

[文章编号] 1003-4684(2023)01-0071-05

基于 Weibull 理论的再生混凝土疲劳性能研究

周金枝^{1,2}, 张政¹, 李竞钊¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034)

[摘 要] 采用 MTS 材料动态疲劳试验机对温度循环后的 C、RC、SFRC、SICRC 进行疲劳试验, 研究在不同应力水平作用下(0.9、0.8、0.7)混凝土的疲劳变形特征和疲劳寿命。基于试验数据, 对各试样疲劳寿命进行两参数 Weibull 分布检验, 建立了 p - S - N 方程。结果表明: 与 RC、SFRC 相比, SICRC 在疲劳破坏时有更好的延展性和整体性, 难以破碎破坏; 由同一应力水平下的 S - N 曲线可得出, SICRC 疲劳寿命和疲劳强度均要优于 RC、SFRC; 利用两参数 Weibull 分布理论检验各试样疲劳寿命, 其相关系数 R^2 均高于 0.90, 说明两参数 Weibull 分布理论能够较好的应用于 SFRC 和 SICRC 疲劳寿命检验。

[关键词] 温度循环; 金刚砂; 钢纤维; 疲劳寿命; 两参数 Weibull 分布; p - S - N 方程

[中图分类号] TU312.3 **[文献标识码]** A

我国建筑行业发展日新月异, 城镇化率不断提高, 建筑总数和建筑物高度不断破纪录, 但同时也导致了大量建筑垃圾和工程废料的产生^[1,2]。再生混凝土的出现可以实现建筑垃圾二次以及多次利用, 将工程建筑废料破碎、加工制成再生骨料用做建筑材料, 在减少工程预算成本的同时降低了建筑垃圾对环境的破坏, 符合我国既定的实现可持续发展的战略^[3,4]。目前, 很多学者对再生混凝土的研究主要集中在静力荷载下的力学性能和耐久性能研究, 基本力学性能主要包括: 抗压强度^[5]、抗拉强度^[6]和抗折强度^[7]。如寇佳亮^[8]等研究发现聚乙烯醇(PVA)的掺入可以提升高延性混凝土(HDFC)阻裂能力和变形能力; 赵东佛^[9]等选取 C60 混凝土进行单轴受压疲劳试验, 发现疲劳荷载的加载方式基本不会影响高温处理后的高强混凝土的疲劳残余应变发展趋势; 肖建庄^[10]等试验发现, 在相同试验条件和应力水平下, 普通混凝土的疲劳寿命较低, 钢纤维和金刚砂可以有效的提高再生混凝土的疲劳寿命; 周宏宇^[11]等通过对不同尺寸的立方体试块展开疲劳试验, 发现试块尺寸的增加会造成疲劳损伤值降低和疲劳损伤速率减缓; 郑顺潮^[12]等发现在普通混凝土中掺入适量的钢纤维和聚合物乳胶后, 可以改善材料的韧性, 提高抗疲劳性能。目前, 对于再生混凝土疲劳试验的研究较多, 但对于钢纤维再生混凝土

(SFRC)和金刚砂再生混凝土(SICRC)抗疲劳性能的研究较少; 本文基于试验, 通过研究温度循环对 SFRC 和 SICRC 疲劳性能以及钢纤维和金刚砂对再生混凝土疲劳性能的影响, 为再生混凝土在工程实际中的应用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥采用武汉某公司生产的 P.O 42.5 硅酸盐水泥; 天然粗骨料为普通碎石, 其粒径在 5~30 mm 之间, 连续级配, 表观密度为 2602 kg/m³; 再生粗骨料(预润湿处理)由湖北某教学楼施工工地废弃建筑材料经颚式破碎机破碎而成, 表观密度 2452 kg/m³, 表面多孔隙, 带有尖锐棱角, 并附着体积质量 20% 的水泥砂浆, 与天然粗骨料的表观密度相比, 再生粗骨料的表观密度降低 13%, 而 24 h 吸水率提高了 61%; 砂采用江砂, 细度模数 2.64, 颗粒粒径 < 5 mm, 属 II 区中砂, 含泥量 0.7%; 钢纤维采用抗拉强度 514 MPa、钢纤维密度为 7247 kg/m³ 的剪切波浪型钢纤维; 金刚砂采用 24 目金刚砂, 粒度为 1190 μ m; 拌合水取自生活用水; 外加剂选用某公司生产的聚羧酸减水剂, 减水率为 18%~24%。

1.2 试件配合比设计

按照 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规

[收稿日期] 2021-10-18

[基金项目] 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(BHSL19-04-KF)

[第一作者] 周金枝(1964—), 女, 湖北武汉人, 工学博士, 湖北工业大学教授, 研究方向为土木工程材料和结构强度设计与仿真

[通信作者] 张 政(1997—), 男, 湖北襄阳人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为土木工程材料和结构强度设计与仿真

程》，本试验选取某工程实际所用的 C30 配合比。本试验选取 20% 的再生粗骨料取代率制备再生混凝土，外掺体积分数为 1% 的钢纤维制备 SFRC，选取细骨料质量 10% 的金刚砂取代江砂制备 SICRC。本试验参照《普通混凝土力学性能试验法标准》(GB/T50081—2016) 分别对 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试样进行力学试验和单轴受压疲劳试验，基本力学试验主要包括：立方体抗压强度

和抗拉强度试验。疲劳试验的试件分为四组 (C、RC、SFRC、SICRC)，每组按照三种不同的应力水平 (0.90、0.80、0.70) 和不同温度循环次数 (0、50、100、150) 分别进行试验，温度循环指以 1 ℃/min 的温度变化速率从 0 ℃ 匀速升高到 80 ℃ 后，保持 80 min 再以相同速率匀速降低到 0 ℃ 如此重复循环。试件配合比如表 1 所示。

表 1 各组试件材料配合比

试件编号	水泥	砂	粗骨料		掺合料		外加剂	水	钢纤维	金刚砂
			天然	再生	粉煤灰	S95 矿粉				
C	210	835	1030	0	60	100	12.58	160	0	0
RC	210	835	824	206	60	100	15.91	160	0	0
SFRC	210	835	824	206	60	100	15.91	160	78.5	0
SICRC	210	751.5	824	206	60	100	15.91	160	0	83.5

2 试验结果与分析

2.1 试块破坏特征

温度循环 150 次后不同类型的再生混凝土试块外表面出现裂缝、缺角、疏松以及外表面完整度缺失等物理变化，各试件破坏形态如图 1 所示。

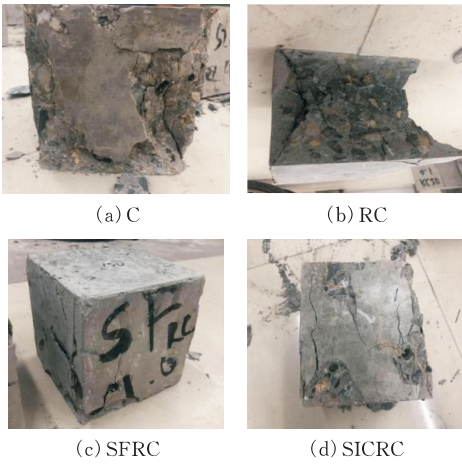


图 1 温度循环 150 次下混凝土试块的疲劳破坏形态

试块的疲劳破坏形态与静力荷载试验下的破坏形态基本一致^[13]，混凝土内部产生不稳定裂缝^[14]，随着试验的进行，逐渐达到极限荷载，裂缝发展为连贯的稳定裂缝，最终发生脆性破坏^[15]。与 C 相比，RC 破坏形态明显，缺角且外表面完整度出现较大程度的损失，在裂缝和外表皮脱落处可以观察到大量的骨料，这是由于再生粗骨料对比天然骨料而言，其抗压性能较差，在应力水平的持续作用下，裂缝延展较大并迅速发展，造成试块破坏程度加剧和破坏速率提高；与 RC 相比，SFRC 和 SICRC 疲劳破坏后各方面的性能较好，其结构依旧完整，破坏程度较低。在 SFRC 表面出现裂缝处能够观察到内部钢纤维，随着压应力作用时间的不断增加，钢纤维随之拔

出和拔断，有效延滞基体混凝土裂缝的开展和拓宽，试件抵抗变形和耗能能力显著提升，破坏呈现延性破坏的特征。SICRC 表面光滑整体完整度最高，这是由于混凝土内部骨料之间原本存在空隙，小体积金刚砂的掺入可以有效填补部分空隙，从而达到提高混凝土密实度的效果。

2.2 温度循环对拉压比的影响

试件拉压比，随着温度循环次数的累加，各混凝土试样的拉压比呈现出不同趋势，在温度循环次数为 0 时，各试样拉压比最高，可达到 0.092，温度循环次数为 150 时拉压比最低，如图 2 所示。温度循环 50、100、150 次后，SFRC 的拉压比分别下降了 15.2%、13.1%、16.5%；SICRC 的拉压比分别降低了 2.4%、3.7%、8.3%，降幅与 SFRC 相比低了许多。随着温度循环次数的累加，各类混凝土的拉压比逐渐降低，表明温度循环作用使混凝土的拉压比降低，在一定范围内，随着循环次数的增加，混凝土的塑性降低，脆性增强。

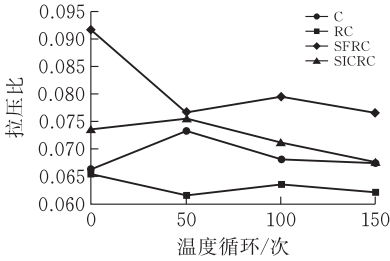


图 2 各试件拉压比

2.3 试块疲劳寿命

试验得出三种不同应力水平 0.90、0.80、0.70 下 C、RC、SFRC 和 SICRC 单轴抗压疲劳平均寿命，为具体分析试验数据，遂将各应力水平作用下试样的疲劳寿命数值进行取对数处理，所得数值作为疲劳平均寿命。实际工程中，普遍采用 S-N 曲线来评估

混凝土材料的疲劳寿命, $S-N$ 曲线能够直观的体现出应力水平 S 和疲劳寿命 N 之间的线性相关性,其数学表达式为: $S = -A \lg N + B$, A 和 B 均为线性回归系数。图 3 展现了不同混凝土单轴抗压疲劳作用和疲劳寿命之间的单对数线性关系。

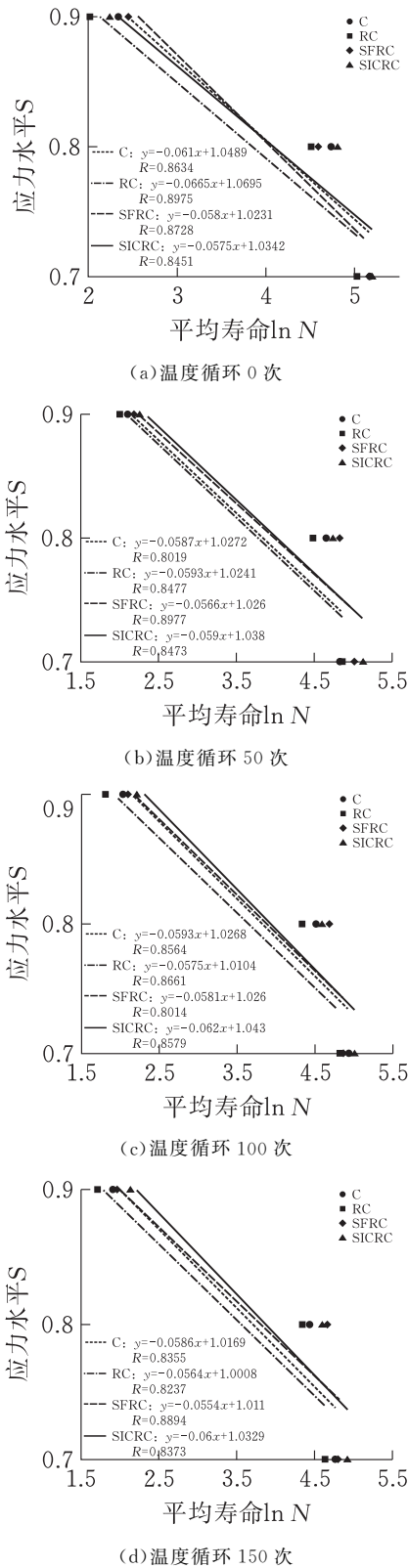


图 3 混凝土疲劳作用下的 $S-N$ 曲线

以上各式的相关系数 R^2 均大于 0.8,可见混凝土

的 $S-N$ 曲线具有较好的线性相关性,在同一应力水平作用下,钢纤维再生混凝土和金刚砂再生混凝土的疲劳寿命均高于再生混凝土的疲劳寿命。这是因为金刚砂可以提高材料的水化产物均匀度,同时金刚砂粒径较小可以填补混凝土内部的空缺,增强混凝土内部的粘结力和密实度。而钢纤维的掺入,可以填补混凝土内部孔隙,抑制裂缝的开展,两种材料对混凝土试块疲劳寿命均会产生有利作用,延长疲劳寿命。

3 疲劳方程及疲劳分析

3.1 疲劳方程

目前的研究中,两参数 Weibull 分布理论被广泛应用于混凝土材料的疲劳寿命的研究和分析,故本试验采用两参数 Weibull 分布理论对温度循环下再生混凝土的单轴抗压疲劳寿命进行研究。受混凝土试块制作工艺的限制,混凝土试块在制作过程中会出现不可抗力因素的干扰,为确保疲劳寿命的试验数据和分析结果安全可靠,降低疲劳寿命数值的离散性,本试验将三参数 Weibull 分布理论中的位置参数设置为零,即选择双参数 Weibull 分布理论进行疲劳寿命分析。双参数 Weibull 分布方程可表示为:

$$\ln[\ln(1/p)] = b \ln N - b \ln N_a \tag{1}$$

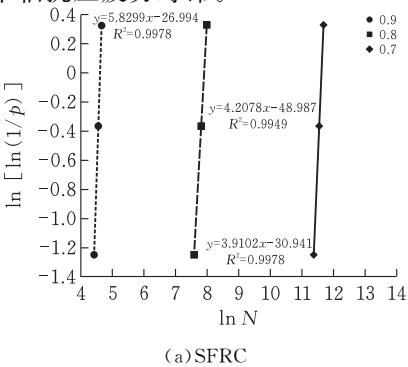
式中 p 指存活率, N 指疲劳寿命, N_a 指特征寿命参数, b 指双对数直线方程的斜率。

从式(1)中可以得到 Weibull 参数,发现 $\ln[\ln(1/p)]$ 和 $\ln N$ 呈线性关系,令 $y = \ln[\ln(1/p)]$, $x = \ln N$, $a = b \ln N_a$,可得

$$y = bx - a \tag{2}$$

根据各应力水平下 SFRC 和 SICRC 疲劳参数和试验结果计算存活率 $p = 1 - i / (k + 1)$ 。采用线性拟合得到 SFRC 和 SICRC 在各应力水平下的 $\ln[\ln(1/p)]$ 关系图,如图 4 所示。

各应力水平作用下, R^2 均大于 0.9,线性关系较好,说明两参数 Weibull 分布理论适合 SFRC 和 SICRC 的单轴抗压疲劳寿命。



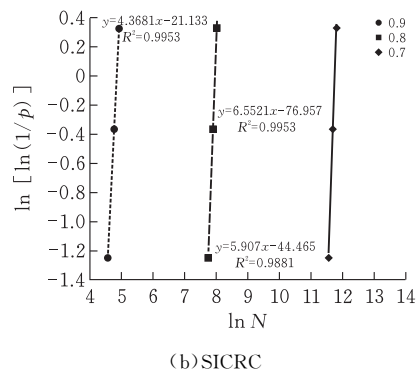


图 4 SFRC 和 SICRC 两参数 Weibull 分布验证

3.2 *p*-*S*-*N* 疲劳方程

考虑失效概率下的 Weibull 方程为：

$$p' = 1 - p = 1 - \exp \left(- \frac{N'}{N_a} \right)^b \tag{3}$$

N 为失效概率 *p*' 下的疲劳寿命：

$$N' = N_a \left| \ln(1 - p') \right|^{\frac{1}{b}} \tag{4}$$

采用 Weibull 分布理论可以得到不同失效概率下 SFRC 和 SICRC 的疲劳寿命，以双对数形式对 SFRC 和 SICRC 的等效疲劳寿命进行线性拟合，得出不同失效概率下 *S*-*N* 方程，即 *p*-*S*-*N* 方程：SFRC 和 SICRC 等效疲劳寿命分别进行双对数疲劳方程线性回归，可得 0.10 和 0.50 失效概率下的 *S*-*N* 曲线，即 *p*-*S*-*N* 方程。将拟合后的双对数方程绘制成曲线，如图 5 所示，可以发现 SFRC 和 SICRC 疲劳寿命几乎全部处于 0.05—0.50 失效概率区间内。

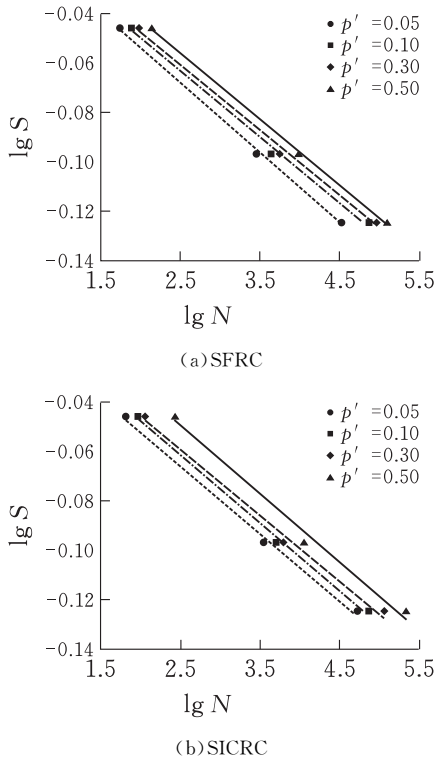


图 5 SFRC 和 SICRC 疲劳寿命分布与 *p*-*S*-*N* 关系

4 结论

根据 SFRC 和 SICRC 在不同应力水平下的单轴抗压疲劳试验结果，得出以下结论：

1) 金刚砂的掺入可以减缓裂缝的展开，提升材料抵抗变形的能力，SICRC 在疲劳破坏时外表面完整度比 SFRC 更高。

2) 同一应力水平作用下，温度循环后 SICRC 的抗压疲劳性能优于 SFRC，在应力水平变化时，SICRC 的疲劳寿命敏感度更低，且在同一失效概率下，SICRC 的疲劳寿命预测值较大。

3) 再生混凝土疲劳寿命的离散型与应力水平呈正相关，且 SFRC 和 SICRC 的疲劳寿命的离散性均小于 RC。SFRC 和 SICRC 疲劳寿命均服从两参数 Weibull 分布，并可得出应力水平—疲劳寿命的 *S*-*N* 单对数方程曲线和不同失效概率下的 *p*-*S*-*N* 双对数方程曲线，为工程实际应用提供理论依据。

[参 考 文 献]

[1] 肖绪文,冯大阔,田伟.我国建筑垃圾回收利用现状及建议[J].施工技术,2015,44(10):6-8.

[2] 张晓华,孟云芳,任杰.浅析国内外再生骨料混凝土现状及发展趋势[J].混凝土,2013(07):80-83.

[3] ZHENG L,WU H Y,ZHANG H,et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China[J]. Construction and Building Materials,2017,136: 405-413.

[4] 肖建庄,雷斌.再生混凝土耐久性能研究[J].混凝土,2008(05):83-89.

[5] XIAO J Z,LI J B,ZHANG C. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview[J]. Materials and Structures, 2006,39(06) :655-664.

[6] LAMOND J F,CAMPBELL SR R L,GIRALDI A,et al. Removal and reuse of hardened concrete[J]. ACI Materials Journal, 2002,99(03) : 300-325.

[7] XIAO J Z,LI J B,ZHANG C.Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (06) : 1187-1194.

[8] 寇佳亮,李孝坤,王华丞,等.高延性混凝土单轴受压疲劳性能试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(04):315-324,345.

[9] 赵东拂,高海静,刘禹辰,等.高温后高强混凝土受压疲劳性能研究[J].工程力学,2018,35(08):201-207.

[10] 肖建庄,李宏.再生混凝土单轴受压疲劳性能[J].土木工程学报,2013,46(02):62-69.

[11] 周宏宇,刘洪宇,赵晓花,等.混凝土材料疲劳抗压损伤机理及其尺寸效应研究[J].混凝土,2019(12):1-5.

[12] 郑顺潮,黄培彦,郭馨艳.钢纤维聚合物高强混凝土疲劳性能的实验研究[J].实验力学,2011,26(01):1-7.

[13] 梁俊松,丁兆东,李杰.混凝土结构疲劳全过程分析方法研究[J].建筑结构学报,2017,38(05):149-157.

[14] 郭洪军,汪静,宗炜,等.有机纤维与聚合物对水泥混凝土疲劳损伤性能的影响[J].混凝土,2019(04):71-75.

[15] 刘月,谷倩,田水,等.钢纤维增强混凝土疲劳性能圆板试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(05):1356-1361.

Experimental Study on Compressive Fatigue Performance of Recycled Concrete under Temperature Cycling

ZHOU Jinzhi^{1,2}, ZHANG Zheng¹, LI Jingqian¹

(1 School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China ;
2 State Key Laboratory for Health and Safety of Bridge Structures , Wuhan 430034, China)

Abstract: In this experiment, MTS material dynamic fatigue testing machine was used to conduct fatigue tests on ordinary concrete, C, RC, SFRC, SICRC after temperature cycling treatment, and the fatigue deformation characteristics and fatigue life of each specimen under different stress levels were studied. Based on the test data, the fatigue life of each specimen was tested by two-parameter Weibull distribution, and the p - S - N equations were established. The result shows that compared with RC and SFRC, SICRC has better ductility and integrity in fatigue failure, and is difficult to break and destroy. According to the S - N curve at the same stress level, the fatigue life and fatigue strength of SICRC are better than those of RC and SFRC. The two-parameter Weibull distribution theory was used to test the fatigue life of each specimen, and the correlation coefficient R^2 was higher than 0.90, indicating that the two-parameter Weibull distribution theory can be well applied to the fatigue life tests of RC, SFRC and SICRC.

Keywords: temperature cycling; corundum; steel fiber ; fatigue life; two-parameter Weibull distribution; p - S - N equation

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 70 页)

Research on The Lakebed Sludge Characteristics of Honghu Lake and Its Feasibility of Producing Organic Fertilizer

WANG Ruilu¹, LIU Zhan¹, DONG Wei¹, WU Xiangpeng², CHEN Shuai¹, WAN Duanji³

(1 Wuhan Kunjian Ecological Environment Planning and Design Co. LTD, Wuhan 430080,China ;
2 School of Information and Media ,Hubei Land Resources Vocational College ,Wuhan 430090,China ;
3 School of Civil Engin. Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: To investigate the feasibility of producing organic fertilizer from the lakebed sludge of Honghu Lake,the organic matter, nutrients,and heavy metals contents of the sludge collected at Honghu Lake were detected and analyzed.The results showed that the average content of organic matter was 10.5%, which indicated a moderate pollution state.The content of total nitrogen(TN)was 4026 mg/kg, which indicated a severe pollution state.The content of total phosphorus(TP)was 1632 mg/kg, which indicated a moderate pollution state.In addition, the average contents of heavy metals mercury(Hg),lead(Pb),cadmium(Cd),and chromium(Cr)in the lakebed sludge were all lower than the limit standards of organic fertilizer.But the content of arsenic(As)was slightly higher than limit standards.The single-factor pollution index (P_i)of Hg,Pb,Cd,Cr,and as in the whole lake were all ≤ 1 ,which was defined as a pollution-free state. The Nemero index(P)of comprehensive pollution of heavy metals in the southern and northern lake areas were 0.81 and 0.80,respectively,which were in a clean state.Based on the above analysis,it is determined that the lakebed sludge of Honghu Lake was a good resource for producing organic fertilizer.

Keywords: lakebed sludge of Honghu lake; organic matter; nutrients; heavy metal; organic fertilizer

[责任编辑: 裴 琴]