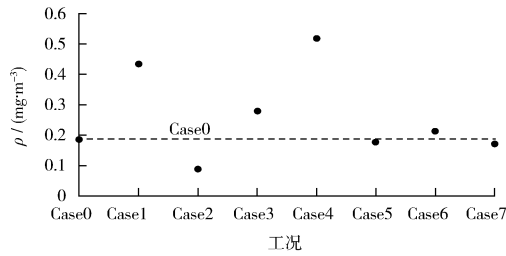


图 4 各工况下全室甲醛的稳态质量浓度

Fig. 4 Formaldehyde concentration at steady state in the room under each condition

2.3 特征线上的甲醛浓度变化规律

为确定各因素对甲醛扩散规律的影响程度,选择建筑模型中心线 1 上的 10 个点为特征线代表,即点 $(x, 2.25, 1.6)$, 间隔 1 m, 研究所有工况下不同时刻的甲醛浓度。考虑到短时间甲醛浓度未达稳定状态, 并结合图 2 特征点的分析结果, 选择 100 s、500 s、2 000 s 和 5 000 s 4 个时刻的甲醛浓度作对比分析, 分别见图 5(a)(b)(c)。

由图 5(a)可知, 当通风速率为 0 m/s 时, 室内甲醛浓度最高; 相比而言, 3.2 m/s 时, 室内甲醛浓度呈现出明显的降低趋势。图 5(b)反映出, 当源项强度足够大时, 室内甲醛浓度显著高于低源项强度时的浓度; 而当源项强度较小时, 可能受通风影响, 室内甲醛浓度差异不明显。由图 5(c)可知, 由源项种类变化导致其散发总面积变化时, 室内甲醛浓度差异不大, 说明除了源项面积的绝对值变化能够对室内甲醛浓度产生影响外, 源项所处位置差异亦会对甲醛的分布造成影响。图(5)整体反映出, 在 2 000 s 之前室内甲醛浓度处于上升趋势; 对比 2 000 s 和 5 000 s 时刻, 对应点的甲醛浓度差异不大; 此外, 两个时刻所有点的甲醛浓度变化规律相似, 进一步说明在 2 000 s 后, 甲醛扩散已达稳定状态。而且各工况 100 s 时刻的甲醛扩散规律最为相似, 原因在于, 虽然各工况在散发源强度或通风等条件等方面存在差异, 但这些差异在短时间内不易对室内甲醛浓度的分布造成较大影响。

图 6 为特征线 1 上的甲醛质量浓度分布。由图 6 可见, Case2、Case5、Case6 和 Case7 时室内甲醛浓度与 Case0 时相比有不同程度降低。对比 Case0 和 Case2, 通风速率加倍时, 甲醛最高浓度降低 56%; 对比 Case0 和 Case5, 源项强度减半时, 甲醛最高浓度降低 16%; 对比 Case0 和 Case7, 源项散发面积减少 37% 时, 甲醛最高浓度降低 24%。

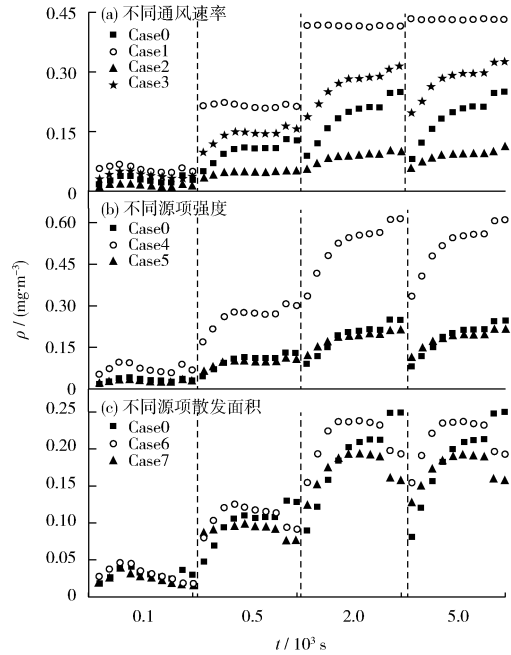


图 5 不同工况下 4 个时刻甲醛质量浓度分布

Fig. 5 Distribution of formaldehyde concentration at four moments under different conditions

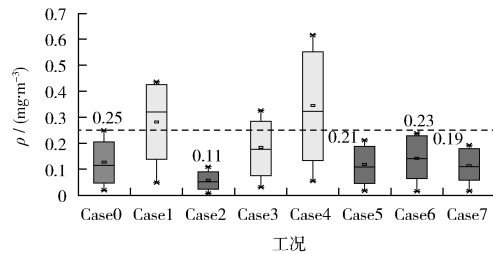


图 6 特征线 1 上的甲醛质量浓度分布

Fig. 6 Distribution of formaldehyde concentration at characteristic line 1

由此可见, 通风速率对室内甲醛浓度的影响最大, 其次依次为源项散发面积和源项强度。在 Case3 中, 窗户数量增多, 室内甲醛浓度并未有明显改善, 反而出现了增高的现象, 可能是由室内的气流组织发生变化所导致, 说明气流组织对甲醛浓度的分布影响较为复杂, 还需要深入研究。

3 结论

(1) 室内散发源开始释放甲醛前 2 000 s 过程中, 甲醛浓度呈现出明显升高趋势, 随着时间推移, 散发到空气中的甲醛在室内聚集一段时间后, 在外界气流环境较稳定时, 其浓度分布也较为稳定。

(2) 室内通风速率加倍时, 甲醛最高浓度降低

56% ;源项强度减半时,甲醛最高浓度降低 16% ;源项散发面积减少 37% 时,甲醛最高浓度降低 24% 。由此可见,通风速率对室内甲醛浓度的影响较大,其次依次为源项散发面积和源项强度。

[参考文献]

- [1] 张仙平,郝金鹏,沈恒根. 国内居室的甲醛污染及防治措施[J]. 建筑热能通风空调,2007,26(3):28-31,40.
- [2] ZOU M L, WEN W W, WANG L L. Investigation and analysis on the present situation of indoor formaldehyde pollution in residence of Binzhou City[J]. Meteorological and Environmental Research, 2015,6(4):11-13.
- [3] 张金贵,贾德生,张东省,等. 公路隧道内运动汽车尾气污染扩散数值仿真研究[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(1):11-15.
- [4] 王无为,黄建武,龚胜生,等. 2016年武汉市大气污染物时空分布特征及影响因素[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(6):20-24.
- [5] NIELSEN P V. Fifty years of CFD for room air distribution[J]. Building and Environment,2015,91:78-90.
- [6] 严彦,王光学,杨旭,等. 木质人造板材甲醛释放规律的研究[J]. 环境科学学报,2003,23(1):134-137.
- [7] 王牧日,张继娟,张仲凤. 风速对室内甲醛浓度影响的模拟研究[J]. 绿色科技,2017(22):21-24.
- [8] 岳高伟,陆梦华,贾慧娜. 室内污染物扩散的通风优化数值模拟[J]. 流体机械,2014,42(4):81-85.
- [9] 李晓庆,张怡鹏,刘晓燕,等. 不同通风方式下室内甲醛净化效果的数值模拟[J]. 黑龙江科技大学学报,2017,27(6):658-664.
- [10] 田太阳,王亮,常金秋. 基于 Airpak 的大型车间污染物消散的数值模拟研究[J]. 安全与环境学报,2012,12(6):31-35.
- [11] 张磊,张国娟,于水. 不同气流组织下对室内甲醛浓度影响模拟分析[J]. 建筑节能,2017,45(8):13-16.
- [12] 吴迪. 室内装修甲醛散发的 Airpak 模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- [13] 王新轲. 干建材 VOC 散发预测、测定及控制研究[D]. 北京:清华大学,2007.
- [14] 郑娟. 干建材有机挥发物单面散发特性的理论研究及应用[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [15] 许瑛. 干建材挥发性有机化合物散发特性研究[D]. 北京:清华大学,2004.
- [16] 壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(4):81-85.
- [17] WANG J Z, WANG X J, XU M G, et al. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2015,102(3):371-381.
- [18] 韩瑞芸,陈哲,杨世琦. 秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J]. 中国农学通报,2016,32(9):148-154.
- [19] 朱坚,纪雄辉,田发祥,等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究,2016,29(11):1626-1634.
- [20] GAO C, SUN B, ZHANG T L. Sustainable nutrient management in Chinese agriculture: challenges and perspective [J]. Pedosphere,2006,16(2):253-263.
- [21] 徐云连. 长期减量化施肥后农田氮磷径流损失及土壤性质的研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2018.
- [22] 李娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [23] 马凡凡,邢素林,徐云连,等. 肥料施用对稻田氮磷流失的影响[J]. 中国稻米,2018,24(2):14-18.
- [24] 王小治,尹微琴,单玉华,等. 太湖地区湿沉降中氮磷输入量——以常熟生态站为例[J]. 应用生态学报,2009,20(10):2487-2492.
- [25] 张丽娟,马中文,马友华,等. 优化施肥和缓释肥对水稻田面水氮磷动态变化的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(1):90-94,100.
- [26] 张亚莉,陈德州,徐梅宣,等. 施肥量和降雨对水稻田氮流失影响的试验研究[J]. 现代农业装备,2015(2):32-36.
- [27] 张鸿睿. 稻田田面水氮磷动态及径流流失特征研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [28] SUN B, ZHANG L X, YANG L Z, et al. Agricultural non-point source pollution in China: causes and mitigation measures [J]. AMBIO,2012,41(4):370-379.
- [29] 刘红江,陈虞雯,孙国峰,等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(2):405-412.
- [30] 郭智,周炜,陈留根,等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(6):21-25,61.
- [31] 李喜喜,王昌全,杨娟,等. 猪粪施用对水稻田面水养分动态变化特征及流失风险的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(5):130-136.
- [32] 李卫华. 不同施肥及水分管理方式下稻田土壤氮磷养分流失特征的研究[D]. 福州:福建农林大学,2011.
- [33] 杨雪,梅凯,吴昊. 太湖流域农业面源氮磷流失生态拦截工程技术[J]. 中国给水排水,2012,28(22):34-37.
- [34] 乔斌. 农田生态沟渠对稻田降雨径流氮磷的去除实验与模拟研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [35] 王晓玲,乔斌,李松敏,等. 生态沟渠对水稻不同生长期降雨径流氮磷的拦截效应研究[J]. 水利学报,2015,46(12):1406-1413.
- [36] 陈重军,王建芳,凌士平,等. 农田面源污染生态沟渠生态净化效能评估[J]. 江苏农业科学,2015,43(11):472-474.
- [37] 田上,沙之敏,岳玉波,等. 不同类型沟渠对农田氮磷流失的拦截效果[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):361-365.
- [38] 谭茂兰,方荣杰. 表面流人工湿地控制农田排水污染物的作用[J]. 水利科技与经济,2011,17(1):15-17,26.
- [39] 潘乐,菲智,董斌,等. 人工湿地对稻田氮磷污染的去除试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2011,44(5):586-589,598.