

人工湿地不同工艺组合经济效益比较分析

刘永军^{1,2}, 黄有志¹, 熊家晴¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要:采用削减系数法及主成分分析法, 对人工湿地不同工艺组合去除 COD、BOD、NH₃-N、TN、TP、SS 的经济效益进行比较分析. 以西安皂河实验人工湿地的五种不同组合类型为例, 通过计算分析得出: 垂直潜流+水平潜流人工湿地的组合的经济效益最优, 适宜于北方地区废水处理.

关键词:人工湿地; 组合工艺; 经济效益; 削减系数

中图分类号: X 820. 6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)04-0535-06

人工湿地是一种人工建造的, 通过自然生态系统中的物理、化学和生物三者的协同作用达到对污水净化的一种污水处理工艺^[1], 其工艺组合一般为表流—潜流, 水平潜流—垂直潜流, 不同植物表流湿地, 不同植物潜流湿地等等^[2]. 其中水平潜流和垂直潜流工艺系统组合, 可形成优势互补, 在去除有机污染物的同时也增强了 TN 的去除率^[3]. 但也有研究者指出, 如果这类湿地组合不经过回流就会影响硝化以及后续的沉淀效果^[4]. 对于水平潜流与表面流湿地工艺系统组合, 有学者研究表明其有机负荷较高, 显著提高对有机物、TN、TP 的处理效果, 但悬浮物浓度在经此段后有所上升^[5]. 各种人工湿地组合类型都有其优缺点. 所以, 建立一种经济性能与处理效果相结合的评价体系对于人工湿地系统的选择与设计就显得尤为必要.

已有的评价往往都是采用单一的处理效果评价而忽略了其投资运行费用评价^[6-9], 或者是只采用净现值(NPV)、内部收益率、投资回收期等来判断污水处理方案的经济效益优劣^[10-13]. 将两者结合起来进行评价, 国内外的报道还不多见. 由于各种组合的人工湿地系统在投资建设费用、管理运行费用、处理污染物效果上均不相同, 产生的效益难以用现实中的货币来衡量, 所以无法直接用传统的技术经济方法来评价其经济效益. 国内外学者目前对人工湿地经济性评价常采用的方法是对单一的人工湿地进行生态价值和国民经济性的评价^[14-17], 但此类评价方法存在包含了许多不确定的因素, 而且很难避免误差的出现, 所得的最终数据准确性不高等缺点^[18]. 本文将削减系数法与主成分分析法相结合, 对人工湿地不同工艺组合去除 COD、BOD、NH₃-N、TN、TP、SS 的经济效益进行比较分析, 这对人工湿地系统的选择与设计具有重要的参考价值.

1 人工湿地不同组合系列的经济评价

1.1 人工湿地系列概况

以西安皂河人工湿地做为实例分析. 皂河人工湿地实验湿地位于在建沿河大道皂河大桥下游 300 m, 距离沿江大道 250 m, 试验用地长 180 m, 宽 60 m, 占地约 15 hm². 设计处理规模为 600m³/d, 实际进水为 350m³/d. 湿地利用风光互补系统提供动力将河水提升至配水池, 由配水池向各个系统进行配水. 污水经过人工湿地处理并汇集到出水池, 自流回到皂河. 皂河人工湿地流程如图 1 所示, 表 1 为人工湿地不同系列的基本情况.

收稿日期: 2012-01-16 修改稿日期: 2012-07-11

基金项目: 国家重大水专项资金资助项目(2008ZX07317-004), 陕西省重点实验室资金资助项目(2010JS026)

作者简介: 刘永军(1969-), 男, 陕西横山人, 博士, 教授, 主要从事污染环境的生态修复的研究.

1.2 评价方法的选择

评判一项工艺组合是否经济效益高,最重要的一个指标就是性价比,也就是说单位成本每天削减的污染物量。我们



图1 皂河人工湿地流程图

Fig. 1 The flow chart of Zaohe River constructed wetland

采用由阿科曼控股有限公司 CEO 麦何晖提出的“削减系数”概念。该方法以单位投资成本每天削减污染量作为量化数据,在对主要污染指标等量削减的前提下,通过量化各种投资数值比来判断一项技术体系是否具有最优性价比。“削减系数”得出的值越高,表明这种技术体系单位投资效率越高。用公式可以描述为:

$$\alpha(\text{削减系数}) = C / (A + B)$$

其中: A=人工湿地总投资按照 20 年为年限计算出的“每天投资总额”;

B=系统每天营运总费用;

C=每天系统削减的污染物量;

$$\alpha(\text{削减系数}) = \text{污染物单位投资加运行的削减量};$$

这种评判方法首次应用在人工湿地不同组合的经济效益比较。此方法克服了不同组合的人工湿地难以用传统技术经济方法评价的缺点,将处理效果与成本经济性有机的结合在一起,有助于发掘性价比最优的人工湿地组合工艺。

1.3 计算过程及数据分析

表1 人工湿地不同系列基本情况

Tab. 1 Basic information of various type of constructed wetland

湿地系列	池子组成元素	池子面积 /m ²	处理水量 /t·d ⁻¹
系列 1	垂直潜流+水平潜流	843	70
系列 2	水平潜流+表流	1 374	70
系列 3	垂直潜池+水平潜流+表流	2 015	70
系列 4	水平潜流+表流	2 257	70
系列 5	表流+表流	2 139	70

湿地系统于 2010 年 9 月建成并开始运行,定期每周分析进、出水的水质。经过近一年的运行,湿地系统发育成熟,处理效果稳定。数据采用 2011 年 2 月~7 月期间所收集的水样数据。各指标测定方法参照《水和废水检测分析方法》^[18]。

该人工湿地中,系数 A 指标为:湿地建设费用,板房土建费用,铺设滤料费用,管道购买安装费用,植物购买种植费用,风光互补发电系统费用,泵的购买安装费用,柴油发电机费用,以及日常办公品费用和勘察,调研设计费用。

系数 B 指标为:柴油动力费用,工人管理工资费,植物虫害防治费用,植物收割整理费用以及固定资产折旧费。

系数 C 指标为:污染物 COD, BOD, TN, TP, NH₃-N, 以及 SS 削减量。

以系列 1 的 COD 削减系数进行计算说明:

$$C = (264.45 \text{ mg/l} - 99.98 \text{ mg/l}) = 164.47 \text{ mg/l} \cdot \text{d} \times 70 \text{ t/d} = 11\,512.9 \text{ g/l};$$

$$A = \text{系列 1 总投资费用} \div 20 \text{ a 折旧} \div 365 \text{ d} = 15.18 \text{ 元/d};$$

$$B = (0.38 \text{ 元/t} \times 70 \text{ t/d}) = 26.6 \text{ 元/d};$$

$\alpha(\text{削减系数}) = 275.56 \text{ g/元}$, 即系列 1 人工湿地 1 元能处理 275.56 gCOD(其余系列计算过程均以此类推)。

根据主成分分析法^[19-20]的具体步骤,将原始计算数据进行标准化后求出相关系数矩阵,用 SPSS17 软件分别对 6 个评价指标 $\alpha\text{COD}(X_1)$ 、 $\alpha\text{BOD}(X_2)$ 、 $\alpha\text{NH}_3\text{-N}(X_3)$ 、 $\alpha\text{TP}(X_4)$ 、 $\alpha\text{TN}(X_5)$ 、 $\alpha\text{SS}(X_6)$ 的相关系数矩阵和特征值进行计算,确定评价的主因子数。据特征值方差累计贡献率确定选取主成分的个数。然后据主成分的步骤得到相应的主成分表达式及综合评价函数,得出综合排名。

2 结果及讨论

2.1 湿地各组合工艺间投资成本与运行成本比较

湿地各组合工艺间投资成本与运行成本比较结果如表 2 所示。可以看出,总成本和运行成本偏高,总

体投资费用达 72.15 万元,单位制水成本达到 0.28 元/t·d.总的投资高主要是由于是实验性湿地,规模小,单位面积所承担的费用就偏高所造成的.管理运行费用偏高,处理的行费估计过高,不能代表正在使用中的湿地系统的运行费用,实际运行费要少得多.从上表中可以看出人工湿地单位水量投资成本从大到小排列依次为系列 3>系列 4>系列 5>系列 2>系列 1. 主要因为系列 3 前端是垂直潜流湿地,增加了管道建设的费用,所以造价比较高.单位水量运行成本从大到小排列依次为系列 4>系列 6>系列 3>系列 2>系列 1. 每天的进水量每个池子基本上都是在 70 m³,造成了系列 4 的单位水量投资成本的增加.

2.2 不同湿地系列污染物削减系数比较

5 个湿地系列 COD, BOD, TN, TP, NH₃-N, 以及 SS 削减量以及削减系数如表 3、图 2 所示.

2.2.1 COD 削减系数的比较

由图 2 可知,本研究 5 组人工湿地组合中,各组人工湿地对 COD 经济效益都较高,系列 1 对 COD 的经济效益最高,为 275.56 g/元;系列 5 单一表流组合 COD 的经济效益最低,为 130.45 g/元.分析认为,水平潜流池具有较高的水力负荷和污染物负荷,因而对 COD 的去除效果较好,系列 1 的成本也较低.说明垂直潜流+水平潜流组合比单一表流组合的经济效益要好很多.

2.2.2 BOD 削减系数的比较

系列 2 子和系列 4 都是一级潜流+表流组合型人工湿地,从图 2 中可以看出系列 2 的 BOD 经济效益明显好于系列 4,经过分析笔者认为,系列 2 面积小,在进水负荷一定的情况下,单位面积植物更容易获得营养,所以系列 2 植物长势良好,有较发达的根系有利于 BOD 浓度的降低.即使系列 2 成本比系列 1 稍高,由于其处理效果好,所以系列 2 的处理 BOD 经济效益最好.

2.2.3 NH₃-N 削减系数的比较

从表 3 中可知,系列 4 系统对 TN, 以及 NH₃-N 的去除效果最好,削减的污染物量分别为 20.68 mg/L 和 22.26 mg/L. 分析认为,水平流湿地单元整个床体被污水充满,湿地内部为厌氧环境,适合反硝化菌生长,反硝化作用较强;表流湿地单元污水从湿地表面流经植物,水流直接与大气接触,氧气充足,具有硝化能力强.而水平潜流+表流组合,类似于硝化+反硝化工艺,有利于微生物硝化反硝化作用的发生,能显著提高 N 去除率.符合籍国东,孙铁衍等人^[21]的研究成果,虽然系列 4 的成本较高,但因其处理 N 的效果好,所以 αNH₃-N, αTN 高.

表 2 各类型人工湿地的成本

Tab. 2 The cost of various type of constructed wetland

湿地系列	投资成本 分析/元	单位水量 投资成本 /元·(t·d) ⁻¹	运行成本 分析/元	单位水量 运行成本 /元·(t·d) ⁻¹
系列 1	110 824.87	0.22	9 829.80	0.38
系列 2	125 234.70	0.25	12 457.48	0.49
系列 3	171 037.26	0.33	15 635.16	0.61
系列 4	167 877.24	0.33	16 828.91	0.66
系列 5	146 568.18	0.29	16 244.89	0.64
总计	721 542.25	0.28	70 996.24	0.56

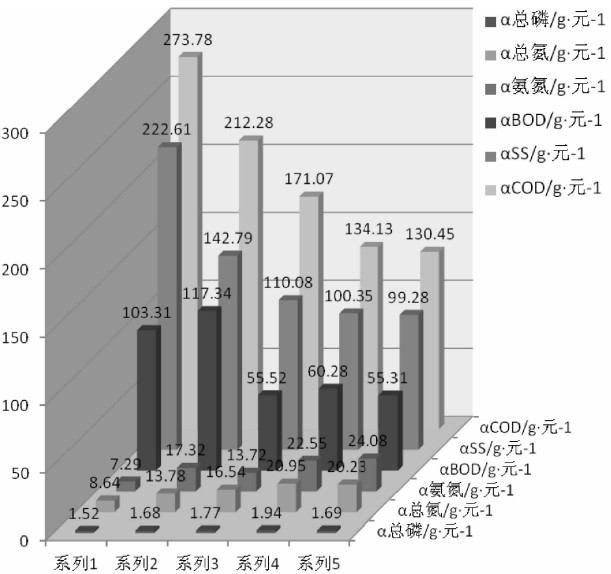


图 2 各类型湿地削减系数比较
Fig. 2 Reduction factor comparison of various type of constructed wetland

表 3 各湿地系列污染物的削减量

Tab. 3 Treatment effect of various type of constructed wetland

湿地系列	主要污染物的削减量 /mg·L ⁻¹					
	COD	BOD	NH ₃ -N	TP	SS	TN
系列 1	164.47	62.15	4.39	0.91	133.93	5.20
系列 2	155.53	85.97	12.69	1.23	104.62	10.10
系列 3	161.94	52.55	12.99	1.67	104.21	15.66
系列 4	132.41	59.51	22.26	1.92	99.06	20.68
系列 5	120.36	51.03	22.22	1.56	91.60	18.67

2.2.4 TP 削减系数的比较

从表3可以看出,各系统对TP都具有一定的去除能力(削减量为0.96~1.92 mg/L),再由于各系统的成本的差异较小,结合图2分析,可知各对照组合工艺之间对TP的经济效益无显著差异,说明除P的经济效益与组合工艺无关,这符合DRIM A的研究成果^[22].此外,有学者研究表明^[23]煤渣作为基质的除磷效果较好,系列4含粒径为5~10 mm的煤渣260.97 m³,为各组合中最多的,所以其除P的经济效益略好于其它工艺组合.

2.2.5 SS 削减系数的比较

从图2中可明显的看出垂直潜流+水平潜流组合(系列1)经济效益比其它带有表流池的工艺组合要好很多,是表流组合工艺的2.24倍,究其原因,笔者认为,水平潜流湿地中相对低的流速和大的基质面积,使得固态悬浮物被根系植物以及填料阻挡截留.反之,表流型人工湿地水流在基质表面经过,污水不发生地表漫流,污水与基质的接触不够充分.所以其截留的固体悬浮物有限,处理效果不及潜流湿地,再由于成本也较高,所以导致除SS的经济效益没有潜流组合型人工湿地高.

2.3 人工湿地不同系列组合经济效益综合评价

用spss17分析各种人工湿地工艺组合去除不同污染物的经济效益得出其综合评价方程为: $F=0.44Zscore(\alpha COD)+0.36Zscore(\alpha BOD)-0.39Zscore(NH_3-N)-0.38Zscore(\alpha TP)+0.43Zscore(\alpha SS)-0.43Zscore(\alpha TN)$

从图2中可以看出垂直潜流+水平潜流组合除了对去除N的经济效益较低,其它方面均优于其它组合类型湿地,尤其在对处理有机物(αCOD 和 αBOD)以及固体悬浮物 αSS 的经济效益非常高,从表4综合主成分值得出其经济效益上最优,因此使用垂直潜流+水平潜流组合人工湿地能满足改善皂河水质的要求,投资合理,运行费用低,适宜北方废水处理.

组合人工湿地系统的工艺设计多是多种流态湿地相结合,构成多级处理系统,共同实现污水净化的目标.成本比普通的污水厂二级工艺(运行费用大约为1.1~1.3元/t)要低,而且有一定的观赏价值和植物经济价值,是一项值得推广的技术.综合上考虑,该技术具有

投资低、运行维护稳定及费用低等优点,相对于污水二级处理更适用于小城镇、农村的废水处理.

此次不同湿地组合的经济效益评价由于进水量较设计时低,各池子的面积差异很大,但进水都是均匀布水,均是70 m³/d,从而造成了估算偏高.

表4 综合主成分值及排名

Tab. 4 Score of the comprehensive of component and grade

湿地系列	综合得分	综合排名	αCOD	αBOD	αNH_3-N	αTP	αSS
系列1	3.36	1	1.49	0.84	-1.42	-1.31	1.68
系列2	1.02	2	0.47	1.31	0.05	-0.28	0.15
系列3	-0.55	3	-0.22	-0.77	-0.48	0.31	-0.48
系列5	-1.67	4	-0.90	-0.78	1.04	-0.16	-0.69
系列4	-2.16	5	-0.84	-0.61	0.82	1.45	-0.67

参考文献 References

- [1] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86.
WU Xiao-lei. Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 1995, 16(3): 83-86
- [2] 邓欢欢, 葛利云, 顾国泉. 水平潜流和组合人工湿地水处理研究进展[J]. 工业用水与废水, 2007, (2): 1-4.
DENG Huan-huan, GE Li-yun, GU Guo-quan. Research progress on horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetland systems for water treatment[J]. Industrial Water & Wastewater, 2007, (2): 1-4.
- [3] COOPER P F. A review of the design and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems[J]. Water Sci Technol, 1999, 4(3): 1-9.
- [4] LABER J, HABERL R, LANGERGRABER G. Treatment of hospital waste-water with a 2-stage constructed wetland system[C]. Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2003.
- [5] MaSi F, CONTE G, MARTINUZZI N, et al. Winery high organic content wastewaters treated by constructed wetlands in Mediterranean climate[C] // Proceedings of Eighth International Conference Wetland Systems for Water

- Pollution Control, Tanzania; IWA and University of Dares Salaam, 2002.
- [6] 陈德强, 吴振斌, 成水平. 不同湿地组合工艺净化污水效果的比较[J]. 中国给水排水, 2003(19): 12-15.
CHEN De-qiang, WU Zhen-bin, CHENG Shu-ping. Comparison on the combination system of different constructed wetland processes for wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2003(19): 12-15.
- [7] 刘超翔, 胡洪营, 张 建. 不同深度人工复合生态床处理农村生活污水的比较[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 92-96.
LIU Chao-xiang, HU Hong-ying, ZHANG Jian. Rural sewage treatment performance of constructed wetlands with different depths[J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2003, 24(5): 92-96.
- [8] 田景宏, 黄柄彬. 人工湿地处理永定河微污染河水试验研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(6): 82-86.
TIAN Jing-hong, HUANG Bing-bin. Study on the efficiency of different constructed wetland process for micro-polluted river water treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(6): 82-86.
- [9] 肖宇芳, 王文忠, 王 文. 水平潜流和垂直流湿地处理蓟运河水的效果比较[J]. 中国给水排水, 2010(7): 12-15.
XIAO Yu-fang, WANG Wen-zhong, WANG Wen. Comparison between horizontal subsurface-flow and vertical-flow constructed wetlands for treatment of Jiyun river water[J]. China Water & Wastewater, 2010(7): 12-15.
- [10] 刘培富. 住宅小区中水回用的技术经济分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2004: 30-46.
LIU Pei-fu. Economy and technology analysis of wastewater reuse system of residential area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004: 30-46.
- [11] 米志立. 深圳市污水处理效果和经济性分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2006: 48-68.
MI Zhi-li. Shenzhen sewage treatment effect and economic analysis[D]. Changsha: Hunan University, 2006: 48-68.
- [12] 唐新明. 长春市污水处理效果及经济性分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2009: 31-41.
TANG Xin-ming. Changchun sewage treatment effect and economic analysis[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2009: 31-41.
- [13] 熊蓉春, 魏 刚. 水处理技术的经济评价[J]. 给水排水, 1999, 25(3): 44-46.
XIONG Rong-chun, WEI gang. Economical estimation of water treatment technology[J]. Water & Wastewater Engineering, 1999, 25(3): 44-46.
- [14] 沈万斌, 赵 涛, 刘 鹏. 人工湿地环境经济价值评价及实例研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 70-73.
SHEN Wan-bin, ZHAO Tao, LI Peng. Assessment of Environmental and Economic Values for Constructed Wetland and a Case Study[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(2): 70-73.
- [15] 董金凯, 贺 锋, 吴振斌. 人工湿地生态系统服务价值评价研究[J]. 环境科学与技术, 2009(8): 187-193.
DONG Jin-kai, HE Feng, WU Zhen-bin. Valuation of ecosystem service for constructed wetland[J]. Environmental Science & Technology, 2009(8): 187-193.
- [16] CONTANZA R, D'arce R. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Natural, 1997(387): 253-260.
- [17] YANG W. Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: A case study in Hangzhou, China[J]. Ecological Economics, 2008(68): 116-125.
- [18] 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], 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
National Environmental Protection Bureau "analysis method for monitoring water and waste" editorial board analysis. Method for monitoring water and waste[M], 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [19] 李小胜, 陈珍珍. 如何正确应用 SPSS 软件做主成分分析[J]. 统计研究, 2010, (8): 105-108.
LI Xiao-sheng, CHEN Zhen-zhen. Correctly using SPSS software for principal components analysis[J]. Statistical Research, 2010(8): 105-108.
- [20] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用[J]. 市场研究, 2005(12): 31-34.
ZHANG Wen-lin. Principal component analysis of the operations in the SPSS application[J]. Marketing Research, 2005(12): 31-34.
- [21] 籍国东, 孙铁衍, 常士俊. 自由表面流人工湿地处理超稠油废水[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 95-99.
JI Guo-dong, SUN Tieheng, CHANG Shi-jun. Super heavy oil produced water treatment by surface flow constructed wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2001, 22(4): 95-99.
- [22] DRIM A. Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow, using shale as

a substrate[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 19-25.

- [23] 朱夕珍, 崔理华, 温晓露. 不同基质垂直流人工湿地对城市污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 454-457.
ZHU Xi-zhen, CUI Li-hua, WEN Xiao-lu. Removal efficiency of different substrates used in vertical flow constructed wetlands for treating municipal wastewater[J]. Journal of Agro-environment Science, 2003, 22(4): 454-457.

Comparative analysis of economic efficiency on different combined process of constructed wetland

LIU Yong-jun^{1,2}, HUANG You-zhi¹, XIONG Jia-qing¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University
of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Economic efficiency of COD, BOD, NH₃-N, TN, TP, SS removal in different combined process of constructed wetland by using the method of reduction factor and principal component were analysed. Xi'an Zaohe River experimental constructed wetland was used as a case. The results showed that the composite economic efficiency of horizontal and vertical sub-surface flow constructed wetland system is the best, and this combined process is suitable for the wastewater treatment in China's northern regions.

Key words: *constructed wetland; combined process; economic efficiency; reduction factor*

Biography: LIU Yong-jun, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-013572535980, E-mail: liuyongjun@xauat.edu.cn

(上接第 522 页)

- [18] 苏伯民. 国外遗址保护发展状况和趋势[J]. 中国文化遗产, 2005(02): 104-107.
SU Bo-min. Development status and trends of foreign heritage site protection [J]. China Cultural Heritage, 2005 (02): 104-107.

Research critique and prospect of major heritage site issue in China

LÜ Lin, LÜ Ren-yi, ZHOU Qing-hua

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. and Tech., Xi'an 710055, China;

2. Xi'an JIAN-DA Urban Planning and Design Institute, Xi'an 710055, China;

3. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in west China (XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Through retrospection of the research condition of great heritage site issue over the ten years, the paper analyzes the four main research aspects in this domain including value cognition and evaluation, interpretation measure and technique, protection and utilization mode, as well as the conservation planning of great heritage site. It then gives critique with research tendency prospect, and puts forward research suggestion in the future, so as to promote the development of great heritage site issue study in China.

Key words: *great heritage site; site protection and utilization; site park; research tendency*

Biography: LÜ Lin, Lecturer, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82202943, Email: lv-00@126.com