

餐厨垃圾水解酸化液作为外加碳源处理养猪废水

周明明^{1,2}, 陈龙喜¹, 曾胜庭¹, 唐峰^{1*}, 徐志标^{1*}, 许洋²

(1. 广东省建科建筑设计院有限公司, 广东广州 510145; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)环境科学与工程研究中心, 广东深圳 518055)

摘要 采用分段进水多级 A/O 工艺处理低 C/N 的养猪废水以解决农村地区水污染问题, 确定了分段进水的最佳配比为 9:1, 但是其出水 NH_4^+-N 仍不能达标。为提高脱氮效果, 提出以餐厨垃圾水解酸化液作为处理养猪废水的外加碳源, 并与甲醇、葡萄糖、乙酸钠等传统碳源相比较, 确定了甲醇、葡萄糖、乙酸钠和餐厨垃圾水解酸化液的最佳 C/N 分别为 4.8、7.3、4.2 和 5.0。甲醇、乙酸钠、餐厨垃圾水解酸化液在最佳 C/N 的条件下, 多级 A/O 工艺出水 COD 分别为 319、301、354 mg/L, 出水 NH_4^+-N 分别为 36、25、22 mg/L, 均能达标排放。此外, 测定了餐厨垃圾固体物料的生化产沼气潜力(BMP)为 546 NmL/gVS, 并确定了处理养猪废水与餐厨垃圾的联合工艺布局。

关键词 分段进水; 多级 A/O 工艺; 外加碳源; 餐厨垃圾

中图分类号 X 703 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)08-0080-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.08.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Hydrolytic Acidification Solution of Kitchen Waste as an Additional Carbon Source to Treat Pig Wastewater

ZHOU Ming-ming^{1,2}, CHEN Long-xi¹, ZENG Sheng-ting¹ et al (1. Jianke Architectural Design Institute of Guangdong Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510145; 2. Environmental Science and Engineering Research Center, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518055)

Abstract The segmented influent multi-stage A/O process was used to treat low C/N pig wastewater to solve the environmental pollution problem in rural areas. The optimal ratio of segmented influent was determined to be 9:1, but the concentration of NH_4^+-N in the effluent could not meet emission standards. In order to improve the denitrification effect, household kitchen waste hydrolysis acidification solution (KWHAS) as an additional carbon source for treating pig waste water was proposed. Compared with traditional carbon sources for wastewater treatment, the optimum C/N for Methanol, Glucose, Sodium Acetate, and KWL was determined to be 4.8, 7.3, 4.2, and 5.0. Under the optimal C/N conditions of Methanol, Sodium Acetate and KWHAS, the effluent COD of the multi-stage A/O process was 319, 301 and 354 mg/L, and the effluent NH_4^+-N was 36, 25 and 22 mg/L, respectively. In addition, the BMP of household kitchen waste solid materials was measured to be 546 NmL/gVS, and the structural layout of the combined process of treating pig wastewater and kitchen waste was determined.

Key words Segmented influent; Multi-stage A/O process; Additional carbon source; Kitchen waste

养猪业产生的废物, 包括粪便和尿液、用于清洁粪便和尿液的水以及食物残渣, 其导致的水质恶化严重污染环境。因此, 越来越多的研究关注开发具有经济效益的技术, 去除废水中的有机物和营养物质, 特别是氮和磷^[1-2]。国内外开展了众多关于养猪废水处理的研究, 分别采用人工湿地、物理化学、电化学、活性污泥法或者不同工艺之间的相互组合^[3]。其中, 分段进水多级 A/O 工艺具有修建和改造成本低、运行费用低、充分利用碳源、脱氮效果好、灵活可控、技术成熟等特点^[4-6]。然而, 对于低碳氮比(C/N)的养猪废水, 碳源不足往往限制了其脱氮除磷的效果, 补充碳源作为电子供体, 可以提高反硝化脱氮的效果^[7]。餐厨垃圾具有很高的资源利用价值, 其水解酸化液有机质含量高、可生化性好、价格低廉、无毒害作用, 是一种良好的碳源^[8-10]。笔者在确定多级 A/O 工艺最佳进水配比的基础上, 优化外加碳源的投加, 最终实现养猪废水和餐厨垃圾协同处理。

1 材料与方

1.1 试验材料 试验所用养猪废水取自惠州市某养猪场, 其沼气池出水水质相关指标分别为 COD 1 500~3 000 mg/L、TP 60~120 mg/L、 NH_4^+-N 750~1 200 mg/L、SS 1 500~3 000 mg/L、pH 7~8。

多级 A/O 工艺试验及反硝化所用的活性污泥均来自深圳市某污水处理厂二沉池。

反硝化碳源分别为甲醇、葡萄糖、乙酸钠和餐厨垃圾水解酸化液。餐厨垃圾水解酸化液取自深圳市某运行稳定的餐厨垃圾厌氧发酵处理厂, COD 浓度为 50.60 g/L、挥发性脂肪酸(VFAs) 10.87 g/L、 NH_4^+-N 浓度为 1.30 g/L。

1.2 试验装置 装置为有机玻璃制成, 尺寸为 180 cm×44 cm×50 cm, 有效容积为 240 L, 第一段 A/O 与第二段 A/O 对应的有效容积分别为 44、100、32、64 L, 中沉池、二沉池和混凝沉淀池容积均为 10 L。采用两段进水的方式, 分别由第一和第二缺氧池进水; 消化液回流为两段式回流, 剩余污泥分别由中沉池回流第一缺氧池和终沉池回流至第二缺氧池, 试验过程中的进水、混合液回流和污泥回流均采用蠕动泵输送。装置缺氧池安装搅拌器, 好氧区由曝气头曝气。该装置工艺流程如图 1 所示。

1.3 水质检测方法 COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 的测定均参照国家环保总局编写的《水和废水监测分析方法》(第四版)。COD 采用快速密闭消解法测定; NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定; NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定; NO_2^--N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定。

2 结果与分析

2.1 进水配比的影响 为了合理分配碳源, 优化最佳进水配比, 需要探究不同进水对比对多级 A/O 工艺脱氮除磷效果的影响。装置运行参数为: 进水流量为 36 L/d, 进水 C/N=

作者简介 周明明(1993—), 男, 山东德州人, 助理工程师, 硕士, 从事水污染控制研究。* 通信作者, 唐峰, 高级工程师, 从事给排水工程研究; 徐志标, 高级工程师, 硕士, 从事给排水及水污染控制工程研究。

收稿日期 2019-10-15

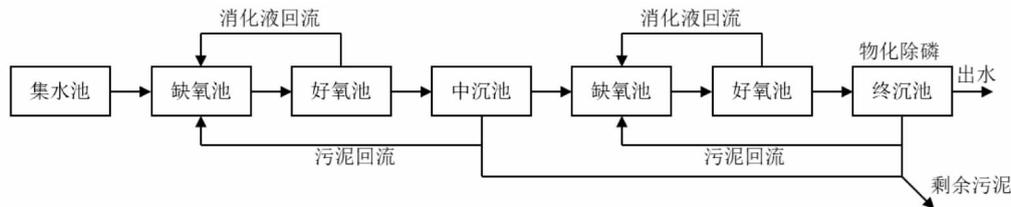


图1 多级A/O工艺流程

Fig.1 Process flow of multi-stage A/O

(2~3):1, HRT=6 d, 回流比均为150%, 装置的污泥回流比为60%。设置第一缺氧池和第二缺氧池原水进水配比分别为9:1、8:2、7:3、6:4, 试验进水水质: COD 为(200±400)mg/L, NH_4^+-N 为(700±100)mg/L, TP 为(70±10)mg/L。

2.1.1 COD 的去除效果。不同进水配比下 A/O 工艺对 COD 的去除效果如图2所示, 采用单点进水和以9:1、8:2的分段进水方式, 多级AO工艺出水COD均可满足《畜禽养殖业污染物排放标准》中COD含量400 mg/L以下的要求。而以7:3和6:4的进水配比, 出水COD高于排放标准甚至超过500 mg/L, 不能达标。

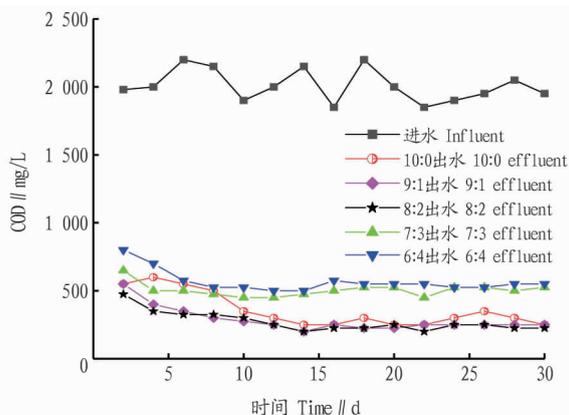


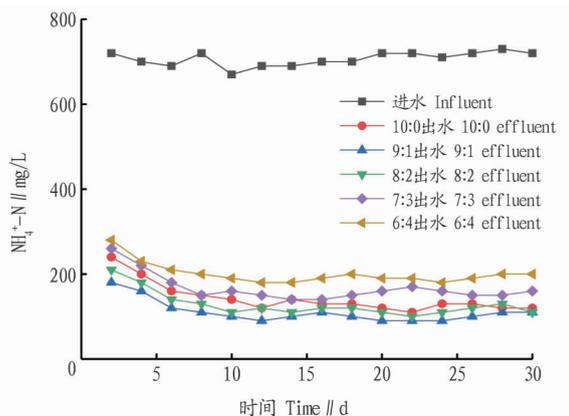
图2 进水比对COD的去除效果

Fig.2 Removal effect of influent ratio on COD

采用单点进水方式, 出水COD的平均浓度为240~300 mg/L。采用分段进水, 随进水配比的减小, 出水COD浓度先降低后升高。其主要原因是在单点进水条件下, 一级A/O段承担主要的污染负荷, 二级A/O段因进水可降解有机物的减少, 以及一级A/O段出水的冲击, 不能满足污泥的正常生长, 一级A/O段的污染物处理效果基本决定了整个工艺。利用两点进水向第二缺氧池补充一定易降解有机物, 作为反硝化菌的碳源, 促进污泥生长, 在减少一级A/O段污染负荷的基础上增加二级A/O段的处理效果, 以便更好地去除水体中的有机物。但随着第一缺氧池进水量的不断减少, 降低了一级A/O段对原水中有机物的去除, 使得二级A/O段超负荷运行, 导致出水变差甚至不达标。

2.1.2 NH_4^+-N 的去除效果。不同进水配比下 A/O 工艺对 NH_4^+-N 的去除效果如图3所示, 在单点进水和两点进水分配比为10:0、9:1、8:2、7:3和6:4时, 出水 NH_4^+-N 的浓度分别在120、100、115、155和190 mg/L左右, 均大于80 mg/L《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001), 不能达标

排放。这表明在好氧区的硝化容量相对不足, 脱氮能力有限。在进水配比为6:4时, NH_4^+-N 出水浓度远高于其他4种进水配比下的出水浓度, 主要由于进水中40%的污水进入第二段A/O区, 导致该段A/O区 NH_4^+-N 的去除超负荷运行。因为第二段A/O区中的 NH_4^+-N 主要以硝化液回流的方式进入缺氧池而被去除, 而第一段A/O区在脱氮过程中消耗了大量的碱度, 对第二段A/O区的硝化过程造成很大的压力, 导致出水不能达标且远超过排放标准。

图3 进水比对 NH_4^+-N 的去除效果Fig.3 Removal effect of influent ratio on NH_4^+-N

2.1.3 各污染物沿程的变化。为了探究单点进水和分配进水对污染物去除效果的影响, 对沿程COD、 NH_4^+-N 、TP和pH进行了分析, 结果如表1所示。从表1可看出, 整个工艺段单点进水和9:1配比进水对COD的去除率分别为86.97%和88.92%, 而 NH_4^+-N 的去除率则分别为81.44%和86.67%。当以9:1的进水配比时, NH_4^+-N 的去除有较可观提升, 但出水 NH_4^+-N 含量约为96 mg/L, 仍不能达标。单点进水和9:1的配比进水对COD和 NH_4^+-N 的去除都主要发生在一级A/O段, COD的去除率分别为77.39%和79.43%, NH_4^+-N 的去除率则分别为72.10%和75.56%。9:1的进水配比可以有效地降低一级A/O段的进水负荷, 其 NH_4^+-N 的去除效果要优于单点进水。2种进水方式的二级A/O段COD的去除率分别为9.24%、8.91%, NH_4^+-N 的去除率分别为8.50%和10.27%, 对污染物的去除并没有明显差异。表1中的pH持续下降, 表明二级A/O段碱度不足, 导致氨氮去除效果变差, 这主要是由于一级好氧区消耗了大量碱度。同时, 二级缺氧池因易降解有机物不足, 造成其反硝化过程难以补充足够的碱度, 最终使得二级好氧区硝化效果变差, 出水 NH_4^+-N 难以达标。因此, 可通过直接投碱或外加碳源间接提高碱度

的方式来强化脱氮,并确定进水配比9:1为最佳进水配比。

表1 单点进水和9:1的进水比对沿程污染物的降解

Table 1 Degradation of pollutants along the path by single point water inflow and 9:1 influent ratio

进水方式 Influent way	COD//mg/L		NH ₄ ⁺ -N//mg/L		TP//mg/L		pH	
	单点 Single point	9:1	单点 Single point	9:1	单点 Single point	9:1	单点 Single point	9:1
进水 Influent	2 380	2 120	706	720	72	69	7.63	7.74
第一 A 区 The first A area	620	560	416	356	64	62	7.03	7.18
第一 O 区 The first O area	538	436	197	176	53	48	6.52	6.57
第二 A 区 The second A area	385	378	168	174	49	43	6.35	6.44
第二 O 区 The second O area	318	247	137	102	46	39	6.13	6.22
出水 Effluent	310	235	131	96	45	39	6.11	6.18
去除率 Removal rate	86.97	88.92	81.44	86.67	37.50	43.48	19.92	20.16

2.2 外加碳源的优化 根据以上的研究发现,碱度不足是导致出水氨氮不达标的主要原因。因此,补充硝化过程所需碱度,可以增加氨氮的去除效果,而合理投加碳源可以有效地解决因反硝化不充分导致的碱度不足的问题^[11]。

2.2.1 确定合理的碳氮比。 适宜碳氮比是指当完全去除水质中的硝酸盐氮时所需的最少有机物量与硝酸盐氮的比值^[10]。该试验以餐厨垃圾水解酸化液、甲醇、葡萄糖和乙酸钠作为外加碳源进行反硝化试验,碳氮比的范围由理论值和参考文献确定的。从图4可以看出,甲醇、葡萄糖、乙酸钠和餐厨垃圾水解酸化液的最佳碳氮比分别为4.8、7.3、4.2和5.0。水解酸化液的反硝化速率优于甲醇,产生这一现象的原因是甲醇在作为碳源的过程中,首先需要被转化成相应的VFA,才可被用于微生物代谢循环,故其反硝化速率应低于直接利用VFA作为外加碳源时的反硝化速率。而餐厨垃圾水解酸化液含有较多的乙酸、丙酸和丁酸,属含有多种VFA的混合物,故其反硝化速率较高^[10,12]。

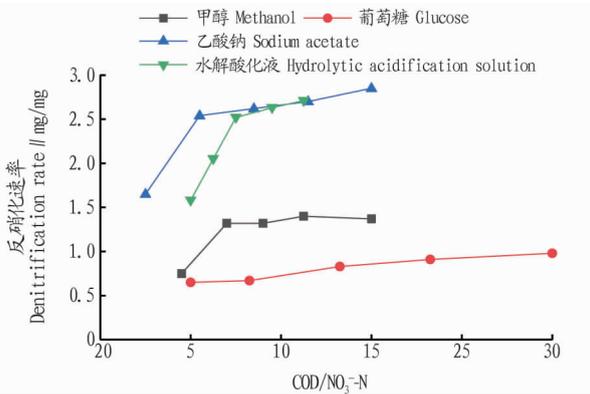


图4 不同碳源在不同 COD/NO₃⁻-N 条件下的反硝化速率

Fig.4 Denitrification rate of different carbon sources under different COD/NO₃⁻-N ratios

2.2.2 污染物去除效果。 第二缺氧池进水质:COD 为(450±100)mg/L,NH₄⁺-N 为(180±50)mg/L,在最适宜碳氮比情况下,将不同碳源投加入第二缺氧池。

2.2.2.1 COD 的去除效果。 从图5可以看出,经过30d的稳定运行,其出水COD含量均小于400mg/L,满足排放标准。由于餐厨垃圾水解酸化液成分比较复杂^[13-14],存在部分难降解有机物,导致出水COD的含量有一定升高,但仍在排放标

准范围内。

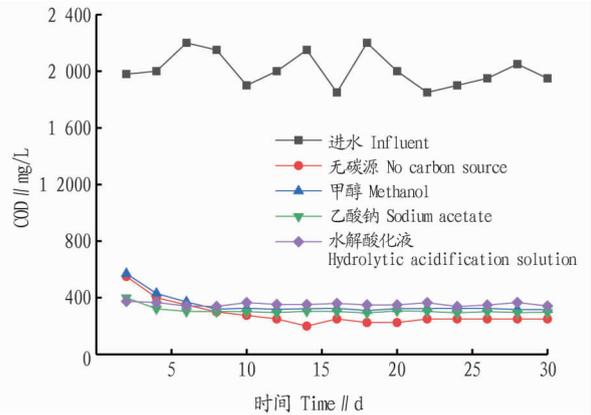


图5 外加碳源对出水 COD 的影响

Fig.5 Effect of additional carbon source on effluent COD

2.2.2.2 NH₄⁺-N 的去除效果。 从图6可以看出,经过30d的稳定运行,在有外加碳源的条件下出水NH₄⁺-N含量均小于80mg/L,满足排放标准。

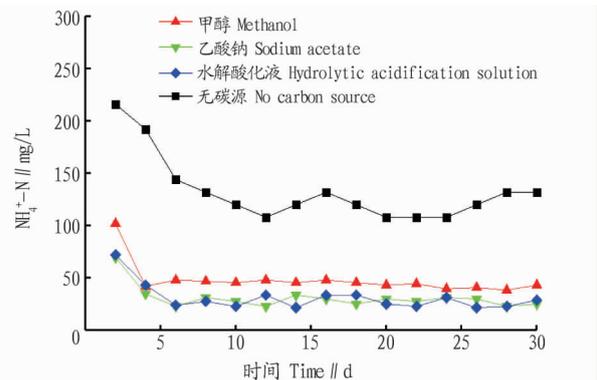


图6 外加碳源对出水 NH₄⁺-N 的影响

Fig.6 Effect of additional carbon source on effluent NH₄⁺-N

水解酸化液作为外加碳源对于氨氮的去除,可以与甲醇、乙酸钠等传统碳源的效果没有明显差别,其作为外加碳源可以克服反硝化碳源不足的问题。在反硝化过程中没有碳源的限制,可以为硝化过程补充足够的碱度,促进硝化反应的发生,体系中NH₄⁺-N浓度不断减少。由图7可以进一步推断,外加碳源在促进反硝化过程后,为硝化过程补充了一定的碱度,进一步提高了二级A/O段的氨氮去除效果。

当没有碳源投加时,水体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度从 136 mg/L 降低至 72 mg/L,其主要是由于水体中易降解有机物不足而导致反硝化效果较差。补充碳源后可以看出,二级 A 池进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度反而升高,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度降低。其主要是因为碳源的投加促进了二级 A 池的反硝化效果,在增强反硝化过程的同时产生更多碱度,进而补充二级 O 池中的碱度,促使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,最终,通过回流增加了二级 A 池的进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度。

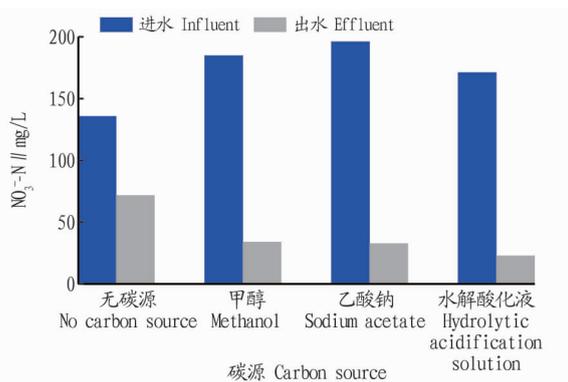


图 7 碳源投加对二级 A 池进出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的影响

Fig.7 Effect of carbon source addition on the concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in the influent and effluent of the secondary A pond

3 结论与建议

(1) 采用分段进水多级 A/O 工艺处理养猪废水,在 9:1 最佳进水配比下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果比较可观,但是仍不能达标,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量约为 96 mg/L。

(2) 对养猪废水的外加碳源进行了优化,确定了甲醇、葡萄糖、乙酸钠和餐厨垃圾水解酸化液的最佳碳氮比分别为 4.8、7.3、4.2 和 5.0;在最佳碳氮比的条件下,出水中 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

N 的浓度均能达标。

参考文献

- [1] DE LA MORA-OROZCO C, GONZÁLEZ-ACUÑA I, SAUCEDO-TERÁN R, et al. Removing organic matter and nutrients from pig farm wastewater with a constructed wetland system[J]. International journal of environmental research & public health, 2018, 15(5): 1-16.
- [2] 周娟, 刘锋, 尹黎明, 等. 南方农村分散养猪废水生态处理技术研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(6): 101-104, 109.
- [3] 欧阳婷, 王涛, 樊华. 养猪废水深度治理技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(35): 81-83, 112.
- [4] ZHU G B, PENG Y Z. Theoretical evaluation on nitrogen removal of step-feed anoxic/oxic activated sludge process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2006, 13(3): 263-266.
- [5] ZHU G B, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process[J]. Chemical engineering journal, 2007, 131(1): 319-328.
- [6] ZHU G B, PENG Y Z, ZHAI L M, et al. Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding[J]. Biochemical engineering journal, 2009, 43(3): 280-287.
- [7] 邓凯文, 李建政, 赵博玮. WFSI 处理低 C/N 比养猪废水的效果及脱氮机制[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 87-91.
- [8] LIM S J, AHN Y H, KIM E Y, et al. Nitrate removal in a packed bed reactor using volatile fatty acids from anaerobic acidogenesis of food wastes[J]. Biotechnology & bioengineering, 2006, 11(6): 538-543.
- [9] BARIK S, PAUL K K. Potential reuse of kitchen food waste[J]. Journal of environmental chemical engineering, 2017, 5(1): 196-204.
- [10] 李梦露, 蒋建国, 张昊巍. 餐厨垃圾水解酸化液作碳源的脱氮效果研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 917-923.
- [11] GU M Q, YIN Q D, WANG Z Z, et al. Color and nitrogen removal from synthetic dye wastewater in an integrated mesophilic hydrolysis/acidification and multiple anoxic/aerobic process[J]. Chemosphere, 2018, 212: 881-889.
- [12] CYSNEIROS D, THUILLIER A, VILLEMONT R, et al. Temperature effects on the trophic stages of perennial rye grass anaerobic digestion[J]. Water science & technology, 2011, 64(1): 70-76.
- [13] HUSSAIN A, FILLATRAULT M, GUIOT S R. Acidogenic digestion of food waste in a thermophilic leach bed reactor: Effect of pH and leachate recirculation rate on hydrolysis and volatile fatty acid production[J]. Bioresource technology, 2017, 245(Pt A): 1-9.
- [14] LI Y Y, JIN Y Y, BORRION A, et al. Effects of organic composition on mesophilic anaerobic digestion of food waste[J]. Bioresource technology, 2017, 244(Pt 1): 213-224.
- [15] 白子怡, 薛亮. 基于 GIS 的宝鸡市洪涝灾害风险加权综合评价[J]. 河南科学, 2019, 37(4): 642-647.
- [16] 李平兰, 杨受, 蔡自勇. 基于 GIS 技术的会东县暴雨洪涝灾害风险区划[J]. 现代农业科技, 2018(2): 231-233, 236.
- [17] 章国材. 气象灾害风险评估与区划方法[M]. 北京: 气象出版社, 2013: 29-132.
- [18] 张茵, 郭翔, 王锐婷, 等. 四川省暴雨洪涝灾害风险区划研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 165-171.
- [19] 孙欣, 林孝松, 何锦峰, 等. 基于 GIS 的山区镇域山洪灾害危险性分区及评价[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2014, 31(9): 82-88.
- [20] 张泽峰. 浅议山洪灾害的成因与防治[J]. 科技创新与应用, 2016(5): 155.
- [21] 殷洁, 裴志远, 陈曦炜, 等. 基于 GIS 的武陵山区洪水灾害风险评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 110-117.
- [22] 赵燕, 李溢龙, 田佳, 等. 基于 GIS 技术的山区洪灾孕灾环境综合评价与分区研究[J]. 绿色科技, 2015(8): 208-212.
- [23] 叶超凡, 张一驰, 熊俊楠, 等. 湖南省山丘区小流域山洪灾害危险性评价[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1593-1603.
- [24] 李世有. 基于多源 DEM 的数字流域特征提取对比分析[J]. 水资源开发与管理, 2019, 16(7): 17-23.
- [25] 林孝松, 林庆, 王梅力, 等. 山区镇域山洪灾害危险性分区研究: 以跳石镇为例[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 90-96.

(上接第 79 页)

- [4] 李新娟. 山地景区旅游安全风险评价与控制[J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2010, 11(2): 158-162.
- [5] MARTY C, KORUP O, PHILLIPS M, et al. Mountain hazards[M]// KOHLE T, MASELLI D. Mountains and climate change—from understanding to action. Bern: Geographica Bernensia, Centre for Development and Environment (CDE), 2009.
- [6] 李芳, 张爱国. 山岳型旅游灾害研究: 以泰山为例[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2008, 22(3): 109-112.
- [7] 赵敬民, 彭淑贞, 乔晓红. 泰山风景区自然灾害与旅游业可持续发展的初步研究[J]. 国土与自然资源研究, 2003(2): 68-69.
- [8] 岑乔, 魏兰. 山地旅游安全预警与应急救援体系的构建: 以四川省山地旅游为例[J]. 云南地理环境研究, 2010, 22(6): 80-84.
- [9] 高展, 许剑勇, 王胜, 等. 黄山风景区暴雨山洪灾害风险区划研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(3): 281-285.
- [10] 张俊香, 胡善风, 朱国兴. 提升黄山风景区自然灾害风险防范功能的对策研究[J]. 黄山学院学报, 2013, 15(6): 25-29.
- [11] 胡善风, 王金莲, 周晨峰, 等. 黄山风景区崩塌灾害危险性评估及防治对策[J]. 地理研究, 2013, 32(10): 1814-1823.
- [12] 王英. 基于 GIS 及综合权重法的甘肃黄土高原区山洪灾害风险区划研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(8): 118-122.