

基于PSR模型的湖北湿地生态系统健康评价研究

张永利^{1,2}, 罗佳², 王留林^{1,2}, 刘汉生^{1,2}, 王盈晓^{1,2}, 吴宜进^{1,2}

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 在充分了解湖北省现有湿地资源状况的基础上, 结合湿地生态系统健康的概念和内涵, 运用PSR(压力-状态-响应)模型和生态系统健康指数计算相结合的方法对湖北湿地生态系统健康状况进行评价, 结果表明: (1) 湖北湿地生态系统健康评价综合分值(Y)为2.9867, 位于湿地生态系统健康状况评价标准[2, 3]之间, 处于脆弱状态; (2) 评价指标体系中的压力指标和状态指标综合分值(Y)分别为1.3123和1.0462, 属于脆弱状态和亚健康状态; (3) 人类活动强度、化肥、农药利用强度、湿地递减率、水质状况、植被覆盖、河流补给状况以及管理水平等指标是影响湖北湿地生态系统健康的主要因素。

关键词: 湿地生态系统健康; PSR模型; 湖北省; 健康指数

中图分类号: X24; X826

文献标志码: A

Study of the Ecosystem Health Evaluation of the Wetlands in Hubei Province Based on the PSR Model

Zhang Yongli^{1,2}, Luo Jia², Wang Liulin^{1,2}, Liu Hansheng^{1,2}, Wang Yingxiao^{1,2}, Wu Yijin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2. School of Urban and Environmental Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, based on the full understanding of the existing wetland resources in Hubei Province, by combination of the concept and connotation of wetland ecosystem health, PSR (pressure-state-response) model was integrated into the ecosystem health index calculation for evaluation of the ecosystem health level of the wetlands in Hubei Province. The results showed that the comprehensive score (Y) of the wetland ecosystem health evaluation was 2.9867 between level 2 and level 3 of the wetland ecosystem health evaluation standard, indicating that it was in a fragile state. The comprehensive score (Y) of the pressure index and state index of the evaluation indicator system was 1.3123 and 1.0462 in a fragile state and sub-health state respectively. The study results also showed that the indicators such as intensity of human activities, utilization intensity of chemical fertilizer and pesticide, wetland decline rate, water quality, vegetation coverage, river supply conditions and management levels were the main factors influencing the wetland ecosystem health in Hubei Province.

Keywords: Wetland Ecosystem Health; PSR Model; Hubei Province; Health Index

CLC number: X24; X826

湿地是地球上一种独特的、具有环境调节功能和生态净化作用的生态系统, 它在全球生态平衡中有着极其重要的地位。近年来随着工业化、城镇化的推进, 不合理的人类活动对湿地生态系统造成了严重威胁: 环境污染、湿地围垦、

生物和水资源的过度利用、水利工程、城市建设以及旅游业的盲目开发等不合理利用现象, 导致湿地生态系统退化, 湿地功能降低甚至丧失, 流域内湿地生态系统破坏, 严重威胁湿地生态系统健康。为了寻求流域生态系统和社会经济发展的

收稿日期: 2015-02-28

基金项目: 国家科技支撑计划课题基金(2012BAH33B00)资助

作者简介: 张永利(1989-), 男, 硕士研究生。研究方向: 自然资源开发与利用。E-mail: zhangyonglihs@163.com

通信作者: 吴宜进, 男, 教授、博士生导师。研究方向: 区域资源开发与利用。E-mail: wuyijin@mail.cnu.edu.cn

平衡点,近年来,流域生态系统健康评价逐渐成为一个研究热点^[1]。PSR(Pressure-State-Response),即压力、状态、响应,最初由加拿大统计学家Tony Friend和David Rapport(1979)提出,用于分析环境压力、状态与响应之间的关系,后由经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)于上世纪八九十年代共同发展起来的,用于研究环境问题的框架体系^[2]。PSR模型使用“原因-效应-响应”这一思维逻辑,分压力、状态和响应3类指标,用于人地关系研究时能够更好地体现出人类与环境之间的相互作用关系,目前已广泛运用于土地资源利用评价^[3-4]、水环境安全评价^[5-6]、城市规划环境影响评价^[7]、湿地生态系统健康评价^[8-9]等领域。PSR模型与其它的研究方法比较而言,有着独特的优点:它能够对指标进行系统性分类;能够灵敏的反应人类与生态环境之间的关系,具有响应性,有助于人们分析问题和采取正确的措施;同时把评价对象的PSR指标与参照标准相比较,更容易得出一个客观的结果。因此该项研究采用PSR为理论框架进行湿地生态系统健康评价,并采用层次分析法赋权与健康指数计算相结合的方法测定了湖北省湿地生态系统健康指数,对研究区内湿地资源的保护、可持续开发、维护湿地生态平衡、促进湖北省生态文明建设等具有重要的现实意义。

1 研究区概况与数据来源

湖北省位于长江中游,北纬 $29^{\circ} 05' \sim 33^{\circ} 20'$,东经 $108^{\circ} 21' \sim 116^{\circ} 07'$,为亚热带季风性湿润气候区,东、西、北三面环山,中部为江汉平原。省内河流密布,湖泊较多,地貌类型多样,湿地资源十分丰富,素有“千湖之省、鱼米之乡”的美称。湖北省现有湿地资源 $161.69 \times 10^4 \text{hm}^2$,重点湿地20余处,包括洪湖、网湖、龙感湖珍稀水禽湿地、三峡水库人工湿地、梁子湖群等。

由于研究区范围较广,加上湿地生态系统健康研究指标多样性和复杂性,所以数据来源较为广泛。主要参考了2013年的《湖北省统计年鉴》、《湖北省国民经济和社会发展统计公报》、《第六次人口普查统计》、《湖北省环境保护厅环境状况公告》、国家、行业和地方通用分类标准等权威性数据。

2 评价方法

2.1 评价指标体系的构建

为了客观准确反映湖北省湿地生态系统健康状况,在选择评价指标时必须遵循科学性、操作简单、典型性、易获得性、整体性、定量和定性相结合等原则。关于湿地生态系统健康指标选取,国内诸多学者分别从不同角度进行了探讨。崔保山等^[10]从湿地生态特征、功能整合性、社会政治环境三大类指标进行分析;彭益书等^[11]结合湿地生态系统组成、结构和功能特征的分析,将生态特征、自然功能及社会环境指标综合起来,确定了3个功能子系统指标和30个影响湿地生态系统健康的因子;吕保贵^[12]结合VOR模型和PSR模型以及相应的时间和空间尺度,从湿地压力、活力、恢复力、组织力、服务功能和人类健康等6个方面,在生物物理范畴、社会经济范畴、人类健康范畴内选择相互影响的15个指标。综合来看,指标的选择必须考虑到组织和功能的相互联系,除了具有典型性和代表性之外,在结合研究区实际状况的基础上,还要特别注意指标之间的联动性,使之符合PSR模型各指标层之间的相互响应关系。依据上述分析,充分考虑了湖北省特殊的区域背景、自然地理状况,以及省区生态功能定位,结合层次分析确定指标的思想,运用PSR模型的基本原理,在指标选取应遵循的原则指导下,从影响湿地健康的压力指标、状态指标、响应指标中选出18项具有典型性的指标,建立了湖北省湿地生态系统健康评价指标体系,见表1。

表1 湖北省湿地生态系统健康评价指标体系及权重

评价指标	湿地压力指标 C_1 0.5714	湿地状态指标 C_2 0.2857	湿地响应指标 C_3 0.1429	指标权重
人口自然增长率 C_{11}	0.146 7			0.0839
人类活动强度 C_{12}	0.240 8			0.1376
湿地周边人口文化素质 C_{13}	0.102 9			0.0588
化肥利用强度 C_{14}	0.049 0			0.0280
农药利用强度 C_{15}	0.091 6			0.0524
湿地递减百分比 C_{16}	0.120 4			0.0688
湿地受威胁强度 C_{17}	0.248 6			0.1420
水质指数 C_{21}		0.071 6		0.0204
物种多样性 C_{22}		0.310 2		0.0886
植被覆盖率 C_{23}		0.073 9		0.0211
湿地原生性 C_{24}		0.221 2		0.0632
土壤性状 C_{25}		0.141 8		0.0405
河流补给状况 C_{26}		0.039 5		0.0113
物质生产能力 C_{27}		0.141 8		0.0405
湿地环保投资比重 C_{31}			0.272 7	0.0390
污水处理率 C_{32}			0.111 3	0.0159
湿地保护程度 C_{33}			0.492 8	0.0704
湿地管理水平 C_{34}			0.123 2	0.0176

注： C_{11} ：(出生人数减死亡人数)与人口总数之比； C_{12} ：用人口密度表示衡量； C_{13} ：以高中以上文化程度占总人口的比例算； C_{14} ：以每公顷施用化肥量衡量； C_{15} ：以每公顷施用农药量衡量； C_{16} ：减少的湿地面积占原有湿地总面积的比例； C_{17} ：以人类对湿地的各种干扰来衡量，主要采用定性的方法； C_{21} ：主要河流和湖泊水质的类别衡量； C_{22} ：以评价区内物种种类占整个生物地理区物种种数的比例衡量； C_{23} ：森林面积占土地总面积之比衡量； C_{24} ：以天然湿地占湿地总面积的比例衡量； C_{25} ：采用土壤有机质含量来衡量； C_{26} ：以河流湿地面积所占全省湿地面积的比重衡量； C_{27} ：湿地资源水产品捕获量衡量； C_{31} ：湿地保护投资占总投资百分比； C_{32} ：处理污水量占污水排放总量比重； C_{33} ：以被保护自然湿地面积占湿地总面积的百分比衡量； C_{34} ：以湿地管理人员素质和管理体系完善情况来衡量。

2.2 权重的计算

PSR模型确定的指标共分为三个层次，由于各指标对于其准则层的相对重要程度不同，所以在PSR模型划分层次原理的基础上，采用层次分析法和德尔菲法(Delphi)相结合的方法计算评价指标体系权重。层次分析法是由美国学者T L Saaty^[13]提出的一种定性与定量相结合的分析方法，它将与决策相关的元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。德尔菲法广泛应用于各种评价指标体系的建立和具体指标的确定过程，这种方法具有广泛的代表性^[14]。依据指标权重计算的基本步骤，通过计算各层次元素指标权重，可以设计出湖北省湿地生态系统健康评价指标体系及权重，可见表1。

2.3 湿地生态系统健康标准确定

2.3.1 评价等级划分类比标准

各指标在不同层次上反映了湿地生态系统健康状况，所以选取的评价指标的评价标准要优先采取研究湿地领域内公认的参考标准为依据，同时还要结合研究区特点采用类比标准来分级，主要的类比标准有6类：
①国家通用分类标准，如水污染，土壤污染等；
②临界标准，如某些指标所处的影响生物生长、生存的临界值；
③科学效应分析，如化肥利用强度等；
④生态环境类指标，如土地利用率，湿地退化率等，以建设目标值作为理想状态值；
⑤理想标准，相类似发达地区的水平作为理想值，如经济发展水平、管理水平、湿地保护意识等；
⑥背景和本底标准，当地的地理条件和区域发展水平相关的指数等。

2.3.2 评价标准的确定 在参考类比标准, 以及湖北省生态功能保护规划的前提下, 并与国家湿地公园评估标准等国家、地方、行业通用分类标准参考值相结合, 根据研究区域的实际情况, 在

国内外众多研究湿地评价标准和湿地生态系统健康分级方法^[15-20]的指导下, 设计出湖北省湿地生态系统健康状况评价标准, 见表2。

表2 湖北省湿地生态系统健康状况评价标准

等级	疾病	一般病态	脆弱	亚健康	健康
压力指标分值	[0, 0.571 4]	[0.571 4, 1.142 8]	[1.142 8, 1.714 2]	[1.714 2, 2.285 6]	[2.285 6, 2.857 0]
状态指标分值	[0, 0.285 7]	[0.285 7, 0.571 4]	[0.571 4, 0.857 1]	[0.857 1, 1.142 8]	[1.142 8, 1.428 5]
响应指标分值	[0, 0.142 9]	[0.142 9, 0.285 8]	[0.285 8, 0.428 7]	[0.428 7, 0.571 6]	[0.571 6, 0.714 5]
综合指标分值	[0, 1]	[1, 2]	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]

注: 压力指标、状态指标、响应指标可以根据各指标权重(见表1)和综合分值相乘得出。

2.4 计算方法

根据各项指标的得分, 再结合指标权重, 运用湿地生态系统健康指数 Y 公式计算健康指数分值。其公式如下^[21]:

$$Y = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i \quad (1)$$

式中: Y 为湿地生态系统健康指数; X_i 为第 i 个指标的得分; W_i 为第 i 个指标权重。从 Y 值来看, Y 分值越高, 湿地生态系统健康程度就越好, 反之健康程度就越差。

3 湖北省湿地生态系统状况及评价结果分析

在PSR模型确立指标体系的基础上, 把湖北省湿地生态健康各指标实际状况与评价指标标准确定的标准分级进行类比, 得出对应的指标分值, 然后通过生态系统健康指数的计算公式(1), 计算各项分值。结果见表3。

表3 湖北省湿地生态系统健康评价结果

指标	指标状况	数据来源	权重	参考标准	得分	各项分值	综合指数
C_{11}	5.18‰	统计公报	0.083 9	国际公认	5	0.419 5	
C_{12}	307 人/km ²	人口普查	0.137 6	国家标准	1	0.137 6	
C_{13}	16.6%	人口普查	0.058 8	国家标准	5	0.294 0	
C_{14}	350.77/kg·hm ⁻²	统计年鉴	0.028 0	国际公认	2	0.056 0	1.3123
C_{15}	14/kg·hm ⁻²	统计年鉴	0.052 4	国际公认	1	0.052 4	
C_{16}	72.3%	文献资料	0.068 8	行业标准	1	0.068 8	
C_{17}	威胁严重	文献资料	0.142 0	行业标准	2	0.284 0	
C_{21}	Ⅱ类	环境质量月报	0.020 4	国家标准	4	0.081 6	
C_{22}	10.76%	文献资料	0.088 6	行业标准	2	0.177 2	
C_{23}	38.4%	政府公报	0.021 1	国家标准	4	0.084 4	1.0462
C_{24}	78.97%	文献资料	0.063 2	行业标准	4	0.252 8	
C_{25}	40.509/g·kg ⁻¹	文献资料	0.040 5	国家标准	5	0.202 5	
C_{26}	33.4%	文献资料	0.011 3	行业标准	4	0.045 2	
C_{27}	17.39%	统计年鉴	0.040 5	国家标准	5	0.202 5	
C_{31}	0.047%	政府公报	0.039 0	国家标准	5	0.195 0	0.6282
C_{32}	74%	政府公报	0.015 9	国家标准	4	0.063 6	
C_{33}	58.65%	统计公报	0.070 4	国家标准	5	0.352 0	
C_{34}	缺乏科学管理	文献资料	0.017 6	行业标准	1	0.017 6	
综合			1		/	2.986 7	2.9867

注: 国际公认标准主要参考联合国粮农组织统计数据数据库FAOSTAT(Agri-Environmental Indicators); 行业标准参考中华人民共和国林业行业标准《国家湿地公园评估标准LY/T 1754-2008》; 国家标准主要参考《GB 3838-2002地表水环境质量标准》、《GB 15618-1995土壤环境质量标准》、国家林业局《中国湿地保护行动计划》、国家林业局《湿地保护管理规定》等。

3.1 综合指数评价

评价结果显示,湖北湿地生态系统健康评价综合分值(Y)为2.9867,位于湿地生态系统健康状况评价标准[2, 3]之间,属于脆弱状态(见表3)。结合各指标的分值来看,压力指标得分1.3123,处于脆弱状态;状态指标得分1.0462,属于亚健康状态;响应指标得分0.6282,属于健康状态。综合来看,压力指标和状态指标分别处于脆弱状态和亚健康状态,这是影响湖北湿地生态系统健康的主要因素,而响应指标处于健康状态,说明湖北省对湿地保护的重视程度加强,除了管理体系目前不够健全外,环保和污水处理方面在湿地生态系统健康中影响较小。从指标的自

然因素和人为因素划分来看,人为因素是其影响的主要因素,比如,人口的迅速增加、环境的污染、人为不合理的开垦、化肥和农药利用、过度引水灌溉、人为造成的水土流失淤积河湖等。然而,湖北省在湿地保护方面的管理决策得到重视,对湿地保护投资的加大,注重治污和加强湿地自然保护区建设等有利措施使得响应指标表现出健康状态。

3.2 压力指数评价

从压力指标来看,人类活动强度 C_{12} 、化肥利用强度 C_{14} 、农药利用强度 C_{15} 和湿地递减率 C_{16} 四个指标得分较低,在压力指标体系中仅占到4%~11%,见图1。

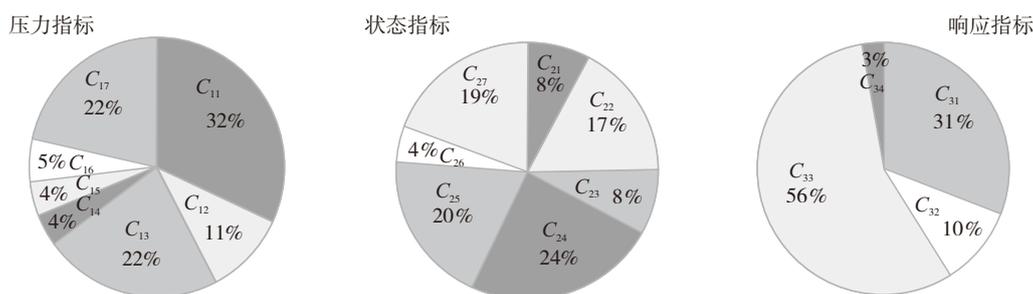


图1 压力、状态、响应指标分值占各指标分值比例

说明人类活动和化肥、农药利用强度是压力指标中影响湿地生态系统健康的主要因素,湿地递减率反映的是湿地面积减少的状况,湿地面积减少也是影响其健康状况的重要因素,湖北省湿地递减的原因除了全球气候变暖加剧湿地水分的蒸发等自然因素外,还有围湖造田、过度引水灌溉、人为造成的水土流失淤积河湖等人为因素。据不完全统计,湖北省湖泊水面已由20世纪60年代初的8 300 km²减少到2 300 km²以下,全省0.5 km²以上湖泊由1962年的1 066个减少到现在的309个^[22];而每年化肥、农药的利用强度不断加大,据2013年湖北省统计年鉴,湖北省化肥施用量从1990年的148.61万t增长到2012年的357.66万t,增加值为209.05万t,化肥、农药使用强度不断加大,诱发湖泊河流富营养化,对湿地生态系统健康造成威胁。此外,由于湖北省经济社会发展步伐加快,大量外来人口的涌入使得湖北省人均资源量降低,这就势必会

造成对资源的开发强度加大,影响生态环境健康。就湖北省湿地而言,人类活动对湿地的干扰现象主要表现在过度垦殖、割草、渔猎等,滥捕现象也十分严重,影响湿地的生态平衡,如白暨豚、中华鲟等已成为濒危物种;湿地水禽由于过度猎捕、捡拾鸟蛋等导致种群数量大幅度下降,环境污染也比较严重^[23]。其他指标而言,人口自然增长率 C_{11} 、湿地周边人口文化素质 C_{13} 处于健康状态,对湿地生态系统表现出的脆弱状态影响较小,反映出湖北省在人口总量控制和人口素质提高方面积极响应,给湿地保护带来了积极影响。

3.3 状态指数评价

从状态指标来看,整体处于亚健康状态,其中水质指数 C_{21} 、植被覆盖率 C_{23} 、河流补给状况 C_{26} 分值相对较低,占总体状态指标的4%~8%(见图1),这些现象是影响湿地生态系统健康的关键因素,应该在湿地保护中加以重视。湖

北省水资源虽然丰富,但其工农业建设过程中不合理的水资源利用和水污染,造成水质指数下降,2012年湖北省三大产业结构为12.8:50.3:36.9,这种以第二产业为主的结构,对水资源造成庞大的压力,据数据显示,在湖北省湖泊监测10个测点中Ⅱ类湖泊水质占到60%,其余均为Ⅲ类水质,整体水质以Ⅱ类湖泊水质为主^[24]。此外,湖北省城市结构发展不平衡,位于山区丘陵地带的贫困地区人均收入远远低于城市人均收入,贫困地区为了摆脱贫困现状不断加大自然资源的开采力度,造成森林、植被破坏,过度开采水资源,人地矛盾突出等现象,使得湿地周边森林覆盖率降低,河流水资源减少,影响湿地水资源的含蓄量,危害湿地生态系统健康。而物种多样性 C_{22} 、湿地原生性 C_{24} 、土壤性状 C_{25} 和物质生产能力 C_{27} 等指标在状态指标体系中分值相对较高,不是湿地生态系统出现脆弱状况的直接影响因素,对湖北省湿地生态系统健康状况影响较小,此种状态要加以保持。

3.4 响应指数评价

从响应指标来看,总体处于健康状态。湿地环保投资比重 C_{31} 和湿地保护程度 C_{33} 分值较高,占总体响应指标的31%~56% (见图1),表明湖北省在湿地保护方面足够重视,已经加大了对湿地保护投资力度,但是湿地管理水平 C_{34} 较低,处于疾病状态。湖北省湿地保护管理工作起步较晚,湿地开发的管理较为混乱,没有建立湿地资源利用的评价体系,在湿地开发组织管理方面,依然缺乏科学的湿地管理模式,虽然目前全省自然保护区达到64个,但现有的保护区远不能有效地保护湖北省湿地资源,政府部门要做好湿地管理部门人员的培养工作,建立合理的监管体系,确保湖北省湿地管理的健康运行。

4 结论与建议

4.1 结论

以PSR模型为理论框架进行生态系统健康评价,并采用层次分析法赋权与健康指数计算相结合测定了湖北省湿地生态系统健康指数。PSR模

型确定指标体系和层次分析法赋权,可以更加具体的结合研究区的实际情况,对指标进行系统性分类,筛选出影响较大的指标;合理地反应人类与生态环境之间的关系,有助于分析问题和采取正确的措施;此外,把湿地生态系统评价对象的PSR指标与参照标准相比较,更容易得出一个客观的结果,从而使得评价结果更能反映研究区实际情况,为研究区社会的经济发展与生态环境保护提供科学的决策依据。

4.2 建议

依据PSR模型确定的指标来看,湖北省湿地生态系统脆弱状态主要来自于人为因素对其造成的威胁,因此要重视人为因素的影响,提高人们的环保意识和合理利用资源意识。从各指标层面上来看,改善湖北省生态系统健康压力状态,需要加强对湿地的保护力度,减少化肥和农药的使用量,降低湿地递减率,控制人口数量,提高人口素质;状态层面上,保护水资源,加大污水处理力度,封山育林,提高植被覆盖,加强贫困地区的扶贫力度,缩小贫富差距;响应层面上,政府应加快经济发展,调整产业布局,提高环保投资比重,同时提高湿地管理部门人员素质,建立合理的监管体系,确保湖北省湿地保护向着良性发展。

参考文献

- [1]陈美球,刘桃菊,许莉,等.基于PSR框架模型的流域生态系统健康评价研究现状及展望[J].江西农业大学学报:社会科学版,2011,10(3):83-89.
- [2]Rappott D J, Singh A. An ecohealth based framework for state of environment reporting[J]. Ecological Indicators, 2006, 6(2):409-428.
- [3]杨蕾蕾,刘新平.基于PSR模型的城市土地集约利用评价——以乌鲁木齐市为例[J].新疆农业科学,2010,47(8):1681-1686.
- [4]冯科,吴次芳,刘勇.浙江省城市土地集约利用的空间差异研究——以PSR与主成分分析的视角[J].中国软科学,2007(2):103-108.
- [5]彭晶倩,李琳,曹雯,等.城市湖泊水环境安全评价研究[J].环境保护科学,2010,36(5):62-64.
- [6]游文荪,丁惠君,许新发.鄱阳湖水生态安全现状评价与趋势研究[J].长江流域资源与环境,2009,18(12):1173-1180.
- [7]石晓枫,兰芬.PSR模式在城市规划环境影响评价中的应用[J].环境科学与技术,2006,32(6C):442-445.
- [8]苏顺谦.基于3S技术的野鸭湖湿地生态环境质量评价[D].南昌:东华理工大学,2013.
- [9]景彩娥.基于RS和GIS黑河流域生态系统健康评价研究[D].西安:陕西师范大学,2013.

(下转第128页)

少污泥干化时间。

(2) 在污水源热泵工艺中加入相变蓄热装置,能够降低能源费用达46%之多,大幅降低太阳能、热泵干化污泥运行费用。

(3) 采用相变蓄热装置的太阳能、热泵工艺,能够继续降低污泥干化热能成本,具有较好的市场推广价值。

参考文献

- [1]王晓利,曾正中,王厚成,等.污泥处理处置及资源化方法探讨[J].环境工程,2014(3):150-154.
- [2]尹军,谭学军.污水污泥处理处置与资源化利用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [3]王兴润,金宜英,聂永丰.国内外污泥热干化工艺的应用进展及技术要点[J].中国给水排水,2007,8(23):5-8.
- [4]姜立安,孙卫东.利用电厂烟气余热干化污泥的工程案例介绍[C].//全国排水委员会.全国排水委员会2012年年会论文集.2012.
- [5]宋国华,张振涛.温室太阳能污泥干化系统的设计及试验研究[J].中国农业大学学报,2013(5):141-145.

- [6]樊杰,陈威,周传辉.污水源热泵用于城市污水处理厂污泥干化分析[J].能源与节能,2013(2):62-64.
- [7]段万军.城市污水换热器的方案对比与设计[J].节能技术,2012,30(173):228-232.
- [8]王明根.利用太阳能和高温热泵的城市污泥热干化系统技术研究[J].干燥技术与设备,2007,5(6):311-314.
- [9]饶宾期,曹黎.太阳能热泵污泥干燥技术[J].农业工程学报,2012,28(5):184-188.
- [10]张振涛.污泥太阳能干化技术研究进展[J].科技导报,2010,28(22):39-42.
- [11]Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2):318-345.
- [12]Bokhoven T P, Van Dam J, Kratz P. Recent experience with large solar thermal systems in The Netherlands[J]. Solar Energy, 2001, 71(5):347-352.
- [13]吴志根,顾国维,何晶晶,等.一种新式节能型污泥干燥系统[P]:2011.
- [14]Zalba B, Marín J M, Cabeza L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3):251-283.
- [15]Sari A, Karaipekli A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(8-9):1271-1277.

(上接第94页)

- [10]崔保山,杨志峰.湿地生态系统健康评价指标体系 I 理论[J].生态学报,2002,22(7):1005-1011.
- [11]彭益书,付培,杨瑞东,等.草海湿地生态系统健康评价[J].地球与环境,2014,42(1):68-81.
- [12]吕保贵.南昌城市湿地生态系统健康评价[D].南昌:南昌大学,2013.
- [13]T L Saaty. Modeling unstructured decision problems—the theory of analytical hierarchies[J]. Math Comput Simulation, 1978, 20(3):147-158.
- [14]刘伟涛,顾鸿,李春洪.基于德尔菲法的专家评估方法[J].计算机工程,2011(37):189-204.
- [15]崔保山,杨志峰.湿地生态系统健康的时空尺度特征[J].应用生态学报,2003,14(1):121-125.
- [16]马炳娜.湖泊湿地生态系统健康评价——以武汉市为例[D].武汉:华中师范大学,2012.
- [17]王慧亮,王学雷,莫明浩,等.基于生态健康的洪湖湿地恢复评价[J].武汉大学学报(理学版),2010,56(5):557-563.

- [18]任晶,孙瑛,陈秀芝,等.基于PSR模型的九段江湿地生态系统健康评价[J].湿地科学与管理,2012,8(4):12-16.
- [19]周林飞,许士国,孙万光.基于压力-状态-响应模型的扎龙湿地健康水循环评价研究[J].水科学进展,2008,19(2):205-213.
- [20]张祖陆,梁春玲,管延波.南四湖湖泊湿地生态健康评价[J].中国人口资源与环境,2008,18(1):180-184.
- [21]陈丽欣.河北滨海湿地生态安全评价与保护研究[D].石家庄:河北师范大学,2010.
- [22]刘彬,汪茜.湖北省环境质量和生态环境现状及防治对策[J].环境科学与技术,2002,25(6):37-40.
- [23]王述华,史玉虎,石道良.湖北省湿地资源保护与研究进展[J].湖北林业科技,2007(148):37-41.
- [24]湖北省环境保护厅.湖北省环境质量月报(2012年12月)[EB/OL].
http://report.hbepb.gov.cn:8080/pub/root8/tjgz/hjjezc/201301/t20130108_58460.html,2013-01-08/2014-12-08.