

活性炭纤维在农村生活污水处理中的应用

张国照, 药宝宝 (中节能水务发展有限公司, 北京 100082)

摘要 以活性炭纤维作为微生物载体开展农村生活污水处理试验, 在进水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度分别为 79.3~107.1、28.0~48.2、32.6~51.6、2.3~3.9 mg/L 的条件下, 上述指标的去除率分别为 73.7%~89.1%、91.1%~98.2%、42.6%~77.9%、74.5%~86.3% (投加除磷剂)。其中, COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的出水水质优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准, TN 和 TP 可稳定达到一级 B 标准 (投加除磷剂), 出水 SS 保持在 5 mg/L 以下。采用活性炭纤维填料的一体化农村污水处理装置已用于示范工程, 达到了预期效果。与常规填料相比, 活性炭纤维填料接触氧化法 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除性能更优。活性炭纤维适合在农村生活污水处理中应用。

关键词 农村生活污水; 活性炭纤维; A/O 工艺; 生物膜

中图分类号 X 799.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)07-0197-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.07.047



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Application of Activated Carbon Fiber in Rural Domestic Sewage Treatment

ZHANG Guo-zhao, YAO Bao-bao (CECEP Water Development Co., Ltd., Beijing 100082)

Abstract The experiment of rural domestic sewage treatment was carried out with activated carbon fiber (ACF) as the microbial carrier. The removal rates of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP were 73.7%~89.1%, 91.1%~98.2%, 42.6%~77.9% and 74.5%~86.3% (phosphorus removal agent was added) respectively when the influent concentrations were 79.3~107.1, 28.0~48.2, 32.6~51.6 and 2.3~3.9 mg/L respectively. Among them, the effluent quality of COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were better than the first class level A of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918—2002), the effluent quality of TN and TP stably reached the first class level B standard (phosphorus removal agent was added), and SS of effluent was kept below 5 mg/L. The integrated rural sewage treatment device using ACF filler had been used in the demonstration project and achieved the expected effect. Compared with the conventional filler, the ACF filler biological contact oxidation process had better $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal performance. ACF was suitable for rural domestic sewage treatment.

Key words Rural domestic sewage; Activated carbon fiber; A/O process; Biofilm

随着我国农村经济的发展和水平的提高, 农村生活污水对环境的影响也越来越大。农村生活污水不仅影响整个农村的生态环境, 同时还制约农村经济的发展^[1], 农村污水治理成为一项非常重要的工作。在农村污水处理技术中, 应用较广泛的一体化生活污水处理装置大多采用接触氧化法^[2-3]。而作为微生物载体的填料是接触氧化法的核心, 其对污水处理装置的处理效果具有重要影响^[4-5]。填料对处理效果的影响与填料的机械强度、比表面积和生化稳定性等都有一定的关系^[4]。碳纤维是一种含碳量超过 90% 的新型纤维材料, 于 1959 年首先由美国研发出来。碳纤维具有力学性能好、耐高温 (能在 2 000 °C 的环境下使用)、抗化学腐蚀等优点^[6]。活性炭纤维是经过高温活化的含碳纤维, 表面可产生纳米级的孔径, 其比表面积可达到 1 000~3 000 m²/g, 远高于弹性立体填料 (0.03 m²/g)、生物绳填料 (0.05 m²/g) 和活性炭 (800~1 000 m²/g)。活性炭纤维在水处理中主要用于饮用水净化、工业用水处理、工业废水处理、富营养化水体和微污染原水的处理^[7-8], 其原理主要是利用活性炭纤维高强的吸附性能直接吸附污染物质使水得到净化, 或利用活性炭纤维作为生物膜载体降解微污染水中污染物质。碳纤维具有吸附大量微生物的功能, 附着生物膜增长速度快, 同时可以快速捕捉浮游悬浊物, 形成良好的生物链。周东凯^[9]用活性炭纤维进行了模拟生活污水处理试验, 试验采用好氧接触氧化工艺, 结果表明活性炭纤维挂膜性能优良, 并考察了不同参数对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 处理效果的影响。笔者将改

性的活性炭纤维材料作为微生物载体, 采用 A/O 工艺处理农村生活污水, 通过试验研究其处理效果, 并在某农村污水处理工程中进行应用, 为农村污水处理技术发展提供新的借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验装置 试验装置处理规模为 1 m³/d, 采用 A/O 工艺原理, 出水以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中一级 B 标准为目标。原水由进水泵提升进入主处理装置, 依次经过进水区、缺氧区、好氧区和出水区, 出水溢流排出。好氧区出水一部分回流至缺氧区, 在缺氧区中通过反硝化作用去除总氮。在缺氧区和好氧区内悬挂活性炭纤维作为生物膜载体, 未设置污泥回流系统。除磷采用同步化学除磷的方式。试验装置如图 1 所示。

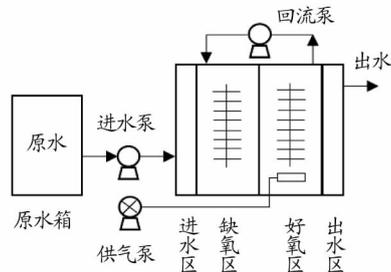


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

主处理装置尺寸为长 2.00 m、宽 0.66 m、高 1.10 m, 有效水深 0.95 m。其中, 缺氧区和好氧区容积均为 0.5 m³。缺氧区预留了隔断装置, 可调整缺氧区容积大小。在缺氧区和好氧区内分别悬挂 23 束和 22 束改性活性炭纤维。改性活

作者简介 张国照 (1972—), 男, 河北枣强人, 工程师, 硕士, 从事水污染控制研究。

收稿日期 2021-07-25; **修回日期** 2021-08-15

性碳纤维相比普通活性碳纤维具有更高的亲水性和挂膜效果,其比表面积为 $1\ 200\sim 2\ 000\ \text{m}^2/\text{g}$ 。每束碳纤维呈“丰”字型,悬挂高度为 $0.75\ \text{m}$,单丝长为 $0.22\ \text{m}$,有效碳纤维丝长度为 $9.6\ \text{m}$ 。生物池内碳纤维平均装填密度为 $435.6\ \text{m}^3$ 。在好氧区底部设置微孔曝气管2根,采用供气泵供气,供气量为 $2.4\ \text{L}/\text{min}$ 。设内回流泵1台,将一部分好氧区出水回流至缺氧区入口,回流比为 $1:1\sim 2:1$ 。

1.2 试验用水水质 试验用水取自某生活污水处理厂细格栅前进水,其COD为 $79.3\sim 107.1\ \text{mg}/\text{L}$, NH_4^+-N 为 $28.0\sim 48.2\ \text{mg}/\text{L}$,TN为 $32.6\sim 51.6\ \text{mg}/\text{L}$,TP为 $2.3\sim 3.9\ \text{mg}/\text{L}$,SS为 $24.0\sim 70.5\ \text{mg}/\text{L}$ 。所有水质指标均采用国家标准方法进行测定^[10-14]。

1.3 启动过程 试验时间为2019年5—12月。首先在主处理装置中充满污水,在缺氧区和好氧区各投加 $0.5\ \text{kg}$ 接种污泥(以干物质计),然后开启曝气装置,使污泥与活性碳纤维填料充分接触(缺氧池内放置粗孔曝气管搅拌)。为防止气流对碳纤维丝的扰动影响生物附着,启动曝气量开启较小。闷曝48 h后,待缺氧区和好氧区活性碳纤维丝均已挂膜后开始连续进水。好氧区溶解氧保持在 $2\sim 4\ \text{mg}/\text{L}$ 运行。初始进水量为 $0.25\ \text{m}^3/\text{d}$,出水回流比为 $1:1$ 。当出水水质指标稳定后逐步提升进水量,进水量依次为 0.50 、 0.75 、 $1.00\ \text{m}^3/\text{d}$ 。当进水量提升到 $0.50\ \text{m}^3/\text{d}$ 且出水氨氮稳定达标后,出水回流比调整为 $2:1$;当进水量达到 $1.00\ \text{m}^3/\text{d}$ 且出水水质稳定后开始连续记录运行数据,数据记录时间为23 d。

2 结果与分析

2.1 COD去除效果 从试验期间COD的进出水水质和去除率(图2)可以看出,活性碳纤维试验装置的出水COD浓度在 $9.7\sim 23.9\ \text{mg}/\text{L}$,对COD的去除率为 $73.7\%\sim 89.1\%$ 。试验装置对COD具有较高的去除效果,并且随着运行时间的增加,COD的去除率逐渐增加,这说明活性碳纤维上生物膜量充足、活性好、降解有机物性能优。活性碳纤维极强的吸附能力、巨大的比表面积和良好的生物亲和力为生物膜的良好生长提供了有利条件。虽然进水COD波动较大,但出水COD比较稳定,出水COD浓度稳定优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,说明该工艺的抗冲击负荷能力较强。

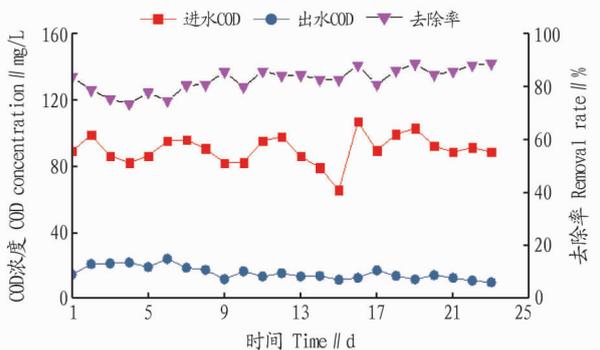


图2 COD的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of COD

2.2 NH_4^+-N 去除效果 从试验期间 NH_4^+-N 的进出水水质和去除率(图3)可以看出,活性碳纤维试验装置的出水 NH_4^+-N 浓度在 $0.6\sim 3.2\ \text{mg}/\text{L}$,对 NH_4^+-N 的去除率为 $91.1\%\sim 98.2\%$ 。试验装置对 NH_4^+-N 表现出很高的去除效果,去除率均在90%以上,出水 NH_4^+-N 浓度稳定优于GB 18918—2002的一级A标准。污水中 NH_4^+-N 的去除主要依靠硝化细菌的硝化作用,试验装置对 NH_4^+-N 的高去除率说明硝化细菌在活性碳纤维上挂膜性能优异。有研究表明,活性碳纤维依靠吸附作用对 NH_4^+-N 也有一定的去除作用,这可能也是该工艺 NH_4^+-N 去除率高的原因之一^[15]。

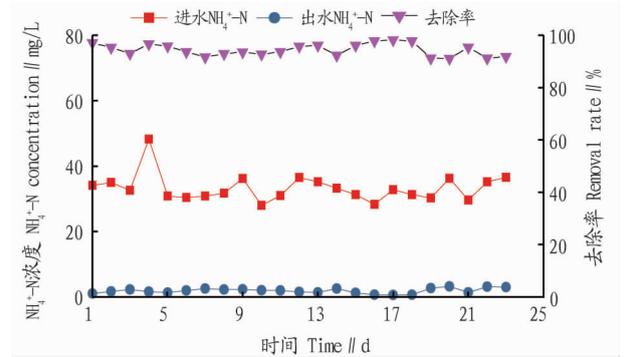


图3 NH_4^+-N 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of NH_4^+-N

2.3 TN去除效果 从试验期间TN的进出水水质和去除率(图4)可以看出,活性碳纤维试验装置的出水TN浓度在 $7.7\sim 18.7\ \text{mg}/\text{L}$,对TN的去除率为 $42.6\%\sim 77.9\%$ 。TN的去除率相对不高且变化范围较大,主要是受进水COD较低的影响。但在进水碳氮比较低且未投加外部碳源的情况下,出水TN浓度能稳定达到GB 18918—2002的一级B标准。分析原因主要有:一是缺氧区反硝化细菌在活性碳纤维上生长良好;二是由于缺氧区水力停留时间较长,原水中碳源能够得到充分利用。

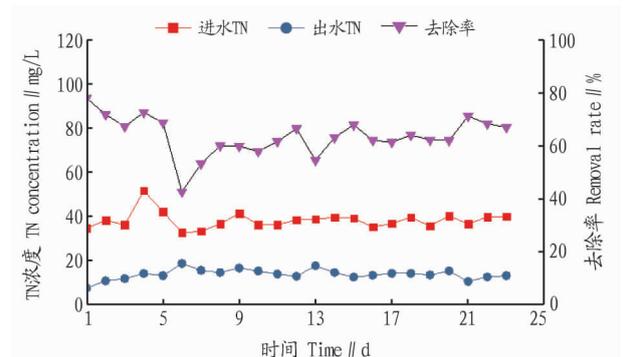


图4 TN的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of TN

2.4 TP去除效果 从试验期间TP的进出水水质和去除率(图5)可以看出,在前17 d未向试验装置中投加除磷剂,出水TP浓度在 $1.4\sim 2.5\ \text{mg}/\text{L}$,对TP的去除率为 $10.7\%\sim 47.2\%$;TP去除率较低,无法达到GB 18918—2002的一级B标准。这主要是由于试验装置没有污泥回流系统,无法依靠

聚磷菌在厌氧状态下释磷和好氧状态下吸磷的方式除磷,在未投加除磷剂的情况下,主要依靠生物同化作用和活性炭纤维的吸附作用去除一部分磷。从第 18 天开始采用同步除磷的方式投加除磷剂三氯化铁,TP 的去除率提高至 74.5%~86.3%,出水 TP 浓度为 0.39~0.76 mg/L,可以稳定达到 GB 18918—2002 的一级 B 标准。试验期间,未观察到投加三氯化铁对生物处理造成的不良影响。

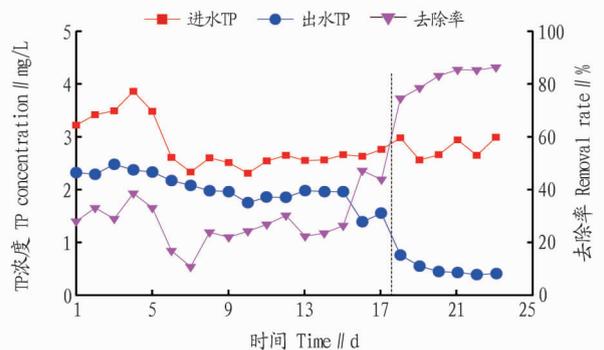


图 5 TP 的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of TP

2.5 出水 SS 正常情况下活性炭纤维试验装置好氧池出水的 SS 浓度保持在 5 mg/L 以下,显著优于 GB 18918—2002 的一级 A 标准。这是由于活性炭纤维具有优异的吸附性能,可对进水中的悬浮物进行截留吸附和微生物降解。

2.6 生物挂膜量 填料表面附着的生物膜量对评价该填料处理污水的性能具有一定的意义。活性炭纤维试验装置运行结束后,取好氧池和缺氧池内活性炭纤维丝各 1 根,采用烘干称重法测得缺氧池内活性炭纤维丝挂膜量为 3.43 g/m,好氧池内活性炭纤维丝挂膜量为 5.29 g/m。再通过填料装填密度计算得到单位池容的生物浓度,其中,缺氧池的生物浓度为 1 533 mg/L,好氧池的生物浓度为 2 243 mg/L。此次试验生物挂膜量与常规工艺活性污泥浓度相比较少,主要与进水水质浓度较低有关。

2.7 停留时间优化 试验装置在处理水量为 1.0 m³/d 的情况下,生物池停留时间为 24 h。为了推进活性炭纤维生物处理工艺在实际工程中的应用,降低实际工程应用投资,进行了停留时间优化试验。在缺氧区增加了隔板,使其容积缩小至 0.335 m³,增加生物池活性炭纤维填料装填密度至 652.1 m³,然后逐渐提升进水量,每次增加进水量 0.1 m³/d,并稳定运行 3~4 d,最终进水量提升至 1.7 m³/d。提升水量期间进水 COD 为 54.6~106.3 mg/L, NH₄⁺-N 为 14.8~29.8 mg/L, TN 为 20.3~32.1 mg/L, TP 为 2.6~4.6 mg/L, SS 为 20.0~55.5 mg/L; 出水 COD 为 9.7~19.7 mg/L, NH₄⁺-N 为 4.5~7.6 mg/L, TN 为 12.2~17.5 mg/L, TP 为 1.2~2.7 mg/L (未投加除磷剂), SS 为 1.0~5.5 mg/L。出水 COD 和 SS 优于 GB 18918—2002 的一级 A 标准, NH₄⁺-N 和 TN 可达到 GB 18918—2002 的一级 B 标准。在进水量为 1.7 m³/d 时,停留时间优化为 11.8 h。

2.8 工程应用 在广东某农村污水处理项目中,建设了活性炭纤维填料一体化污水处理装置示范工程。该装置处理

规模为 20 m³/d,外形尺寸为 3.6 m×2.5 m×2.5 m,包括进水区、缺氧区、好氧区、出水区和设备间。其中缺氧区停留时间为 4.36 h,好氧区停留时间为 8.06 h。设备经调试稳定运行后,在 2019 年 7—12 月,进水 COD 为 8~77 mg/L,出水 COD 为 5~27 mg/L; 进水 NH₄⁺-N 为 0.5~11.0 mg/L,出水 NH₄⁺-N 为 0.1~0.5 mg/L; 进水 TN 为 9~29 mg/L,出水 TN 为 2~15 mg/L; 进水 TP 为 0.39~8.20 mg/L,出水 TP 为 0.28~3.93 mg/L。由此可见,示范工程的处理效果与工艺试验吻合,达到了预期目标。但由于进水 COD 较低,当进水 TN 较高时需要投加碳源使出水 TN 达标,同时进水 TP 需要投加除磷剂使出水 TP 达标。

2.9 不同填料性能比较 采用不同填料的接触氧化法处理农村污水处理效果会有所不同。焦涛等^[16]用接触氧化工艺进行处理农村分散污水中试研究,反应器内选用价廉质优的生物膜填料组合,得到 COD、NH₄⁺-N 和 TN 的平均去除率分别为 76.10%、68.12%、60.50%。李贵亮等^[17]采用球形和悬浮式填料生物接触氧化法进行处理农村生活污水研究,得到 COD 的去除率为 88%~90%, NH₄⁺-N 的去除率稳定在 90.05%, TN 的去除率达到 76.22%。刘建伟等^[18]对用于北京市农村污水处理的 6 种技术进行了评估,其中生物接触氧化技术 COD 去除率为 80%~85%, NH₄⁺-N 去除率为 81%~87%。由此可见,采用碳纤维填料的接触氧化法与其他填料接触氧化法相比, COD 的去除率相当, NH₄⁺-N 的去除率优于其他填料, TN 的去除率基本持平。

3 结论

以活性炭纤维作为生物膜载体进行处理农村污水试验,在进水 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 浓度分别为 79.3~107.1、28.0~48.2、32.6~51.6、2.3~3.9 mg/L 的条件下,试验装置对 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除率分别为 73.7%~89.1%、91.1%~98.2%、42.6%~77.9% 和 74.5%~86.3% (投加除磷剂),出水 COD 和 NH₄⁺-N 均优于 GB 18918—2002 中的一级 A 标准,出水 TN 和 TP 可稳定达到 GB 18918—2002 的一级 B 标准。好氧池出水 SS 小于 5 mg/L,无需设置沉淀池和污泥回流系统。通过停留时间优化试验,在出水满足一级 B 标准的目标下,停留时间优化为 11.8 h。活性炭纤维填料一体化污水处理装置在示范工程中应用达到了预期目标。与常规填料相比,采用活性炭纤维的接触氧化法 NH₄⁺-N 的去除果更好。活性炭纤维适合在农村生活污水处理中使用。

参考文献

- [1] 谢林花,吴德礼,张亚雷. 中国农村生活污水治理技术现状分析及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 865-870.
- [2] 陈月芳,樊荣,刘哲,等. 一体化农村生活污水治理装置研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(9): 84-88.
- [3] 张曼雪,邓玉,倪福全. 农村生活污水治理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(6): 5-10.
- [4] 张军臣,胡晓东,石云峰,等. 不同填料生物接触氧化工艺处理有机废水对比研究[J]. 给水排水, 2015, 41(3): 136-139.
- [5] 许芝,费庆志,刘晓旭. 不同填料影响生物接触氧化工艺处理效果的研究[J]. 净水技术, 2007, 26(5): 55-58.
- [6] 李建利,张新元,张元,等. 碳纤维的发展现状及开发应用[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2016, 33(2): 158-164.

筑特色明显,同时地域文化多元混合,区域性文化特色较为突出。因此,成都乡村民宿景观设计中应将地域文化符号进

行提炼表达,丰富景观样式,增强不同区域乡村民宿景观的识别度高,避免出现千篇一律。

表5 新材料在成都乡村民宿景观设计中的运用举例

Table 5 Examples of the application of new materials in the landscape design of Chengdu village home-stay

使用材料 Materials used	材料表现 Material performance	表现形式 Manifestation	功能特点 Functional characteristics		使用材料 Materials used	材料表现 Material performance	表现形式 Manifestation	功能特点 Functional characteristics	
			传统 Tradition	现代 Modern				传统 Tradition	现代 Modern
木+玻璃+不锈钢 Wood+glass+stainless steel		窗	透光差,装饰工艺精致但烦琐	透光面积大,造型简约易安装	蜡烛+玻璃 Candle+glass		路灯	蜡烛放置于纸灯笼里一般用于室内照明,易燃易灭	现代用于路灯的使用,复古静谧,不易熄灭
防腐木+塑料瓦片 Antiseptic wood+plastic tile		屋檐	传统瓦片屋顶,只能通过天井采光	可防水,增加采光面积,制作简便,造价较低	茅草+防水铝材 Thatch+waterproof aluminum		屋顶	传统茅草屋顶常需更换,防水效果差	茅草主要用于装饰,铝材轻便且防水性能好
混凝土+不锈钢+玻璃 Concrete+stainless steel+glass		墙	传统民居内墙封闭厚重不采光	玻璃和混凝土的结合一面采光通风一面保温隔热	砖 Brick		墙	传统砖墙垒砌规整整齐无变化	现代砖墙组合形式多样,造型丰富可用于景观墙等其他用途,不仅是满足挡风围合功能

参考文献

[1] 陈琬琦, 香银元. 文旅农融合视角下莫干山乡村民宿发展研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(20): 160-162.
 [2] 张希. 乡土文化在民宿中的表达形态: 回归与构建[J]. 闽江学院学报, 2016, 37(3): 114-121.
 [3] 冯柯, 王美达, 吴存华. 文化引领的美丽乡村建设研究: 以秦皇岛市北戴河村艺术村落为例[J]. 城市发展研究, 2018, 25(7): 128-133.
 [4] 祝磊. 论乡土文化视域下乡村民宿设计: 以金寨“八湾堂”民宿为例[J]. 长沙大学学报, 2019, 33(2): 70-74.
 [5] 丁奇, 聂紫阳. 乡土保护视角下乡村民宿空间的营造策略: 以浙江省传统村落民宿为例[J]. 遗产与保护研究, 2017(6): 87-91.

[6] 张腾月. 地域文化对民宿设计的影响: 以河阳村民宿项目为例[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2017.
 [7] 邹扬. 情感体验下民宿乡土文化的表达研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
 [8] 李蕾蕾, 张煜. 乡村民宿“内视于物”和“外视于景”的视觉批评[J]. 装饰, 2019(4): 22-27.
 [9] 龙飞, 刘家明, 朱鹤, 等. 长三角地区民宿的空间分布及影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(4): 950-960.
 [10] 郭泽文. 传统川西民居改造中的现代设计表达研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
 [11] 李先逵. 四川民居[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

(上接第199页)

[7] 郑艳军, 张菁菁, 马红霞, 等. 活性碳纤维的应用现状及前景[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(2): 21-26, 45.
 [8] 张小玲, 王靖楠, 施雪旖, 等. 新型材料碳纤维在水处理应用中的研究进展[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1577-1583.
 [9] 周东凯. 新型纤维挂膜填料污水处理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
 [10] 环境保护部. 中华人民共和国国家环境保护标准 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法: HJ 828—2017[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
 [11] 环境保护部. 中华人民共和国国家环境保护标准 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
 [12] 环境保护部. 中华人民共和国国家环境保护标准 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636—2012[S]. 北京: 中国环境

科学出版社, 2012.
 [13] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家环境保护标准 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893—89[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
 [14] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
 [15] 湛莉莎. 活性炭纤维吸附性能及其在水产养殖水体的处理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
 [16] 焦涛, 王惠中, 张文波, 等. 接触氧化工艺处理农村分散污水中试研究[J]. 环境科技, 2011, 24(S2): 15-17, 20.
 [17] 李贵亮, 鄂正阳, 张赞萍, 等. A/O 生物接触氧化处理农村生活污水研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(8): 50-54.
 [18] 刘建伟, 赵高辉. 基于 AHP 的北京市典型农村污水处理技术适用性评估[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 260-267.