

城市污水处理生态系统能值分析

张小洪^{1,2}, 蒋文举²

(1. 四川农业大学资源环境学院, 四川雅安 625014; 2. 四川大学建筑与环境学院, 四川成都 610065)

摘要:脱水污泥的污染问题影响了城市污水处理厂的生存和发展, 中水的不同处置方式对当地的水资源和水环境影响也不一样, 将污水处理、脱水污泥和中水处置结合起来构建污水处理生态系统有利于研究污水处理的综合效益、探索促进污水处理事业可持续发展的途径。能值分析方法可作为分析这一复合系统的工具, 传统能值分析方法由于对废物处理处置和排放的影响没有考虑, 因此提出了针对污水处理生态系统的改进的能值分析方法和指标体系, 以明镜滩污水处理生态系统作为案例用两种方法进行了对比分析。结果表明, 改进的能值分析方法更适用于污水处理生态系统的实际情况; 不可更新资源能值流比值 (NR) 和废物排放能值流比值 (WR) 对污水处理生态系统的可持续性影响最大, 其次是中水回用能值流比值 (IR), 污水处理生态系统的可持续性最终取决于 NR 、 WR 和 IR 三者的共同贡献; 废物利用可提高污水处理生态系统的可持续性。不同废物利用方式由于对废物利用的程度不同以及对不可更新资源的消耗不同, 因此对污水处理生态系统的可持续性影响不一样; 在提出的 8 个方案中, “脱水污泥填埋 + 中水排放” 方案的可持续性最低, 而“脱水污泥制堆肥 + 中水回用” 方案的可持续性最高。

关键词:能值分析; 污水处理; 可持续性; 指标体系

文章编号: 1000-0933(2008)05-2300-09 中图分类号: Q148, X171, X826 文献标识码: A

The emergy analysis of municipal sewage treatment ecological systems

ZHANG Xiao-Hong^{1,2}, JIANG Wen-Ju²

1 Resource & Environment College of Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

2 College of Architecture & Environment of Sichuan University, Chengdu 610065, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2300 ~ 2308.

Abstract: Pollution from dewatered sludge affects municipal sewage treatment plants' survival and development, and different intermediate water disposal methods have different impacts on the local water resources and environment. Therefore, it is important to study the comprehensive performance of sewage treatment and explore measures on promoting its sustainability through constructing a sewage treatment ecological system composed of a sewage treatment system, a dewatered sludge disposal system and a intermediate water disposal system. Emergy analysis method has been used to analyze this complicated system. The traditional emergy analysis method ignores the impacts of wastes disposal and discharge and has been improved for evaluating a sewage treatment ecological system. Ming-jing-tan sewage treatment ecological systems projects proposed, as cases, were analyzed by traditional and improved emergy analysis methods. The results show that the improved method is more practical for evaluating a sewage treatment ecological system; the nonrenewable resources emergy ratio (NR) and discharged wastes emergy ratio (WR) have the largest impacts on the sustainability, next comes from

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50410719)

收稿日期: 2007-08-11; 修订日期: 2008-02-25

作者简介: 张小洪 (1970 ~), 男, 重庆垫江人, 博士生, 主要从事污染控制与废物资源化研究. E-mail: zxh19701102@126.com

致谢: 感谢重庆市万州区明镜滩污水处理厂在提供资料方面的帮助; 感谢荷兰莱顿大学 Reinout Heijungs 博士、廖文杰博士对英文摘要的润色, 感谢温州师范大学陈华林博士、北京科技大学彭奎博士对论文修改给予的帮助

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50410719)

Received date: 2007-08-11; **Accepted date:** 2008-02-25

Biography: ZHANG Xiao-Hong, Ph. D. candidate, mainly engaged in pollution controlling and wastes resource recovery. E-mail: zxh19701102@126.com

intermediate water reuse emergy ratio (IR). , The sewage treatment ecological system's sustainability mainly depends on the three factors' common contribution; wastes reuse can increase the sustainability of the sewage treatment ecological system. Different methods of wastes reuse have different impacts on the entire system's sustainability due to different wastes reuse degree and different nonrenewable resources consumption; the emergy sustainable index (ESI) of the project "dewatered sludge land-filling + intermediate water discharge" is the lowest (0.32) and the ESI of the project "dewatered sludge making aerobic compost + intermediate water reuse" is the highest (1.05) among the eight projects proposed.

Key Words: emergy analysis; sewage treatment; sustainability; index system

传统的污水处理系统带来的脱水污泥污染问题已成为污水处理厂生存和发展的重要制约因素之一。新出台的《固体废物污染环境防治法》要求城市污水处理厂加强污泥的处理和处置,这实际上是在延伸其责任^[1]。有的城市污水厂可能由于脱水污泥污染问题得不到妥善处理而面临停运的危险^[2,3]。城市污水处理厂排出的中水有排放和回用两种处置方式,回用既能减小总用水量,节约水资源,又能带来一定的经济效益^[4]。不同的脱水污泥和中水处置方式对人类的经济生活和环境的影响不一样^[1,5],因此,将污水处理、污泥处置和中水处置方式结合起来,建立污水处理生态系统并研究其可持续性对于污水处理事业的可持续发展有重要的意义。能值(emergy),由美国著名生态学家 H. T. Odum 创立,是一种包被能(embodied energy),它不仅考虑了产品所包含能量的质和量,还体现了能量的历史积累,具有“记忆效应(energy memory)”,能值分析理论与方法是一种新的生态经济价值论和系统分析方法,它对正确分析人类与自然、环境资源与社会经济价值的相互关系,以及制定可持续发展战略有重要作用^[6~8]。Ødegaard、Bengtsson、Erik Grönlund、G. Siracusa 等^[9~11]运用生命周期评价方法和能值分析方法对污水处理系统不同运行阶段、不同处理工艺对环境的影响展开了研究,但将污水处理系统、中水处置系统和脱水污泥处置系统结合在一起进行的研究还鲜见报道。

本文在传统能值分析方法的基础上,建立起基于能值的污水处理生态系统的评价指标体系,并以重庆市万州区明镜滩污水处理厂为案例进行了验证。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象—明镜滩污水处理生态系统

明镜滩污水处理厂位于重庆市万州区,其工艺采用奥贝尔氧化沟。该工程总投资 8081 万元,于 2003 年 7 月通过验收,日处理能力为 3 万 t,执行的是一级 B 类排放标准。

目前的污水处理系统,在污水处理后,脱水污泥送到填埋场、中水排入长江三峡库区段。脱水污泥直接送到垃圾填埋场处置除影响填埋场的正常运行外(主要是由于含水量较高,80%左右)^[3],还可能对当地的地下水造成潜在的污染^①;处理水虽然达标排放,但由于三峡工程的建成会减缓水速,降低长江三峡库区段水体的自净能力,加上该区域的污水排放量大^[3],长此下去可能会超过其环境容量而影响该段的水质。因此目前的中水和脱水污泥处置方式不但对环境有潜在的二次污染,也是对资源的一种浪费。因此,构建明镜滩污水处理生态系统对于研究污水处理的可持续性有重要的意义。污水处理生态系统由污水处理系统、中水处置系统和脱水污泥处置系统组成,在该复合系统中存在 4 种不同的物质流、能量流、货币流和废物流:(1)物质流,如化学药剂等物质的流动;(2)能量流,如电等能源物质的流动;(3)货币流,主要指由于购买设备、场地和服务等来自于社会经济系统的反馈;(4)污染物流,即脱水污泥、中水等物质的流动。

1.2 资料收集与数据处理方法

(1)通过实地调查和资料收集获得明镜滩污水处理厂和相关生产系统能值分析的原始数据,能值转换率来自于相关文献。

① Albrecht R. Bresters, Isabelle Coulomb, Bela Deak, et al. Sludge Treatment and Disposal-Management Approaches and Experiences, 1997. 22—26, 36. available: <http://www.eea.eu.int>.

(2)分析能值流。污水处理生态系统的能值投入包括自然资源投入的可更新资源能值 R 和不可更新资源能值 N , 人类经济社会反馈投入的不可更新资源能值 F , 能值产出包括产品产出能值 Y , 中水回用的货币能值 I , 排放废物的能值 W_T , 据此绘制成能值流图。根据相应的能值转换率将不同度量单位 J, kg 或 \$ 转换为统一的太阳能值, 编制成能值分析表。

1.3 研究方法——能值分析方法

1.3.1 传统的能值分析方法

能值分析方法是以能量为核心的系统分析方法, 它以能值为量纲, 把任何资源、产品或劳务的价值用其在形成过程中所需直接和间接消耗的太阳能之量来衡量, 单位为太阳能焦耳 (solar emjoules, 缩写为 sej)。能值理论的提出实现了以同一的度量标准来宏观评价自然环境生产与人类经济活动^[12, 13], 从而实现了对所关注系统的结构功能与效益的定量分析^[14]。基本工业系统的分析主要使用以下几个传统的能值指标^[15]: 能值产出率 (emergy yield ratio)、环境负载率 (environmental load ratio)、能值可持续发展指标 (emergy sustainable index)。

(1) 能值产出率 (emergy yield ratio, EYR) 总的能值投入与从社会购入的能值的比值, 其表达式如下:

$$EYR = (N + R + F) / F \quad (1)$$

式中, N 为输入的不可更新资源能值; R 为输入的可更新资源能值; F 为输入的货币能值。

EYR 值越大意味着在一定能值投入的情况下能值产出量越高, 生产效率越高, 相应的经济效益也将越高, 体现出系统具有较高的竞争力。

(2) 环境负载率 (environmental load ratio, ELR) 不可更新资源能值与购买能值之和除以可更新资源能值, 其表达式如下:

$$ELR = (N + F) / R \quad (2)$$

ELR 表示的是过程对环境造成压力的大小, 为了避免过程对环境造成太大的影响从而产生不可逆转的功能退化或丧失, 系统不能长期处于较高的环境负载率状态下。

(3) 能值可持续发展指标 (emergy sustainable index, ESI) 能值产出率除以环境负载率, 其表达式如下:

$$ESI = EYR / ELR \quad (3)$$

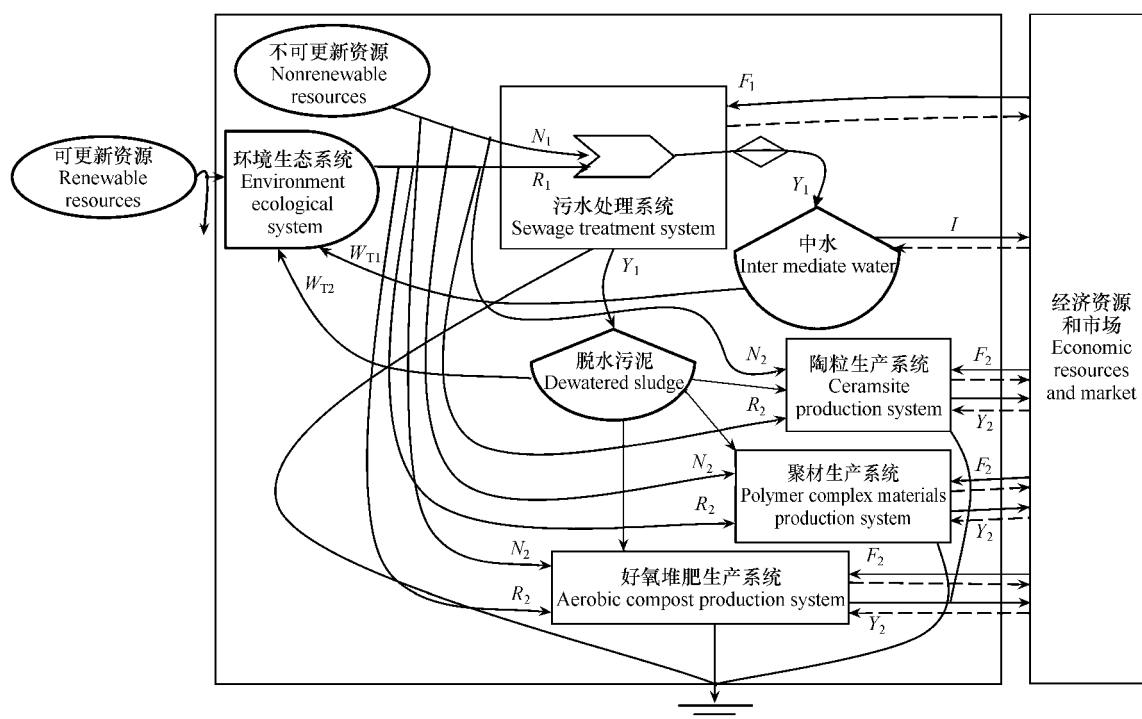
ESI 越高, 意味着在一定条件下系统所产生的效益越高, 显示出更好的可持续发展性。

1.3.2 改进的能值分析方法

传统的能值分析指标由于没有考虑废物处理、处置和回用对经济系统和环境的影响, 因此须对其进行改进, 方可用于污水处理生态系统的可持续性分析。按照污水处理生态系统的组成、特点以及目前中水和脱水污泥的已有处置方法, 绘制出该系统的能值分析系统图 (见图 1)。

从图 1 可知, 污水处理生态系统投入包括可更新资源能值 R_1 , 不可更新资源能值 N_1 , 社会经济系统反馈的能值 F_1 , 输出为中水的能值 W_{T1} 和脱水污泥能值 W_{T2} 。污水处理系统产生的脱水污泥的处置方法主要有 4 种: (1) 送到垃圾填埋厂进行卫生填埋^[16], 其排放废物能值为 W_{T2} , 它将对生态环境产生压力^[5]; (2) 作为陶粒生产原料^[17], 其输入能值分别为 R_2 、 N_2 和 F_2 , 输出为陶粒 Y_2 ; (3) 作为聚合材料生产原料^[18], 其输入能值分别为 R_2 、 N_2 和 F_2 , 输出为聚合材料 Y_2 ; (4) 作为好氧堆肥的原料用于生产有机肥料^[17], 其输入能值分别为 R_2 、 N_2 和 F_2 , 输出为有机肥 Y_2 。中水有二种处置方式: (1) 排入当地水环境, 其能值为 W_{T1} , 将对当地水环境产生潜在的压力; (2) 回用, 产生的货币能值用 I 表示。污水处理厂中水回用有两大途径^[4]: (1) 作为绿化、浇洒道路用水; (2) 回灌以补充缺水河流量。污水处理生态系统的构建和有关参数的引入, 反映了废物处理、处置和回用对整个生态系统和社会经济系统直接和间接的影响。针对污水处理系统的特点, 可建立如下的能值指标体系:

(1) $WEYR$ (emergy yield ratio of sewage treatment ecological systems, $WEYR$) 污水处理生态系统能值产出率, 为系统生产活动中总投入能值与购买能值投入的比率, 当脱水污泥和中水被资源化利用时, 应作为输入被



R_1 可更新资源能值输入,如水电、空气等 Renewable resources emergy input, such as hydroelectricity, air, etc
 N_1 不可更新资源能值输入,如化学药剂等 Nonrenewable resources emergy input, such as chemical reagent, etc
 F_1 购买能值输入,包括投资、运行和维护费 Purchased emergy input, including investment and operating and maintenance costs
 Y_1 能值输出 Emergy output
 W_{T1} 排放的废物能值,如脱水污泥、中水 Discharged wastes' emergy, such as dewatered sludge, intermediate water
 I 中水回用的货币能值 Intermediate water reuse's money emergy

图1 污水处理生态系统能值分析系统图

Fig. 1 Emergy flow system diagram of sewage treatment ecological systems (Sej/a)

考虑。 $WEYR$ 是评价污水处理生态系统经济性的一个指标, $WEYR$ 值越大意味着在一定能值投入的情况下能值产出量越高,生产效率越高,相应的经济效益也将越高,它体现系统所具有的竞争力,可用方程(4)表示:

$$WEYR = \left[\sum_{i=1}^2 (R_i + N_i + F_i) + I \right] / \sum_{i=1}^2 F_i \quad (4)$$

式中, R_i , N_i , F_i 分别代表污水处理生态系统的某一子系统的可更新资源能值输入、不可更新资源能值输入和购买能值输入 (Sej/a); I 为中水回用的货币能值 (Sej/a)。

(2) $WELR$ (environmental load ratio of sewage treatment ecological systems, $WELR$) 污水处理生态系统环境负载率,包括不可更新资源消耗和废物排放对环境的压力。 $WELR$ 表示的是系统对环境造成的总压力大小。可用方程(5)表示:

$$WELR = \left[\sum_{i=1}^2 (N_i + F_i) + \sum_{i=1}^2 W_{Ti} \right] / \sum_{i=1}^2 R_i \quad (5)$$

式中, W_{Ti} 为代表污水处理生态系统的某一子系统的排放废物能值 (Sej/a)。

(3) $WESI$ (emergy sustainable index of sewage treatment ecological systems, $WESI$) 污水处理生态系统可持续发展指标,为能值产出率 $WEYR$ 和环境负载率 $WELR$ 之比,可用方程(6)表示:

$$WESI = WEYR / WELR \quad (6)$$

它体现了污水处理、废物回用与排放的综合效益。 $WESI$ 越高,意味着在一定条件下系统所产生的效益越高,显示出更好的可持续性。

根据图 1,对同一个污水处理系统,根据脱水污泥和中水的最终去向将产生 8 个污水处理生态系统方案,

如表 1 所示。

表 1 明镜滩污水处理生态系统方案

Table 1 Ming-jing-tan sewage treatment ecological systems' projects

方案序号 Project number	方案名称 Project's name
1	脱水污泥填埋 + 中水排放 Dewatered sludge landfilling + intermediate water discharge
2	脱水污泥填埋 + 中水回用 Dewatered sludge landfilling + intermediate water reuse
3	脱水污泥生产陶粒 + 中水排放 Dewatered sludge making ceramsite + intermediate water discharge
4	脱水污泥生产陶粒 + 中水回用 Dewatered sludge making ceramsite + intermediate water reuse
5	脱水污泥生产聚合材料 + 中水排放 Dewatered sludge making polymer complex materials + intermediate water discharge
6	脱水污泥生产聚合材料 + 中水回用 Dewatered sludge making polymer complex materials + intermediate water reuse
7	脱水污泥生产好氧堆肥 + 中水排放 Dewatered sludge making aerobic compost + intermediate water discharge
8	脱水污泥生产好氧堆肥 + 中水回用 Dewatered sludge making aerobic compost + intermediate water reuse

2 结果与分析

2.1 能值分析结果

根据相关数据建立能值分析表,如表 2、表 3、表 4 和表 5 所示。

表 2 明镜滩污水处理系统能值分析表

Table 2 Emery analysis table of Ming-jing-tan sewage treatment system

项目 Item	原始数据 Basic data	能值转换率 Emery transformity ^[10, 19-21] (Sej/unit)	太阳能值 solar emery (Sej/a)
R_1 水电 Hydroelectricity	1.68×10^{12} J/a	1.60×10^5	2.66×10^{17}
空气 Air	5.56×10^{10} g/a	5.16×10^7	2.87×10^{18}
合计 Total up			31.4×10^{17}
N_1 除磷剂 Phosphorus removal reagent	2.85×10^4 kg/a	2.65×10^{12}	7.55×10^{16}
絮凝剂 Flocculating reagent	2.36×10^3 kg/a		6.25×10^{15}
盐酸 Hydrochloric acid	5.51×10^4 kg/a		1.46×10^{17}
氯酸钠 Sodium chlorate	1.37×10^4 kg/a		3.63×10^{16}
合计 Total up			2.61×10^{17}
F_1 投资 investment	3.45×10^5 ¥/a	3.46×10^{12}	1.19×10^{18}
维护费用 Maintenance cost	2.36×10^4 ¥/a	3.46×10^{12}	8.17×10^{16}
劳务 Service	4.48×10^4 ¥/a	3.46×10^{12}	1.55×10^{17}
剩余污泥处理费 Excess sludge treatment cost	1.10×10^6 ¥/a	3.46×10^{12}	38.10×10^{17}
合计 Total up			52.37×10^{17}
Y_1 中水 Intermediate water	3.00×10^{10} g/a	6.64×10^5	0.20×10^{17}
脱水污泥 Dewatered sludge	1.42×10^9 g/a	7.60×10^9	107.92×10^{17}
I 中水回用 Intermediate water reuse	1.37×10^6 ¥/a ^a	3.46×10^{12}	47.40×10^{17}
WT 中水排放 Intermediate water discharge (W_{T1})	3.00×10^{10} g/a	6.64×10^5	0.20×10^{17}
脱水污泥填埋 Dewatered sludge landfilling (W_{T2})	1.42×10^9 g/a	7.60×10^9	107.92×10^{17}

^a 中水回用的价格取 0.125 ¥/t The price of intermediate water reuse is 0.125 ¥/t

表 3 陶粒生产系统能值分析表

Table 3 Emergy analysis table of ceramsite production system

项目 Item	原始数据 Basic data ^①	能值转换率 Emergy transformity (Sej/unit)	太阳能值 Solar emergy (Sej/a)
R_2 水电 Hydroelectricity	$2.15 \times 10^{11} \text{ J/a}$	1.60×10^5	3.44×10^{16}
工业用水 Industrial water	$3.23 \times 10^8 \text{ g/a}$	6.64×10^5	2.14×10^{14}
合计 Total up			0.35×10^{17}
N_2 脱水污泥 Dewatered sludge	$1.42 \times 10^9 \text{ g/a}$	7.60×10^9	107.92×10^{17}
粘土 Clay	$4.84 \times 10^8 \text{ g/a}$	1.00×10^9	4.84×10^{17}
粉煤灰 Fly ash	$1.78 \times 10^8 \text{ g/a}$	8.30×10^8	1.48×10^{17}
复合添加剂 Additive composite	$2.74 \times 10^7 \text{ g/a}$	1.00×10^9	2.74×10^{16}
燃煤 Coal	$1.13 \times 10^8 \text{ g/a}$	1.27×10^9	1.44×10^{17}
合计 Total up			116.00×10^{17}
F_2 投资和运行维护费用 Investment and operating and maintenance cost	$1.74 \times 10^4 \text{ \$/a}$	3.46×10^{12}	0.60×10^{17}
Y_2 陶粒 Ceramsite	$1.614 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{a}$		

表 4 聚合物合成材料生产系统能值分析表

Table 4 Emergy analysis table of polymer complex materials production system

项目 Item	原始数据 Basic data ^[18]	能值转换率 Emergy transformity (Sej/unit)	太阳能值 Solar emergy (Sej/a)
R_2 水电 Hydroelectricity	$1.53 \times 10^{12} \text{ J/a}$	1.60×10^5	2.45×10^{17}
N_2 脱水污泥 Dewatered sludge	$1.42 \times 10^9 \text{ g/a}$	7.60×10^9	107.92×10^{17}
废塑料 Waste plastic	$1.28 \times 10^9 \text{ g/a}$	5.87×10^9 ^[11]	75.14×10^{17}
合计 Total up			183.06×10^{17}
F_2 运行维护费用 Operating and maintenance cost	$3.17 \times 10^5 \text{ \$/a}$	3.46×10^{12}	1.10×10^{18}
投资 Investment ^a	$3.20 \times 10^5 \text{ \$/a}$	3.46×10^{12}	1.11×10^{18}
合计 Total up			22.00×10^{17}
Y_2 聚合物合成材料 Polymer complex materials	$2.13 \times 10^9 \text{ g/a}$		

^a每年的投资等于总的投资除以企业的寿命 10a Investment per year is equal to total investment divided by enterprise lifetime, 10 years

表 5 好氧堆肥生产系统能值分析表

Table 5 Emergy analysis table of aerobic compost production system

项目 Item	原始数据 Basic data ^②	能值转换率 Emergy transformity ^[19, 22, 23] (Sej/unit)	太阳能值 Solar emergy (Sej/a)
R_2 水电 Hydroelectricity	$1.05 \times 10^{12} \text{ J/a}$	1.60×10^5	1.68×10^{17}
空气 Air	$1.12 \times 10^{10} \text{ g/a}$	5.16×10^7	5.78×10^{17}
谷壳 Chaff	$1.46 \times 10^8 \text{ g/a}$	4.50×10^8	6.57×10^{16}
菌种 Bacterium seed	$7.30 \times 10^6 \text{ g/a}$	4.29×10^8	3.13×10^{15}
合计 Total up			8.15×10^{17}
N_2 脱水污泥 Dewatered sludge	$1.42 \times 10^9 \text{ g/a}$	7.60×10^9	107.92×10^{17}
F_2 运行维护费用 Operating and maintenance cost	$5.64 \times 10^4 \text{ \$/a}$	3.46×10^{12}	1.95×10^{17}
投资 Investment	$8.06 \times 10^4 \text{ \$/a}$	3.46×10^{12}	2.79×10^{17}
合计 Total up			4.74×10^{17}
Y_2 堆肥 Compost	$5.16 \times 10^8 \text{ g/a}$		

①黄德志. 利用脱水污泥研制轻质陶粒. 昆明理工大学硕士学位论文. 1999. 43.

②白海梅. 程桥厂污泥好氧发酵生产应用研究. 上海: 同济大学硕士学位论文. 2004. 33, 37, 49 ~ 50, 74.

根据表 2 ~ 表 5 计算出 8 种方案的能值流,如表 6 所示。根据表 6 统计出 8 种方案的各种能值流占总能值流的比值,如表 7 所示。最后用改进的能值分析方法和传统的能值分析方法的指标分别对 8 种方案进行能值分析,其结果如表 8 所示:

表 6 8 种方案的能值流 ($\times 10^{17}$ Sej/a)

Table 6 Eight projects' energy flows

方案序号 Project's serial number	可更新资源能值流 Renewable resources energy flow (R)	不可更新资源能值流 Nonrenewable resources energy flow (N)	购买货币能值流 Purchased energy flow (F)	中水回用能值流 Intermediate water reuse energy flow (I)	排放废物能值流 Discharged wastes energy flow (W_T)
1	31.4	2.61	52.37	0	108.12
2	31.4	2.61	52.37	47.4	107.92
3	31.75	118.61	52.97	0	0.2
4	31.75	118.61	52.97	47.4	0
5	33.85	185.67	74.37	0	0.2
6	33.85	185.67	74.37	47.4	0
7	39.55	110.53	57.11	0	0.2
8	39.55	110.53	57.11	47.4	0

表 7 8 种方案的能值流比值

Table 7 Eight projects' energy flow ratios

方案序号 Project's serial number	(RR) ^a	(NR) ^b	(FR) ^c	(IR) ^d	(WR) ^e
1	0.161	0.013419	0.269254	0	0.555887
2	0.130	0.010799	0.216674	0.196111	0.446504
3	0.156	0.582764	0.260256	0	0.000983
4	0.127	0.473059	0.211263	0.189048	0
5	0.115	0.631337	0.252882	0	0.00068
6	0.099	0.544024	0.217909	0.138885	0
7	0.190	0.532957	0.275375	0	0.000964
8	0.155	0.434149	0.224321	0.186182	0

^a RR : 可更新资源能值流与总能值流的比值, $RR = R/(R + N + F + I + W_T)$; ^b NR : 不可更新资源能值流与总能值流的比值, $NR = N/(R + N + F + I + W_T)$; ^c FR : 购买的能值流与总能值流的比值, $FR = F/(R + N + F + I + W_T)$; ^d IR : 中水回用的货币能值流与总能值流的比值, $IR = I/(R + N + F + I + W_T)$; ^e WR : 排放废物能值流与总能值流的比值, $WR = W_T/(R + N + F + I + W_T)$. Note: ^a RR : renewable resources' energy flow ratio to total energy flow, $RR = R/(R + N + F + I + W_T)$; ^b NR : nonrenewable resources' energy flow ratio to total energy flow, $NR = N/(R + N + F + I + W_T)$; ^c FR : purchased energy flow ratio to total energy flow, $FR = F/(R + N + F + I + W_T)$; ^d IR : intermediate water reuse's money energy flow ratio to total energy flow, $IR = I/(R + N + F + I + W_T)$; ^e WR : discharged wastes' energy flow ratio to total energy flow, $WR = W_T/(R + N + F + I + W_T)$

表 8 8 种方案的能值分析结果

Table 8 Eight projects' energy analysis results

方案序号 Project's serial number	改进的能值分析指标 Improved energy analysis indices				传统的能值分析指标 Traditional energy analysis indices ^[15]			
	$WEYR$	$WELR$	$WESI$	可持续性排序 Sustainability order	EYR	ELR	ESI	可持续性排序 Sustainability order
1	1.65	5.19	0.32	8	2.75	1.75	1.57	1
2	2.55	5.19	0.49	7	2.75	1.75	1.57	1
3	3.84	5.41	0.71	4	6.40	5.40	1.18	3
4	4.73	5.40	0.88	2	6.40	5.40	1.18	3
5	3.95	7.69	0.51	6	8.68	7.68	1.13	4
6	4.59	7.68	0.60	5	8.68	7.68	1.13	4
7	3.63	4.24	0.86	3	5.24	4.24	1.24	2
8	4.46	4.24	1.05	1	5.24	4.24	1.24	2

2.2 结果分析

表 7 的结果表明,在 8 个方案中,可更新资源能值流比值(RR)最大为 0.191,最小为 0.099,相差只有 0.092;不可更新资源能值流比值(NR)最大为 0.631,最小为 0.011,相差 0.62;投入货币能值流比值(FR)最大为 0.275,最小为 0.211,相差 0.064;中水回用能值流比值(IR)最大为 0.196,最小为 0,相差 0.196;排放废物能值流比值(WR)最大为 0.556,最小为 0,相差 0.556。可见,这 5 个指标中,对污水处理生态系统可持续性影响最大的是 NR 和 WR ,其次是 IR ,而 RR 和 FR 的影响最小。其中, NR 和 WR 对污水处理生态系统的可持续性有负效应,而 IR 对污水处理生态系统可持续性有正效应。

由表 8 可见,传统的能值分析方法指标得出的结果与改进的能值分析方法得出的结果基本相反,且方案 1 与 2,3 与 4,5 与 6,7 与 8 的可持续性无区别,显然这是不符合实际情况的。而改进的能值分析方法,由于考虑了废物处理、处置和回用的影响,因此其指标计算的结果能反映污水处理生态系统的实际情况。按照改进的能值分析方法指标得出的结果,在提出的 8 个方案中,方案 1 的可持续性最低,方案 8 的可持续性最高。由表 7 可知,方案 1 的 NR 为 0.013, WR 为 0.556, IR 为 0;方案 8 的这 3 个指标则分别为 0.434, 0 和 0.186。方案 1 虽然投入的不可更新资源能值流比值较低,但由于未开展脱水污泥综合利用和中水回用,使得其排放废物能值流比值达到最大,且无中水回用能值,最终使得前者对污水处理生态系统可持续性的正效应被后两者的负效应大大超过,导致系统的可持续性大大降低。方案 8 由于进行了脱水污泥资源化利用和中水回用,最终排放废物能值流比值下降为 0,且增加了中水回用的能值流比值,二者对污水处理生态系统可持续性的正效应大大超过了由于不可更新资源能值流比值增加带来的负效应,最终使系统的可持续性大大提高。其他 6 个方案的可持续性位于这两个方案之间,它们之间的可持续性差异出现的原因在于废物利用的程度不同,以及不同废物利用方式对不可更新资源的消耗不同。

3 结论和讨论

3.1 结论

(1)改进的能值分析方法和指标体系用于评价污水处理生态系统,能较好地反映该系统的实际情况。

(2)对污水处理生态系统可持续性影响最大的因素是不可更新资源能值流比值和废物排放能值流比值,其次是中水回用能值流比值。

(3)废物利用有利于提高污水处理生态系统的可持续性,但不同废物利用方式对污水处理生态系统可持续性的影响不一样。

3.2 讨论

文中仅对同一污水处理系统与不同的污泥和中水处置方式组成的污水处理生态系统方案进行了分析,旨在对提出的污水处理生态系统能值分析方法和指标体系进行验证。事实上污水处理系统本身对污水处理生态系统的可持续性也有影响。对于不同的污水处理系统与不同的污泥和中水处置方式组成的污水处理生态系统方案可利用文中所提出的方法作进一步的分析。

References:

- [1] Yu J, Tian N N, Wang K J, *et al.* Analysis and discussion of sludge disposal and treatment of sewage treatment plants in China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(1), 82—86.
- [2] Jiao Y J, Wang L A. Brief talk on sludge treatment of sewage treatment plant in Sanxia Reservoir Area. *Environmental Sciences Guide*, 2007, 26(2), 54—56, 66.
- [3] He Q, Zhou J, Huang M. Existing Situation on Disposal of Sludge from Sewage Treatment Plant in Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(3), 1—3, 21.
- [4] Jin J W, Liu X, Ye T. Case Study on Environmental Impact Assessment for Municipal Sewage Treatment Plant. *China Water & Sewage*, 2007, 23(6), 99—101.
- [5] Li G Q. The Evaluation of Sludge Disposal Schemes in Civil Sewage Treatment Plant. *Shanxi Chemical Industry*, 2004, 24(4): 42—44.
- [6] Odum H T. Jiang Y X translated. *System ecology*. Beijing: Science Press, 1993. 1—21.

- [7] Li J P, Chen F P, Wang Z S. The emergy synthesis and sustainability analysis of city's environment and econom. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (2): 439—448.
- [8] Fu X, Wu G, L Y. Analytical theories of exergy and emergy for ecological research. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (11): 2621—2626.
- [9] degaard H. An evaluation of coast efficiency and sustainability of different sewage treatment processes. *Vatten*, 1995, 51: 291—299.
- [10] Erik Grönlund, Anders Klang, Stefan Falk, *et al.* Sustainability of sewage treatment with microalgae in cold climate, evaluated with emergy and socio-ecological principles. *Ecological Engineering*, 2004, 22: 155—174.
- [11] Siracusa G, La Rosa A D. Design of a constructed wetland for sewage treatment. *Ecological Modeling*, 2006, 197: 490—497.
- [12] Bhavik R, Bakshi. A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering. *Comput. Chem. Eng.*, 2002, 26 (2): 269—282.
- [13] Yan M C, Odum H T. Eco-economic evolution, emergy evaluation and policy options for the sustainable development of Tibet. *The Journal of Chinese Geography*, 2000, 10 (1): 1—27.
- [14] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environment loading and sustainability: an emery analysis of Italy. *Ecological Modeling*, 1994, 73: 215—268.
- [15] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economics and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 1997, (9): 51—69.
- [16] Zhou S Q. Municipal sludge treatment, disposal and resource utilization. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002. 64—65.
- [17] Yin J, Tan X J. Sewage sludge treatment, disposal and resource utilization. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 207—234, 245—246.
- [18] Zhang Z S, Ma P S, Li B. Study on Polymer Synthetic Wood Produced with Dehydrated Sludge. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4 (10): 52—56.
- [19] Lan S F, Qin P, Lu H F. Emergy Synthesis of Ecological Economic Systems. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 12—23, 87.
- [20] Wang L M, Li W D, Li Z. Emergy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP Plant EIP). *Resour. Conserv. Recycl.*, 2006, 48: 56—70.
- [21] Sui C H, Lu H F, Zheng F Y. Integrative study of Guangdong ecological-economic system based on emergy analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2147—2152.
- [22] Yan M C, Li H T, Cheng H, *et al.* Emergy analysis and assessment of main products of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery in China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23 (6): 66—99.
- [23] Li S C, Fu X F, Zheng D. Emergy analysis for evaluating sustainability of Chinese economy. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (4): 297—304.

参考文献:

- [1] 余杰, 田宁宁, 王凯军, 等. 中国城市污水处理厂污泥处理、处置问题探讨分析. *环境工程学报*, 2007, 1(1): 82~86.
- [2] 焦艳静, 王里奥. 三峡库区污水厂污泥处理处置浅析. *环境科学导刊*, 2007, 26(2): 54~56.
- [3] 何强, 邹建, 黄明. 三峡库区污水处理厂污泥处置现状研究. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(3): 1~3, 21.
- [4] 靳俊伟, 刘项, 叶涛. 城市污水处理厂环境影响评价案例分析. *中国给水排水*, 2007, 23 (6), 99~101.
- [5] 李国强. 城市污水处理厂的污泥处置方案评价. *山西化工*, 2004, 24(4): 42~44.
- [6] 奥德姆 H. T., 蒋有绪译. 系统生态学. 北京: 科学出版社, 1993. 1~21.
- [7] 李金平, 陈飞鹏, 王志石. 城市环境经济能值综合和可持续性分析. *生态学报*, 2006, 26 (2): 439~448.
- [8] 付晓, 吴钢, 刘阳. 生态学研究中的焓分析与能值分析理论. *生态学报*, 2004, 24(11): 2621~2626.
- [16] 周少奇. 城市污泥处理处置与资源化. 广州: 华南理工大学出版社, 2002. 64~65.
- [17] 尹军, 谭学军. 污水污泥处理处置与资源化利用. 北京: 化学工业出版社, 2005. 207~234, 245~246.
- [18] 张召述, 马培舜, 李斌. 脱水污泥制备聚合物合成“木材”的研究. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(10): 52~56.
- [19] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002. 12~23, 408.
- [21] 隋春花, 陆宏芳, 郑凤英. 基于能值分析的广东省生态经济系统综合研究. *应用生态学报*, 2006, 17 (11): 2147~2152.
- [22] 严茂超, 李海涛, 程鸿, 等. 中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估. *北京林业大学学报*, 2001, 23 (6): 66~69.
- [23] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析. *自然资源学报*, 2001, 16 (4): 297~304.