

南水北调中线水源区十堰市复合生态系统能值分析

华 坚^{1,2}, 余文燕¹, 李晶晶¹

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对南水北调中线水源区十堰市日益突出的生态环境问题, 构建十堰市复合生态系统。运用能值分析方法绘制系统能值图, 建立十堰市复合生态系统能值指标体系, 测算并研究 2003—2016 年十堰市复合生态系统能值指标变化规律。结果表明: 十堰市复合生态系统能值输出增加, 但自给能力下降, 对外部资源依赖程度加深; 能值产出对经济贡献增大, 但工程通水后对外利益交流减少, 居民生活水平及单位面积能值利用效率提升, 环境治理压力增大, 同时废弃物排放得到有效控制; 复合生态系统逐渐转变为高消费型, 可持续发展能力降低; 与水源区其他城市相比, 十堰市复合生态系统能值自给、环境承载及可持续发展能力较强, 但经济发展及居民生活水平较低。

关键词: 南水北调; 能值; 复合生态系统; 十堰市

中图分类号: F062.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-9511(2019)06-0034-07

南水北调中线工程兴建能够有效缓解我国北方地区水资源的不足, 为京津冀一体化提供水资源保障^[1-2]。中线水源区作为国家重点生态功能区, 是南水北调核心功能区, 为确保一泓清水永续北送, 其生态文明建设尤为必要和紧迫。目前水源区城市普遍存在经济发展落后、居民生态环境保护意识淡薄、水质污染、水土流失严重、森林覆盖率降低等问题^[3-4]。湖北省十堰市是南水北调中线“坝区库首”之地, 在整个南水北调工程中地位突出^[5], 其生态环境问题直接关乎丹江口水库能否承担南水北调中线工程的重要功能。习近平总书记在中国共产党第十九次全国代表大会上提出, 要加强对重要生态功能区的保护和管理, 加大对生态系统的保护力度^[6]。2018年4月, 习近平总书记强调长江经济带建设坚持“共抓大保护、不搞大开发”, 要探索以“生态优先, 绿色发展”为导向的高质量发展新路子。如何统筹经济社会发展与生态环境保护的关系既是十堰市当前面临的主要难题, 也是十堰市探索实现高质量发展的必由之路。

复合生态系统是由社会、经济、生态 3 个子系统耦合协同形成的有机整体, 发展问题的实质是复合生态系统功能代谢、结构耦合及控制行为失调^[7-8]等问题。当前相关研究大多集中在耦合机理分析、

可持续发展能力及生态承载力评价^[9-13]等, 研究对象主要为行政区域、流域湖泊、城市群等经济区域^[14-16], 而针对社会经济发展落后、环境承载压力较大的重点生态功能区的研究较少。

常见的复合生态系统研究方法, 如熵值法、熵权 TOPSIS 分析法^[14-16]等, 存在着生态系统分析中部分指标难以量化比较、自然资源评价不足等问题。能值分析方法能够弥补上述方法的不足, 通过对系统内外的能量流、物质流及货币流进行定量分析^[14], 解决指标难以量化统一的问题, 并将自然资源作为能值投入, 使得生态效益的测算结果更为客观, 已被应用于可持续发展评价、生态外溢价值补偿以及区域复合生态系统分析^[16-18]等领域。

本文结合南水北调中线工程的特点, 构建十堰市复合生态系统, 采用能值分析方法研究十堰市复合生态系统发展状态, 有助于了解系统内部物质、货币及能量的流动情况, 分析系统资源利用情况和自身环境承载能力, 进而为促进十堰市复合生态系统协调发展提供建议。

1 研究区概况

1.1 十堰市概况

十堰市属于北亚热带大陆性季风气候, 年平均

日照时数在 1 655 ~ 1 958 h 之间,光热充沛,年平均降水量为 800 mm 左右,水资源丰富。所辖区县(茅箭区、张湾区、经济技术开发区、郟阳区、郟西县、竹山县、竹溪县、房县、丹江口市)均为核心水源区。2017 年十堰市水土流失面积多达 117.05 万 hm^2 , 占其总面积的 50.26%, 特别是受南水北调中线工程库区影响的丹江口市、郟县、郟西县等地,石漠化面积高达 28.87 万 hm^2 。十堰市作为全国、全省集中连片深度贫困地区,2017 年国内生产总值为 1 632.3 亿元,地方财政收入仅 169.53 亿元,环保资金投入压力巨大。

1.2 十堰市复合生态系统

本文构建南水北调中线水源区十堰市复合生态系统,见图 1。十堰市复合生态系统是指以人为主体,在十堰市范围内,由经济子系统、社会子系统和生态子系统相互联系、耦合互动形成的复合开放系统。

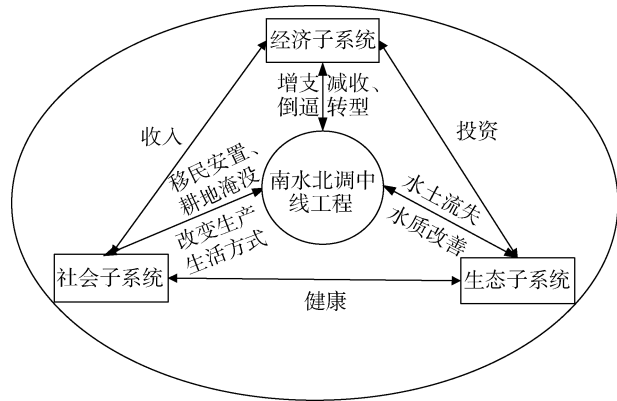


图 1 南水北调中线水源区十堰市复合生态系统

各子系统之间相互关系具体表现为:①经济子系统与社会子系统以收入为纽带。十堰市经济增长能够提高居民收入水平,而社会公平、收入差距缩小有利于经济可持续发展。②经济子系统与生态子系统通过投资构成有机整体。十堰市筹措专项资金及国家转移支付补助用于生态环境保护和水污染防治,而生态红线压力也促使十堰市传统产业不断向绿色化、高端化转变。③社会子系统与生态子系统以健康为核心。十堰市社会稳定发展,提升居民对于生存环境的关注程度,使其积极采取措施改善生态环境。良好的生态环境有益于人体健康,从而促进社会可持续发展。

南水北调中线工程作为跨流域调水工程,与十堰市复合生态系统中的各个子系统之间存在着各种能量流、物质流、货币流的交换,产生如下多方面影响。

a. 南水北调中线工程规划建设使得十堰市“增支减收”,同时带来外部资金流入倒逼转型。具体

表现为:①为保持水源区的水质要求,生态环保资金投入大幅增加;②受“停建令”影响(《严格控制丹江口库区淹没线以下区域人口增长和基本建设的通知》[国办发 200312 号]),当地经济发展长期滞后;③关闭转产库区 506 家工业企业,造成税收收入减少以及工作岗位流失;④丹江口水库转为以蓄水为主,水电站发电量减少直接影响财政收入;⑤外部资金流入倒逼十堰市转变经济发展方式,促进产业结构转型升级,丹江口水库建设与维护也为旅游业的发展提供支持。

b. 南水北调中线工程带来的移民安置、淹没耕地等问题一方面影响十堰市的社会稳定,另一方面也促使十堰市居民生产生活方式的转变。具体表现为:①工程涉及移民数量多,安置任务重,丹江口大坝二期工程移民十堰市后靠安置人数 10.5 万人,占库区后靠安置总人数的 84%;②淹没土地面积广,库区建设使十堰市减少耕地 19 万 hm^2 ;③调水工程对水质要求高,为避免农业面源污染要求农民减少化肥、农药的使用。

c. 南水北调中线工程一方面使得十堰市水土流失问题突出,环境治理压力增大,另一方面客观推动十堰市水质持续改善。具体表现为:①丹江口大坝由 162 m 加高至 176.6 m,蓄水量增多,使得十堰市库区泥沙淤积、水土流失等问题更为严重;②受“两退”(退耕还林,退种消落地)及关闭转产周边工厂的影响,沿江农业及工业废水排放减少,保障了丹江口库区水质持续稳定在 II 类标准。

2 研究方法

2.1 十堰市复合生态系统能值图

十堰市复合生态系统内部主要成分包括生产者(农林牧渔业、工业、商业)、消费者(城市、居民)以及储存库(丹江口水库、废弃物)等,通过能量、物质以及货币流动建立联系。依据奥德姆创立的能量系统语言图例规则^[12],绘制出十堰市复合生态系统能值图(图 2)。

十堰市复合生态系统的输入能值包括两部分:①直接来源于自然界,包括太阳能、风能等可更新环境能源,以及表层土损耗能等不可更新环境资源;②源于南水北调中线工程建设的反馈投入,包括财政支出、固定资产投资。系统的输出能值包括有效能输出(如商品服务、经济、信息以及劳务输出)与无效能输出(主要是指废弃物)。

南水北调中线工程是影响十堰市复合生态系统能值变化发展的主要作用流,通过以下能值流产生影响:①能量流,是指能量在系统中转变、转移与消

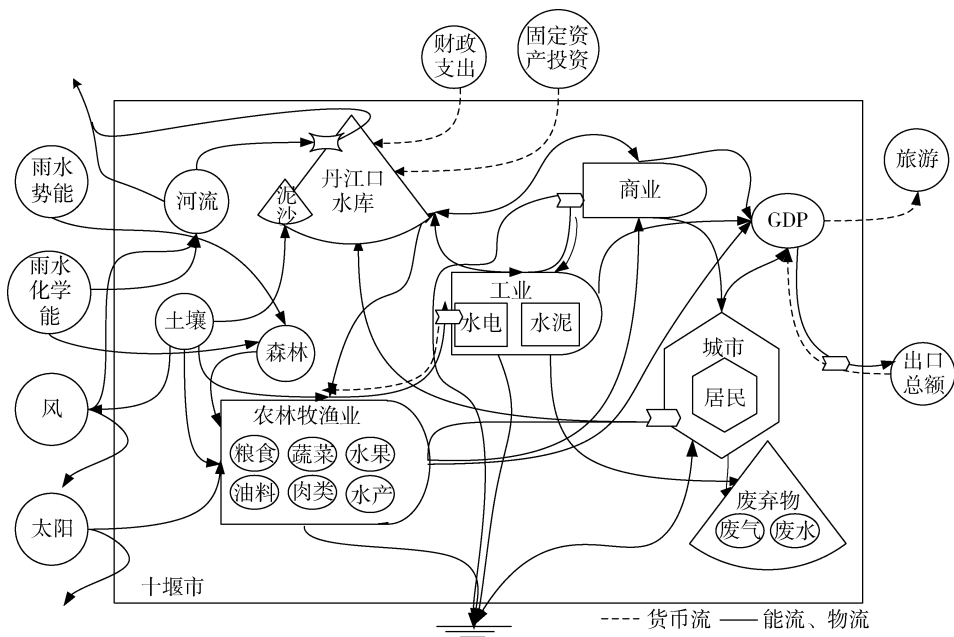


图2 十堰市复合生态系统能值图

耗的过程。如太阳能可通过植物光合作用转化为化学能,并通过食物链传递至消费者。工程建设淹没大量耕地,将对最终传递至消费者的能量产生影响。②货币流,是指随着物质交换形成的货币流动。工程兴建带来的外部投资,部分转化为消费资金,直接推动十堰市经济增长。又因为存在投资乘数效应,进一步推动了十堰市经济及社会的发展。③物质流,是指物质在系统内外生产、流通、消费及耗散的变动过程。调水工程建设减少了丹江口水电站的发电量,降低了系统生产者水电的使用量,进而影响产出。

2.2 十堰市复合生态系统能值指标

本文在总结蓝盛芳等^[18]能值指标选取的基础上,构建包含基础系统能值指标、各子系统能值指标、综合能值指标的十堰市复合生态系统能值指标体系,见表1,以全面反映南水北调中线水源区十堰市复合生态系统内外部能值及各子系统间的相互作用关系。

3 结果与分析

数据来源于2003—2016年《十堰市统计年鉴》

表1 十堰市复合生态系统能值指标体系

类型	具体指标	公式	含义	
基础系统能值指标	可更新资源能值 R	可更新资源能值流量 × 能值转换率	系统可更新资源能值投入	
	不可更新资源能值 N	不可更新资源能值流量 × 能值转换率	系统不可更新能值投入	
	投入产出指标	输入能值 Q_{IMP}	可更新环境资源 + 可更新有机能 + 不可更新环境资源 + 有偿不可更新资源 + 货币输入能值	外界输入资源、商品能值
	输出能值 P_{EY}	输出产品能值 + 输出废弃物能值 + 输出货币能值	输出资源、商品能值	
能值来源指标	总能值 U	$U = R + N + Q_{IMP}$	系统总的能值投入	
	能值自给率	$(R + N)/U$	系统自身维持运行的能力和开发利用程度	
	购入能值比例	Q_{IMP}/U	对外界资源的依赖程度	
	可更新资源能值比率	R/U	十堰市自然环境潜力	
各子系统能值指标	输入能值与自有能值比	$Q_{IMP}/(R + N)$	十堰市竞争力	
	能值货币比	U/Q_{GDP} (GDP 产值)	经济财富价值、体现货币购买力	
	能值投资率 λ_{EIR}	$(Q_{IMP} + N)/R$	经济发展水平对自然环境依赖程度	
	净能值产出率 λ_{EYR}	P_{EY}/Q_{IMP}	能值产出对经济贡献大小	
社会子系统指标	能值交换率 λ_{EER}	Q_{IMP}/P_{EY}	可持续发展能值系统对外交流利益	
	人均能值量	U/P (人口数量)	居民生活水平和生活质量	
	能值密度	U/A (国土面积)	单位面积能值利用能力	
生态子系统指标	环境负载率 ρ_{ELR}	$(U - R)/R$	十堰市环境负荷的大小	
	废弃物与可更新能值比 ρ_{FER}	W (废弃物的能值) / R	废弃物排放对自然资源压力情况	
综合能值指标	可持续发展指标 D_{ESI}	$D_{ESI} = \lambda_{EYR}/\rho_{ELR}$	十堰市可持续发展状况	
	可持续发展性能 D_{ESID}	$D_{ESID} = \lambda_{EYR}\lambda_{EER}/\rho_{ELR}$	考虑能值交换率的可持续发展状况	

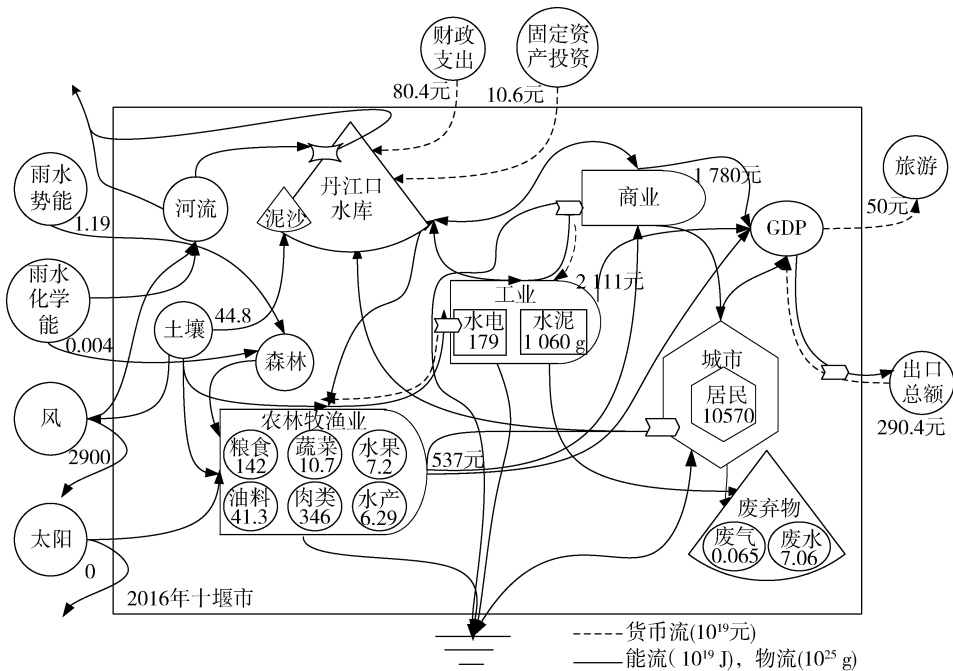


图3 2016年十堰市复合生态系统能量迁移

《十堰市水利统计年鉴》《十堰市水资源公报》和《十堰市统计公报》。能值折算系数及能值转换率主要参考 Odum^[15] 和蓝盛芳等^[18] 的成果,计算得到太阳能值的单位为太阳能焦尔(solar emjoules, sej)。根据十堰市可持续发展特点,剔除不相关的工业、商业等影响因素后组成变量边界,计算十堰市投入产出能值及能值评价指标,并绘制能量迁移图,见图3。

3.1 十堰市复合生态系统能值指标纵向分析

3.1.1 基础系统能值指标

a. 投入产出指标分析,见图4。2003—2016年十堰市输出能值大幅提升,输入能值以及总能值增长幅度较缓,可再生资源能值与不可再生资源能值变化不大。南水北调中线工程建设给十堰市带来外来资源,使得固定资产投入和财政投入增加。受此影响,十堰市招商引资能力增强,外部投资倒逼十堰市产业转型升级,从而增加产出效率。由于资源能值主要受光照和降水的影响,而十堰市年日照时长和降水量无明显变化,所以可更新和不可再生资源能值整体变动幅度较小。

b. 能值来源指标分析,见图5。2003—2016年十堰市能值自给率及可更新资源能值比率均呈下降趋势,购入能值比例以及输入能值与自有能值比有所上升。原因在于南水北调中线工程建设使十堰市自有能值消耗大幅上升,自然环境潜力降低,能值自给能力下降。能值自给率与可更新能值比率重合程度高,两者区别在于能值自给率包含不可更新资源能值,从侧面反映了十堰市能值消耗中以可更新资源能值为主。十堰市购入能值比例上升,当地发展

也愈加依赖外界资源,导致整体环境竞争压力加大。

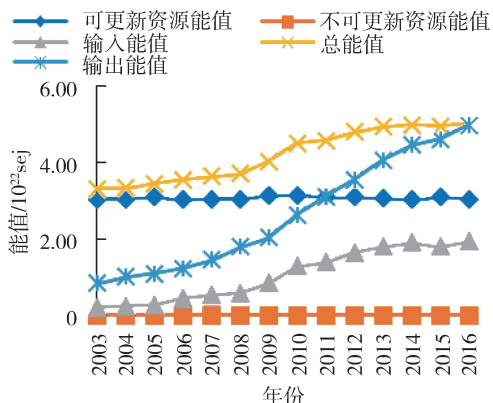


图4 2003—2016年十堰市能值投入产出指标

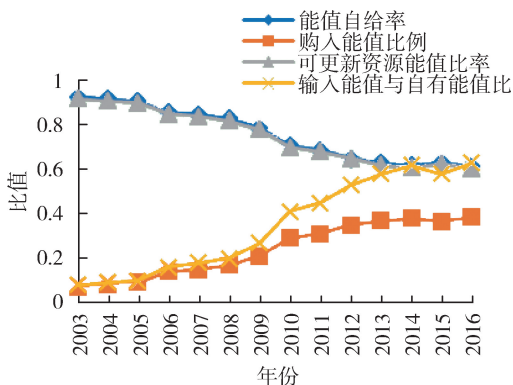
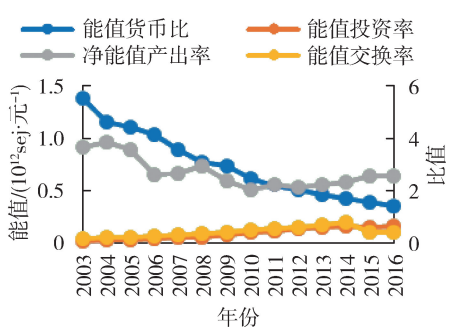


图5 2003—2016年十堰市能值来源指标

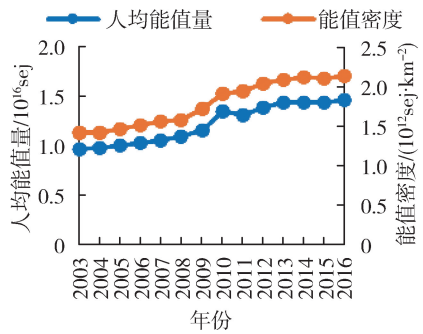
3.1.2 各子系统能值指标

a. 经济子系统能值指标分析,见图6(a)。2003—2016年十堰市复合生态系统能值货币比大幅下降,而能值投资率逐渐上升,净能值产出率波动

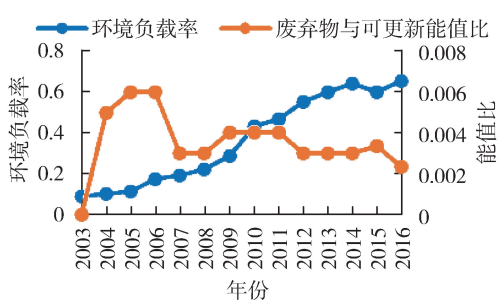
下降后有所回升,能值交换率在2014年后经历明显下降。能值货币比变动表明十堰市从输入低质能值向高质能值转化。能值投资率上升则说明十堰市经济发展水平逐渐提高。净能值产出率变动反映出十堰市能值输出对经济的贡献程度先降后升。2005年丹江口水库大坝加高工程动工,十堰市土壤流失、植被破坏等问题日益突出,使得能值输出对经济贡献程度有所减少。在2014年南水北调中线工程正式通水之后,能值输出对经济贡献程度显著上升。受工程完工影响,能值交换率明显下降,反映出十堰市对外利益交流大幅减少。



(a) 经济子系统



(b) 社会子系统



(c) 生态子系统

图6 2003—2016年十堰市各子系统能值指标

b. 社会子系统能值指标分析, 见图6(b)。2003—2016年十堰市人均能值量以及能值密度均显著提升。较高的人均能值量是保障传统社会学意义上高质量生活水平的前提,由此表明十堰市居民生活水平和生活质量的提升。十堰市地域辽阔、资源丰富,为当地人民生活水平改善提供了物质保障。

能值密度反映了能值集约度和强度^[18-19],能值密度增长体现出十堰市单位面积能值利用强度提高。但十堰市贫困人口众多,脱贫攻坚任务艰巨,仍需进一步释放人口红利,推动社会发展。

c. 生态子系统能值指标分析, 见图6(c)。2003—2016年十堰市环境负载率呈不断上升的趋势,废弃物与可更新能值比在早期经历大幅波动后逐渐趋于平缓。由于南水北调中线工程建设初期废气、废水等污染物逐年增加,植被破坏、森林资源减少等问题突出,加上调水工程对水质的严格要求,导致十堰市环境承载压力不断增加。而随着政府部门逐渐重视环境污染问题,日渐重视十堰市的生态恢复和治理工作。如国务院批复《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十二五”规划》,为减少废弃物排放提供了政策保障,使得废弃物与可更新能值的比值趋于平缓并有所下降。

3.1.3 综合能值指标

2003—2016年,十堰市能值可持续指标以及能值可持续发展指标均呈现下降趋势,尤其是2004—2006年经历大幅下降。能值可持续指标显示:2003—2008年,能值可持续指标大于10,说明十堰市经济不发达,对资源开发和利用力度不足。2009—2016年,能值可持续指标在1~10之间,表明十堰市复合生态系统具有发展活力和潜力,但能值可持续发展能力逐渐降低。2005年十堰市范围内南水北调中线工程动工建设,使得十堰市复合生态系统的能值可持续指标逐年降低,并逐步向高消费驱动型系统转变。而复合生态系统可持续发展指标逐年下降,是在考虑到外部能值交换的基础上,输入能值在总能值中占比不断增大造成的,见图7。

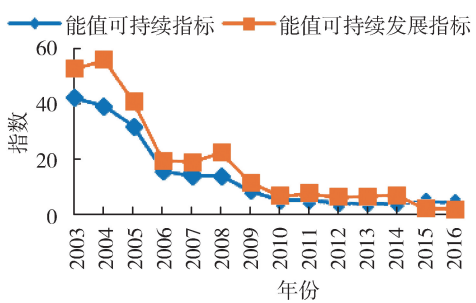


图7 2003—2016年十堰市综合能值指标

3.2 十堰市复合生态系统能值指标横向分析

2014年是南水北调中线工程建成并正式通水运营的一年,横向分析十堰市复合生态系统能值指标,有利于掌握区域整体发展情况,为今后水源区保护提供依据。选择测算2014年南水北调中线水源区城市的复合生态系统指标,并与十堰市进行比较分析,结果如表2所示。

表2 2014年水源区城市复合生态系统能值指标

地区	可更新环境资源能值	不可更新环境资源能值	输入能值	总能值	输出能值	能值自给率	购入能值比例	可更新资源能值比率	输入能值与自有能值比	能值/货币比率
十堰	3.07×10^{22}	4.14×10^{20}	1.93×10^{22}	5.04×10^{22}	4.50×10^{22}	0.62	0.38	0.61	0.62	4.20×10^{11}
汉中	3.60×10^{22}	8.03×10^{19}	2.46×10^{22}	6.07×10^{22}	3.98×10^{22}	0.59	0.41	0.59	0.68	6.12×10^{11}
安康	3.16×10^{22}	6.89×10^{19}	2.26×10^{22}	5.42×10^{22}	3.14×10^{22}	0.58	0.42	0.58	0.71	7.02×10^{11}
商洛	2.70×10^{22}	5.85×10^{19}	1.91×10^{22}	4.62×10^{22}	2.25×10^{22}	0.59	0.41	0.58	0.71	8.02×10^{11}
南阳	3.81×10^{22}	7.84×10^{19}	5.46×10^{22}	9.27×10^{22}	1.14×10^{23}	0.41	0.59	0.41	1.43	3.47×10^{11}
三门峡	1.61×10^{22}	3.04×10^{19}	1.90×10^{22}	3.51×10^{22}	4.37×10^{22}	0.46	0.54	0.46	1.18	2.83×10^{11}
洛阳	2.87×10^{22}	4.49×10^{19}	3.19×10^{22}	6.06×10^{22}	1.16×10^{23}	0.47	0.53	0.47	1.11	1.85×10^{11}

地区	能值投资率	净能值产出率	能值交换率	人均能值量	能值密度	环境负载率	废弃物与可更新能值比	能值可持续指标	能值可持续发展指标
十堰	0.62	2.33	0.77	1.45×10^{16}	2.13×10^{12}	0.64	0.000	3.64	6.54
汉中	0.68	1.62	0.53	1.58×10^{16}	2.23×10^{12}	0.69	0.006	2.36	1.25
安康	0.71	1.39	0.46	2.05×10^{16}	2.32×10^{12}	0.72	0.003	1.94	0.90
商洛	0.71	1.18	0.41	1.84×10^{16}	2.33×10^{12}	0.71	0.004	1.66	0.67
南阳	1.43	2.09	0.94	7.88×10^{15}	3.49×10^{12}	1.44	0.004	1.45	1.36
三门峡	1.18	2.30	1.15	1.54×10^{16}	3.41×10^{12}	1.18	0.003	1.94	2.23
洛阳	1.11	3.64	1.76	8.71×10^{15}	3.98×10^{12}	1.11	0.003	3.28	5.78

根据基础系统能值指标,十堰市复合生态系统输入能值较少而输出能值较多,其余指标与其他城市差距不大,投入产出指标整体处于中等水平。与其他城市相比,十堰市复合生态系统能值自给率及可更新资源比率较高,表明其自给自足能力较强,但外部能值交流偏少。

基于各子系统能值指标:①十堰市复合生态系统的能值货币比、能值投资率及能值交换率处于偏低水平,而净能值产出率水平较高,反映出十堰市经济发展程度较低,对环境依赖度及生产效率高,具有较强的竞争力;②十堰市复合生态系统的人均能值量及能值密度最低,表明十堰市居民生活水平较低,与洛阳、南阳差距较大,反映出水源区城市存在社会发展不平衡的问题;③十堰市复合生态系统的环境负载率、废弃物与可更新能值比均较低,是因为十堰市自然资源丰富,环境承载力较强,且调水工程大力推进沿江污染企业“关停并转”,促使废弃物排放得到控制。

依据综合能值指标,南水北调中线工程水源区7个市的能值可持续发展指标都在1~10之间,说明南水北调中线工程建设对水源区资源的开发利用比较充分,水源区富有活力和发展潜力。其中十堰市复合生态系统能值可持续指标和可持续发展指标在7个市中最高,表明十堰市可持续发展能力较强。

4 结论与建议

本文基于南水北调中线工程水源区十堰市复合生态系统,绘制生态系统能值图,分析系统特征和内部能值流动情况,测算2003—2016年十堰市复合生态系统能值指标,结果表明:

a. 十堰市复合生态系统输入、输出能值增加,能值自给率与可更新资源能值比率下降,购入与输入能值比例上升。上述指标变动反映出系统自给能力下降,能值消耗以可更新资源能值为主,并对外部资源依赖程度增强。

b. 能值货币比不断降低,随着工程完工通水,能值产出率回升而能值交换率大幅下降,人均能值量、能值密度与环境负载率逐渐提高,废弃物与可更新能值比先升后降。①十堰市经济发展表现为逐渐向高质能值输入转变,复合生态系统能值产出对于经济贡献增加,但对外能值交流大幅减少。②十堰市社会发展表现为居民生活水平和单位面积能值利用效率不断提高。③十堰市生态发展表现为环境治理压力增加,但因国家出台相应的政策规划,废弃物排放量有所下降。

c. 十堰市复合生态系统可持续发展综合指标大幅下降后趋缓,体现出系统在工程建设早期受影响幅度较大,并逐步向高消费型系统转变,且可持续发展能力呈现下降趋势。

d. 与水源区其他城市相比,十堰市复合生态系

统中输出能值、能值自给率、可更新资源比率、净能值产出率及能值可持续发展指标偏高,但系统输入能值、能值货币比、能值投资率、能值交换率、人均能值量、能值密度、环境负载率、废弃物与可更新能值比均偏低。说明十堰市具有较高的能值产出效率,较强的能值自给与可持续发展能力,而对外能值交流较少,经济发展程度及居民生活水平较低。

为避免十堰市及其他水源区复合生态系统出现生态恶化趋势,从经济、社会、生态3个层面提出以下建议。

a. 推进绿色发展,建立健全绿色低碳循环发展的经济体系。十堰市高质能值输入大幅增加,应根据主体功能区布局,发展壮大资源消耗少、环境污染小的绿色环境保护产业,尤其是战略性新兴产业、高新技术产业和现代服务业。加快产业绿色化、合理化和高级化进程。同时加大清洁技术推广力度,构建清洁低碳、安全高效的能源体系,针对矿物、油、气、煤等不可更新资源提高资源利用率,大力推广减废活动,提高废弃物资源化程度。此外,重视科技能值的引进、消化和创新。十堰市地形环境复杂,农业剩余劳动力较多,工业辅助能值输入偏低,既制约人力能值效用发挥,也导致环境开发低效率。应增加人才、先进技术和管理经验等科技辅助能值输入,以市场为导向,优化系统能值输入结构及产出效率。

b. 改变居民生产生活方式,建立多元主体共同参与的环境保护体系。十堰市政府应致力于有效解决人口就业和社会保障问题,并出台相应的人口迁移政策,适当鼓励制造业劳务输出。建立资源节约型的社会生产和消费体系,实现人口与社会经济、资源、环境的协调发展。此外,十堰市应树立市民的环境保护意识,积极倡导简约适度、绿色低碳的生活方式,开展创建节约型机关、绿色家庭、绿色学校、绿色社区等专项行动,构建以政府为主导、企业为主体、社会组织和公众共同参与的环境保护体系。

c. 着力解决突出环境问题,坚持全民共治、源头防治。十堰市应牢固树立“绿水青山就是金山银山”的强烈意识,把生态环境保护放在压倒性位置。在解决水污染突出问题后,应加快实施大气污染防治行动和土壤污染管控和修复,提高污染排放标准,健全环境保护信用评价、信息强制性披露等制度。除此之外,十堰市应充分考虑净能值产出率、环境负载率、能值投资率等指标,重点分析工程的经济技术合理性和十堰市生态环境可承受性的关系,使南水北调中线工程总体布局与十堰市生态环境建设布局相协调。

参考文献:

- [1] 南水北调东、中线一期工程累计调水200亿 m^3 [J]. 水利经济,2018,36(5):20.
- [2] 张丽丽,殷峻暹.南水北调中线工程受水区生态补水目标及优先级研究[J]. 水资源保护,2010,26(4):4-7.
- [3] 王蕾,关建玲,丁强,等.南水北调中线陕西水源区污染源变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(10):80-85.
- [4] 刘远书,高文文,侯坤,等.南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(3):440-446.
- [5] 何报寅,曾群.南水北调中线工程十堰市核心水源区可持续发展指数及发展战略研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2015,49(2):261-266.
- [6] 习近平.决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利[N]. 人民日报,2017-10-28(001).
- [7] 马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统[J]. 生态学报,1984,27(1):1-9.
- [8] 王如松.论复合生态系统与生态示范区[J]. 科技导报,2000(6):6-9.
- [9] 王广成,李鹏飞.煤炭矿区复合生态系统及其耦合机理研究[J]. 生态经济,2014,30(2):139-142.
- [10] 王少平,候继雄,程声通.中国省域可持续发展压力的量化与评价[J]. 中国人口·资源与环境,2003(5):10-15.
- [11] 徐国宾,任旺,郭书英,等.基于熵理论的湖泊生态系统健康发展评估[J]. 中国环境科学,2017,37(2):795-800.
- [12] 陈星,许钦,何新玥,等.城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究[J]. 水资源保护,2016,32(2):77-81.
- [13] 牛明香,王俊.黄河河口区生态系统健康评价指标体系探讨[J]. 水资源保护,2016,32(1):57-63.
- [14] 黄寰,肖义,王洪锦.成渝城市群社会-经济-自然复合生态系统生态位评价[J]. 软科学,2018,32(7):113-117.
- [15] ODUM H T. Self-organization, transformity, and information[J]. Science,1988,242:1132-1139.
- [16] 胡伟,韩增林,葛岳静,等.基于能值的中国海洋生态经济系统发展效率[J]. 经济地理,2018,38(8):162-171.
- [17] 伏润民,缪小林.中国生态功能区财政转移支付制度体系重构:基于拓展的能值模型衡量的生态外溢价值[J]. 经济研究,2015,50(3):47-61.
- [18] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳.生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002:90-94.
- [19] 樊皓,葛慧,雷少平,等.模糊数学方法在生态系统服务价值评估中的应用[J]. 水资源保护,2011,27(2):34-36.

(收稿日期:2018-12-09 编辑:胡新宇)