

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第3期 Vol.34 No.3 **2014**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 3 期

2014 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 灾后生态恢复评价研究进展 刘孝富,王文杰,李京,等 (527)
- 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析 庞明月,张力小,王长波 (537)

个体与基础生态

- 北部湾北部海域夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力 马璐,曹文清,张文静,等 (546)
- 鲢鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力 樊晓丽,林植华,丁先龙,等 (555)
- 环境温度对白头鹇代谢产热和蒸发失水的影响 林琳,曹梦婷,胡益林,等 (564)
- 灌溉对沙拐枣幼苗生长及氮素利用的影响 黄彩变,曾凡江,雷加强,等 (572)
- PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响 朱凡,洪湘琦,闫文德,等 (581)
- 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价 魏兴萍,蒲俊兵,赵纯勇 (589)
- 排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等 (597)

种群、群落和生态系统

- 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性 高福元,赵成章,卓马兰草 (605)
- 捕食者对空心莲子草叶甲种群的生物胁迫 刘雨芳,李菲,桂芳艳,等 (613)
- 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征 马威,孙军 (621)
- 磨盘山天然次生林凋落物数量及动态 范春楠,郭忠玲,郑金萍,等 (633)
- 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响 刘方春,邢尚军,马海林,等 (642)
- 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例 张雷,王琳琳,张旭东,等 (650)
- 基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究 侯鹏,申文明,王桥,等 (660)
- 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子 黄辉,孟平,张劲松,等 (667)
- 新疆天山高寒草原不同放牧管理下的 CO_2 , CH_4 和 N_2O 通量特征 贺桂香,李凯辉,宋韦,等 (674)

景观、区域和全球生态

- 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析 马明德,马学娟,谢应忠,等 (682)
- 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率 董林林,杨浩,于东升,等 (690)
- 自养微生物同化 CO_2 的分子生态研究及同化碳在土壤中的转化 吴小红,简燕,陈晓娟,等 (701)

资源与产业生态

- 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析 孙玉峰,郭全营 (710)

基于 AD-AS 模型的海岸带生态系统综合承载力评估——以舟山海岸带为例 苏盼盼,叶属峰,过仲阳,等 (718)

城乡与社会生态

基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 李春林,刘 淼,胡远满,等 (727)

研究简报

陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异 梁 婷,同延安,林 文,等 (738)

不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响 刘小勇,李红旭,李建明,等 (746)

长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性..... 王振海,殷秀琴,蒋云峰 (755)

最大可允许填海面积模拟——厦门西海域案例研究 林琛琛,饶欢欢,刘 岩,等 (766)

学术信息与动态

2013 年水文土壤学与自然资源可持续利用国际学术研讨会述评 张 骁,赵文武 (774)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 252 * zh * P * ￥90.00 * 1510 * 29 * 2014-02



封面图说: 云南松树冠——云南松为松科松属裸子植物,多生长在海拔 1000—3500m 的高山,喜光、耐干旱、耐瘠薄,适应酸性的红壤、黄壤,在其他树种不能生长的贫瘠石砾地或冲刷严重的荒山坡分布,易于天然更新。主要分布于四川西南部、云南、西藏东南部、贵州西部、广西西部,常形成大面积纯林,尤以云南分布最广,故有云南松之称。云南松树高可达 30m,胸径达 1m,树皮呈灰褐色,叶通常 3 针一束,鲜有两针,球果圆锥状卵圆形,种子近卵圆形或倒卵形。树干通直,木质轻软细密,是优质造纸、人造板原料,富含松脂是云南松的重要特点之一。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201211291706

庞明月, 张力小, 王长波. 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析. 生态学报, 2014, 34(3): 537-545.

Pang M Y, Zhang L X, Wang C B. The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 537-545.

基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析

庞明月, 张力小*, 王长波

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:我国的小水电开发经历了以解决农村地区用电短缺到当前以促进节能减排、清洁能源建设为目的的转变。运用生态能量分析的方法之一——能值分析方法,选取贵州省安龙县红岩二级水电站为案例,对其建设与运行的可持续性进行了系统分析,并与国内外大水电的相关指标进行了平行对比。结果表明:该水电站 2010 年电力产出的能值转换率为 1.03×10^5 sej/J,其可再生性比例为 52.01%,在能值产出率、环境负载率和可持续能力等方面的表现均好于大水电。但其能值交换率为 0.58,表明 2010 年水电上网价格偏低。小水电的不稳定运行也使其系统能值指标呈现波动变化,当实际发电量为设计发电量的 50%时,水电的能值转换率接近于湄公河上大坝生产水电的能值转换率,可持续性指标的值从 6.12 急剧降到 3.01。系统评估水电资源,作好流域小水电总体开发规划,保证小水电系统稳定运行是提高其可持续性的关键之一。

关键词:小水电;生态能量;能值分析;环境表现;合理电价;不稳定运行

The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting

PANG Mingyue, ZHANG Lixiao*, WANG Changbo

State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: With the rapid development of small hydropower in China, its sustainability has drawn more and more attention. Using emergy analysis, one of the ecological energetic accounting methods, the overall sustainability of small hydropower system was analyzed in this paper, when choosing Hongyan second-cascade hydropower plant, Anlong County, Guizhou Province, China as the case. With the ability of accounting all forms of energy and materials from both environment and economic society on a common energy basis, emergy analysis has been used to analyze various kinds of systems such as agro-systems, wetlands systems, and urban systems. It has been proved as a powerful tool of the sustainability assessment of ecological economic systems. The related indices and ratios based on emergy flows can characterize the resource use, environmental impacts and overall sustainability of the studied systems, such as emergy yield ratio (EYR), environmental loading ratio (ELR), and emergy sustainability index (ESI). The results showed that the studied small hydropower production system produced 8.79×10^{13} J of electricity in 2010 by support of a total emergy of 9.04×10^{18} sej, in which river geopotential energy was the largest input, accounting for 48.35% of the total input. As a whole, 77.29% of the total input was from environment, which indicates that the construction and operation of the studied production system depended heavily on the local free environmental resources. And the transformity of electricity in 2010 was 1.03×10^5 sej/J, with a fraction of 52.01% renewable resources. By contrast, the transformities of electricity produced by large hydraulic projects at domestic and abroad were larger than 1.50×10^5 sej/J. Indicated by the comparison of EYR, ELR and ESI among the studied

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40901293)

收稿日期:2012-11-29; 修订日期:2013-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

system and the large hydraulic projects, the studied system possessed a higher competitiveness, a smaller environmental stress and a better sustainability. However, the value of emergy exchange ratio (EER) was 0.58, implying that the actual price of electricity integrated into the grid in 2010 was unfair for the studied plant. The process of integrating the electricity into the grid lost certain emergy for the plant. Additionally, a significant feature of small hydropower is unstable operation caused by lacking of dam or reservoir, which is different from large hydraulic projects. The operation of small hydropower plant is largely influenced by precipitation and other water diversion activities. Consequently, the generation of the electricity differs from year to year, which results in the fluctuation of related emergy indices. Moreover, it was found out that when the generation is 50% of the designed generation, the transformity of the studied production system is close to that of large dams on Mekong River and the value of ESI declines remarkably from 6.12 to 3.01. It is concluded that the sustainability of small hydropower production system is very sensitive to its generation. And the generation is determined by the amount of exploitable water resources. In order to improve the sustainability of small hydropower in China, it is important to make a good plan of exploiting hydropower resources and ensure stable operation.

Key Words: small hydropower; ecological energetic; emergy analysis; environmental performance; fair price; unstable operation

水电被认为是目前技术最成熟、最具有经济性的可再生能源,是我国政府为缓解能源紧缺和优化能源结构的首要选择^[1]。其中,小型水电站(简称小水电)因其灵活的开发方式及能够有效推动农村经济发展等优点而逐渐受到社会各界的广泛关注^[2]。在我国,小水电一般是指单站装机容量在 5 万 kW 及以下的水电站,技术可开发资源量为 1.28 亿 kW,居世界第一位,主要分布在中西部远离大电网且水资源丰富的山区^[3]。截至 2011 年末,全国范围内已建成小型水电站 4.5 万多座,装机容量 6212 万 kW,年发电量 1757 亿 kWh^[4]。与大水电相比,小水电对生态影响的争议更大,Paish 认为小水电工程量小,不会对当地生态环境造成如大坝所产生的负面影响,且在经济上是划算的^[5];而 Abbasi 等人则认为小水电对环境所造成的负面影响不亚于大型水电工程^[6]。国内关于小水电的环境影响及经济效益争论更是莫衷一是^[7-8],相关的研究也主要集中在小水电开发对河流动、植物群落的影响及节能减排等单一要素方面^[9-10]。

能值分析是 H.T.Odum 基于能量学和系统生态学建立的系统分析方法,通过将系统内储存和流动的各种形式的能量转化成统一单位的能值,能够对系统的生态环境影响及可持续发展能力等进行定量评估^[11-13],目前已成为城市、湿地、农业等生态系统常见的评估方法^[14-17]。值得强调的是,能值分析近年来也被用于灌区改造、热力电厂等工程的评

价^[18-19],尤其是 Brown、Kang、Yang 等学者先后利用能值分析方法定量分析泰国湄公河上 Pa Mong 和 Chiang Khan 两座大坝、韩国多功能大坝以及三峡大坝等大型水电站的可持续性等^[20-22],为本研究提供了很好的基础和参照的对象。

本文选取贵州省安龙县红岩二级水电站为案例,基于生态能量视角,利用能值分析方法对其建设和运行进行定量分析,探讨小水电建设运行的生态效益、环境负荷、公平电价以及不稳定运行等问题,以期对小水电的可持续发展提供定量参考依据。

1 研究对象与方法

1.1 红岩二级水电站概述

如前所述,我国小水电资源主要分布在中西部水资源丰富的山区,尤其是西南部的云贵川地区。安龙县位于贵州省黔西南布依族苗族自治州,该县小水电资源丰富且开发密度较高,目前投入运行的小水电站已达 20 多座,在小水电的建设运行方面具有很强的代表性。因此选择该县的红岩二级水电站(N24°59'44.52",E105°11'55.68")为案例点进行的研究。红岩二级水电站位于安龙县城西南部阿油槽村肖家云组南盘江畔,为无调节引水式水电站,始建于 2003 年,其发电用水来自河流上游,干旱时需用作农田灌溉。水电站利用挡水坝拦截河水,通过引水渠道将河水平缓地引至与进水口有一定距离的河道下游,集中落差。在引水渠道末端设置压力前池,以连

接引水渠道和水轮机的压力水管,通过压力水管将河水引至发电厂房发电,尾水排至河流下游,水电通过变电设备等进行上网。与常规大中型水电站不同的是,小水电一般无库容,流量调节能力差,来水受季节性降雨和灌溉争水等影响较大,导致小水电的

实际运行和设计规划有所不同。2010 年该水电站实际发电量 2452 万 kWh,上网电量 2442 万 kWh,折合年满发小时数为 3066h,与设计容量存在一定的差距(表 1)。

表 1 水电站设计运行及 2010 年运行情况对比表

Table 1 The designed operation and actual operation in 2010 of the study site

项目 Item	设计运行 Designed operation	2010 年实际运行 Actual operation in 2010
水头 Head of water/m	496	496
装机容量 Installed capacity/MW	8	8
流量 Discharge / (m ³ /s)	2.06	2.06
满负载运行小时数 Annual utilization hours /h	3920	3066
年发电量 Annual generation / GWh	31.4	24.5
年上网电量 Annual generation integrated into the grid / GWh	29.3	24.4

1.2 能值分析

所谓能值是指产品或劳务形成过程中直接或间接投入应用的有效能总量^[11]。实际应用中,太阳能是包含在地球所有生物化学过程中最重要的能量,所以常以太阳能值(solar emjoules)为基准衡量某一能

量的能值,单位为太阳能焦耳(solar emjoules,缩写为 sej)^[23]。不同类别的能量即能量(J)、质量(g)和货币(\$)通过单位能值价值(UEV)转化成太阳能值,从而对系统进行定量比较和分析。当能量形式为焦耳时,UEV 又可称为能值转换率^[24]。

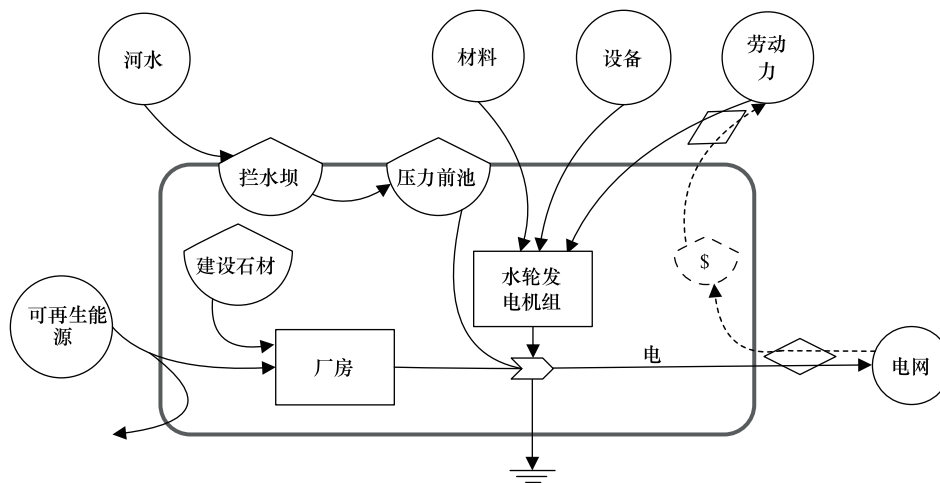


图 1 红岩二级水电站的物质能量流动图

Fig.1 Diagram of the emergy flows in the studied system

根据 Odum 设计的能量语言^[11],绘制了小水电生态经济系统的物质能量流动图(图 1),图中包含自然资源和输入主要成分以及系统组分之间的主要结构。根据输入资源是否免费以及是否具有可再生性,将其分为本地免费可更新资源(RL)、外界输入免费可更新资源(RO)、本地免费非可更新资源(NL)以及购入资源(P),其中购入资源又可分为购

入可更新资源(FR)和购入非可更新资源(FN),表 2 列出了小水电系统不同资源输入及主要能值指标。

2 结果与分析

2.1 小水电系统的能量流动

基于红岩二级水电站设计报告书和课题组的实地调研,建立了 2010 年红岩二级水电站实际运行的系统能值核算表(表 3)。需要指出的是水电站设计

运行 30a,而本研究是基于 1a 的静态研究,因此在能值核算清单中建设材料及发电设备等一次性投入能值均折算为年度的流动量。核算结果显示,该水电站 2010 年实际发电 8.79×10^{13} J,系统需要 9.04×10^{18} sej 的太阳能值。其中,河水势能(4.37×10^{18} sej/a) 占总输入能值的 48.35%,是系统运行的主要能量驱动力;在本地免费可更新资源中,雨水的能值是最大

的,为避免重复计算,只将雨水纳入到核算体系中,为 1.99×10^{14} sej/a;此外,建设石材 (2.62×10^{18} sej/a) 是唯一本地非可更新资源,且在核算表中为第二大能值输入项。总体来看,在该水电站的能量输入中有 77.29%来自免费的自然资源,可见小水电建设运行对自然资源的依赖程度很高。

表 2 小水电系统的主要能值指标

Table 2 Energy-based indices for small hydropower system assessment

能值指标 Emergy index	符号、计算公式 Symbol or formula	含义 Description
本地免费可更新资源 Local free renewable resources	RL	本地自然环境投入的可更新能值,如太阳能、雨能、风能、地热能等
外界输入免费可更新资源 Free renewable resources from outside	RO	从上游直接流入厂房的河水势能
本地免费非可更新资源 Local free nonrenewable resources	NL	本地直接投入的非可更新资源,主要为建设石材等
可更新购入资源 Renewable fraction of purchased resources	FR	从人类经济社会系统购入能值中的可更新部分
非可更新购入资源 Nonrenewable fraction of purchased resources	FN	从人类经济社会输入能值中的不可更新部分
能值总投入 Total emergy input	$U = RL + RO + NL + FR + FN$	支撑系统运行的总能值需求
可更新能值比例 Renewable emergy fraction	$\%R = (RL + RO + FR) / U$	支撑系统运行的可更新能值占总能值比率
能值产出率 Emergy yield ratio	$EYR = U / (FR + FN)$	支撑系统运行的总能值与经济社会投入能值之比,表明系统从人类经济社会输入的能值对本地资源的开发能力
环境负载率 Environmental loading ratio	$ELR = (NL + FN) / (RL + RO + FR)$	支撑系统运行的非可更新资源(本地和外界输入的)与可更新资源之比例,表明系统运行产生的环境负荷
能值可持续指标 Emergy sustainability index	$ESI = EYR / ELR$	能值产出率与环境负载率的比值,衡量生产系统在单位环境负荷下的生产效率
能值交换率 Emergy exchange ratio	$EER = [(\$/income) \times (sej/\$)_{country}] / U$	购买者支付货币相当的能值与产品能值之比,可衡量交易是否公平

表 3 红岩二级水电站系统能值核算表

Table 3 Emergy evaluation table of the studied system

项目 Item	原始数据 Raw data	可更新比例 Renewable factor	单位能值价值 UEV/(sej/单位)	太阳能值 Solar emergy/sej
本地免费可更新资源 Local free renewable resources (RL)				
1 太阳能 Sunlight/J	4.74×10^{12}	1.00	$1^{[25]}$	4.74×10^{12}
2 雨水 Rain/J	6.41×10^9	1.00	$3.10\times10^4^{[25]}$	1.99×10^{14}
3 风能 Wind/J	2.73×10^9	1.00	$2.45\times10^3^{[25]}$	6.70×10^{12}
RL 总计				1.99×10^{14}
外界输入免费可更新资源 Free renewable resources from outside (RO)				
4 河水势能 River geopotential/J	1.10×10^{14}	1.00	$3.96\times10^4^{[20]}$	4.37×10^{18}
本地免费非可更新资源 Local free nonrenewable resources (NL)				
5 建设石材 Stone/g	1.56×10^9	0.00	$1.68\times10^9^{[18]}$	2.62×10^{18}
购入资源 Purchased input (P)				
6 建设水泥 Cement/g	9.17×10^8	0.00	$3.04\times10^9^{[26]}$	2.79×10^{17}
7 建设钢材 Steel/g	4.57×10^6	0.00	$4.24\times10^9^{[27]}$	1.94×10^{16}

续表

项目 Item	原始数据 Raw data	可更新比例 Renewable factor	单位能值价值 UEV/(sej/单位)	太阳能值 Solar emergy/sej
8 建设木材 Wood/g	2.45×10^8	1.00	6.77×10^8 [28]	1.66×10^{17}
9 炸药 Explosive/g	2.17×10^6	0.00	4.19×10^9 [29]	9.08×10^{15}
10 建设用电 Electricity/J	2.21×10^{10}	0.00	2.92×10^5 [11]	6.46×10^{15}
11 发电设备 Machinery/g	1.26×10^7	0.00	1.13×10^{10} [20]	1.42×10^{17}
12 柴油 Diesel fuel/J	3.26×10^{11}	0.00	1.21×10^5 [30]	3.95×10^{16}
13 劳动力 Labor/J	9.02×10^{10}	0.90	1.24×10^6 [29]	1.12×10^{17}
14 运行维护 Operation and maintenance/ \$	6.03×10^4	0.05	6.28×10^{12} [31]	3.79×10^{17}
15 建设服务 Construction services/ \$	2.99×10^4	0.05	6.28×10^{12} [31]	1.88×10^{16}
16 重新安置 Resettlement/ \$	6.35×10^3	0.05	6.28×10^{12} [31]	3.99×10^{16}
17 税费 Tax and fee/ \$	1.07×10^5	0.05	6.28×10^{12} [31]	6.74×10^{17}
可更新购入资源 Renewable fraction of purchased resources (FR)				3.31×10^{17}
非可更新购入资源 Nonrenewable fraction of purchased resources(FN)				1.72×10^{18}
购入资源总计 Total purchased input (P)				2.05×10^{18}
能值总投入 Total emergy input (U)				9.04×10^{18}
产出 Yield(Y)				
18 水电 Electricity/J	8.79×10^{13}		1.03×10^5	9.04×10^{18}

根据能值方法的最新发展,本研究采用 2000 年后 Odum 重新计算的驱动全球过程的能值量,即 15.83×10^{24} sej/a,为使得单位能值价值之间具有可比性,基于 9.44×10^{24} sej/a 计算得到的单位能值价值乘以 1.68 (15.83/9.44) 进行换算^[32]

在购入资源中,税费、运行维护及建设水泥是其中 3 个最大的能值投入,分别为 6.74×10^{17} , 3.79×10^{17} 和 2.79×10^{17} sej/a。而钢材、机械设备及其他建设材料所占比例较小,这是因为小水电站的水工建筑物结构简单。但由于安龙县地处典型的喀斯特地貌区域,地表易被流水侵蚀,所以需石子、水泥等组

成混凝土来加固引水渠道以防止水的下渗等。此外,与大型水电站不同的是,小水电淹没和移民损失很小,重新安置只占到能值总投入的 0.44%。图 2 给出了红岩二级水电站的主要能值输入即能值结构。

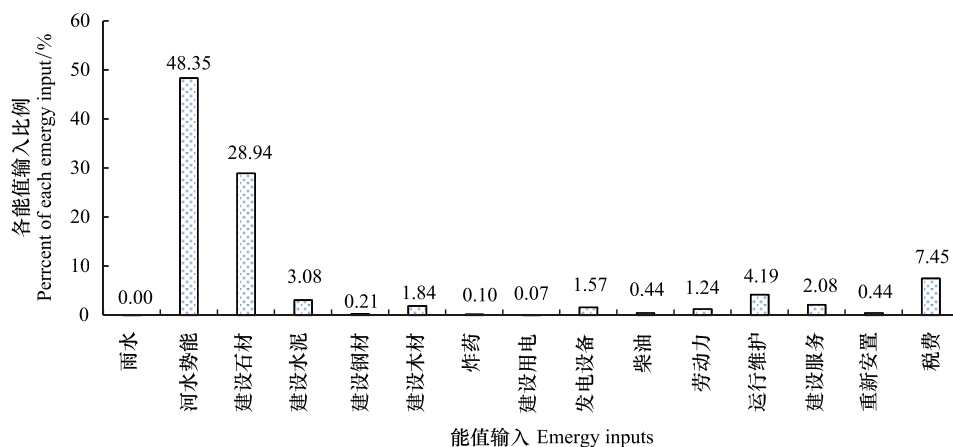


图 2 案例小水电系统的能值输入结构

Fig.2 Structure of detailed inputs for the studied system

2.2 能值指标

由能值核算表计算可得到一系列能值指标包括

能值转换率、能值产出率、环境负载率和能值可持续指标等,并将其分别与所选泰国湄公河上两座大

坝^[20]、韩国多功能大坝^[21]以及三峡水电站^[22]相对比(表4),以便对小水电生态经济系统作更深入的分析。

2.2.1 能值转换率

能值转换率是指系统生产单位物质所需投入的能值量。当不同系统生产相同的产品时,能值转换率可表征系统的生产效率。能值转换率低,生产相同的产品所需能量少,或者相同能量可生产出更多的产品,则说明系统生产效率高^[11,33]。本研究中,小

水电的能值转换率为 $1.03 \times 10^5 \text{ sej/J}$,其可再生性比例为 52.01%。对比大水电,其能值转换率均在 $1.50 \times 10^5 \text{ sej/J}$ 之上,可见小水电的生产效率较高,这是因为小水电建设运行中所需水工建筑物等较少,主要是对于水能的转化,而大水电所需机械设备等投入较多,并有大量泥沙堆积、移民等,在转化水能的同时需要大量能值输入及能值损失,因此转化水能效率较低。

表4 小水电和大型水电站的能值指标对比

Table 4 Emergy indices for the studied system and large hydropower

项目 Item	研究对象 Studied system	对照组 Comparison systems			
	红岩二级水电站	Pa Mong ^[20] 泰国	Chiang Khan ^[20] 泰国	多功能大坝 ^[21] 韩国	三峡大坝 ^[22] 中国
能值转换率 Transformity/(sej/J)	1.03×10^5	1.54×10^5	1.57×10^5	2.54×10^5	5.58×10^5
能值产出率(EYR)	4.40	1.39	1.34	1.86	0.73
环境负载率(ELR)	0.92	3.2	3.1	2.94	0.71
能值可持续指标(ESI)	4.77	0.43	0.43	0.63	1.03

2.2.2 能值产出率

能值产出率指示系统通过从人类经济社会输入资源对自然资源的开发能力^[32],与支撑系统运行的资源是否免费有关,而与资源是否为可再生无关,可用来评估免费自然资源对系统运行的潜在贡献能力^[14],同时也反映了系统的经济活力。EYR 越大,表明免费自然资源对系统生产过程的贡献越大,系统经济活力越强,竞争力越大。本研究中,小水电的 EYR 为 4.40,是其他几座大型水电站 EYR 的 2.36 到 6.03 倍,这意味着小水电在建设运行过程中对从人类社会输入的资源依赖程度较低,而对免费自然资源的利用程度要明显高于其他几座大型水电站,其开发效益较高,经济竞争力强于大水电^[34]。

2.2.3 环境负载率

环境负载率表示系统建设运行中从外界输入能值以及开发本地非可再生资源对当地生态环境造成的胁迫作用,与支撑系统运行的资源可再生比例直接相关。理论上,一个自然系统如果 100% 依靠可再生资源支撑运行,则 ELR 为 0^[35],若系统持续处于较高的环境负载率,将会造成不可逆转的系统功能退化^[34]。三峡水电站因为河水重力势能输入较大而 ELR 较低,除此之外,本研究中小水电的 ELR (0.92) 远小于湄公河上两座大坝和韩国多功能大坝

(分别为 3.2、3.1 和 2.94),这说明该小水电在建设运行过程中能量的传递和转移对环境造成的压力小,其环境表现要远远好于大水电,这主要是因为小水电系统运行过程中河水势能是主要驱动力,而对不可再生资源的依赖程度较低。

2.2.4 能值可持续指标

能值可持续指标表征系统的可持续发展能力,若系统的能值产出率较高,同时环境负载率较低,则该系统的可持续能力较好^[35]。一般而言,ESI 介于 1 和 10 之间,说明该系统既有较好的发展潜力又有很好的持续能力;ESI < 1,该系统为消费性系统,是不可持续的;ESI > 10,该系统发展水平较低^[36]。本研究中,小水电的 ESI 为 4.77,表明小水电生态经济系统既有较好的经济活力,又有较强的可持续发展能力;而湄公河上两座大坝和韩国多功能大坝的 ESI 均小于 1,为消费型系统,长久来看是不可持续的,三峡水电站 ESI 为 1.03,可持续能力较低。

2.3 小水电上网的合理电价

一直以来,小水电的上网电价备受争议。从区域资源交换的角度来说,能值分析能够定量比较出售产品的能值和支付货币的能值当量,因此可用能值分析方法判定小水电上网电价是否合理,如图 3 所示。能值交换率是指购买者支付货币相当的能值

与产品能值之比率,可以衡量交易双方哪方占优势。 $EER > 1$,说明交易有利于卖方; $EER < 1$,说明交易有利于买方;只有当 EER 等于 1 时,买方和卖方之间的交易才是公平的^[32,37]。2010 年,红岩二级水电站的上网电价为 0.23 元/kWh,由此得到 EER 为 $0.58 < 1$,说明水电上网过程中,小水电输出的能值高于得到的货币能值,从而在运行过程中消耗本地自然资源,该价格不利于电站的可持续发展。计算可知,水电的合理价格为 0.40 元/kWh,这意味着水电站在 2010

年由于不合理电价损失了 3.83×10^{18} sej 的太阳能值,占到总投入能值的 42.35%。

不合理电价已经成为小水电可持续发展最重要的限制因素之一,很多小水电站因为利益亏损而停产。一旦停产,投入到这些小水电站中的设备、建筑材料等因为在偏远山区没有其他用途而被闲置,造成资源浪费。因此,为避免资源浪费、保证小水电产业的经济可持续发展,应该适当提高水电上网电价,至少应该保证其合理电价。

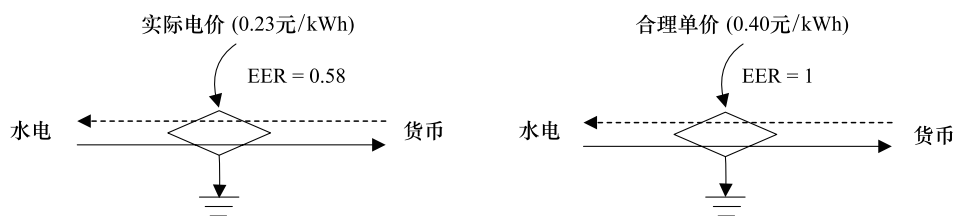


图3 水电上网过程中的能值交换示意图

Fig.3 Diagram showing the energy exchange in the process of the electricity integrated into the grid

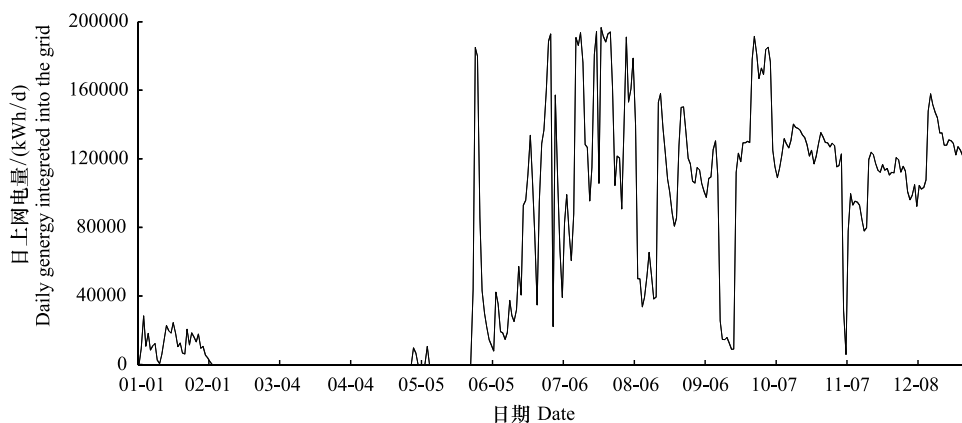


图4 红岩二级水电站 2010 年日上网电量波动图

Fig.4 Daily generation integrated into the grid of the studied plant in 2010

2.4 小水电运行的不稳定性分析

如前所述,小水电由于没有拦河坝或水库,流量调节能力差,受季节性降雨及灌溉争水等影响,来水情况不稳定,日发电量波动较大^[5,38]。图4为红岩二级水电站 2010 年日上网电量波动图,可看出从 2 月到 5 月,因为在枯水季节无水可发,水电站几乎处于完全停运状态;从 6 月开始,随着降雨增多,水电站除了因工程质量问题停运之外,一直处于相对满负载运行;进入 10 月之后,降雨减少,发电量随之相应减少,一直持续到翌年 1 月。小水电站每年的发电量不同,水电站的能值分析结果也会随之改变。因此有必要分析发电量对水电站的环境表现的影响

程度。

根据现场调研,水电站自运行以来最低达到了 50% 的设计年发电量,因此本研究考虑 3 种情况:设计发电量、2010 年实际发电量 (83%) 以及最少发电量即 50% 的设计发电量,并将 3 种情况下水电站的能值指标作对比,如图 5 所示。可以看出,发电量对水电站能值指标的影响很大,随着发电量的减少,水电站系统的可持续表现逐渐变差。尤其是当发电量由设计发电量减少到 50% 设计发电量时,红岩二级水电站产出的水电能值转换率由 9.8×10^4 sej/J 增大到 1.31×10^5 sej/J,接近于湄公河上大型水电站产出水电的效率 (分别为 1.54×10^5 、 1.57×10^5 sej/J);系统

ESI 值也从 6.12 急剧减小到 3.01, 证明小水电系统的可持续能力对发电量变化十分敏感。水电站的发电量是由可用水量决定的。因此, 在确定一个小水电规模的时候, 投资者和规划者应该特别关注河流的可开发资源量, 并充分考虑各种不确定性因素。

如果水电站规模超过了可利用水量, 则会因缺水造成设备闲置; 如果水电站规模小于可利用水量, 则会造成部分水能资源的浪费。可见, 对于特定的河流, 适度规模的水电开发以使水电站在生态和经济效益达到最佳状态至关重要。

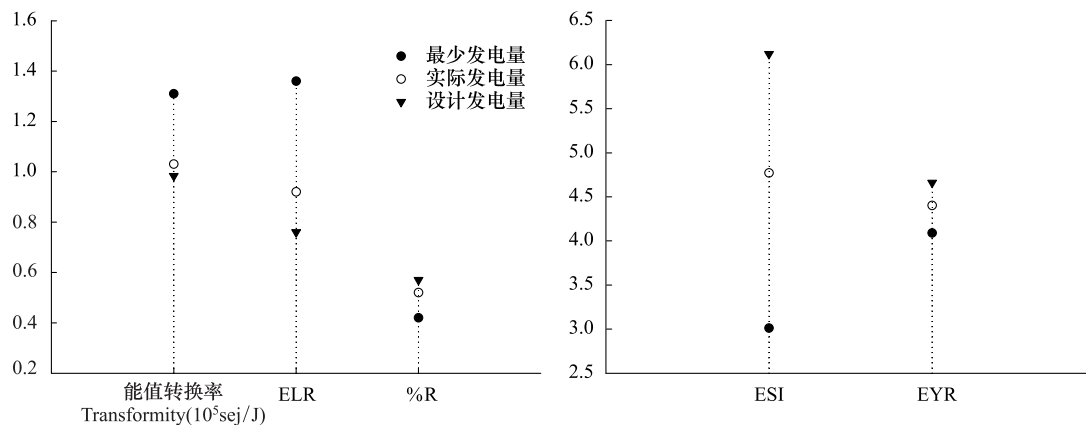


图5 不同发电量情况下红岩二级水电站能值指标变化图

Fig.5 Analysis of environmental performance of the studied system in response to variation of generation

3 结论

本研究以能值分析理论为方法, 通过计算能值指标及对比, 对小水电生态经济系统的运行特征进行分析, 结果表明:

(1) 2010 年安龙红岩二级小水电生态经济系统需要 9.04×10^{18} sej 的能值支撑, 主要依靠免费自然资源, 免费自然资源占到总投入能值的 77.29%。通过和大水电的系统能值指标对比可知, 相对于大水电, 小水电对本地资源的转化能力较高而环境负荷较低。整体来讲, 小水电的可持续性表现要优于大水电。

(2) 2010 年红岩二级水电站水电上网过程中的 EER 为 0.58, 上网电价低于其合理价格, 水电站损失了 3.83×10^{18} sej 的能值。因此, 为保证小水电的经济可持续健康发展, 应该适当提高小水电的上网电价, 至少应该保证其合理电价。

(3) 通过分析可知, 红岩二级水电站的环境表现受发电量影响很大, 随着发电量减少, 生产效率、环境压力等表现变差。当发电量由设计发电量减少到最少发电量时, ESI 值从 6.12 急剧降低至 3.01, 可见系统的可持续能力对发电量非常敏感。而发电量是由小水电可用水量决定的, 因此, 系统评估水电资源, 做好流域小水电总体开发规划, 保证小水电系统

稳定运行是提高其可持续性的关键之一。

References:

- [1] Wang X M. Priority given to development of hydropower resources to implement the national energy development strategy. *Energy Technology and Economics*, 2010, 22(12): 1-4.
- [2] Cheng H Z. Utilization of small hydropower resources with promotion of new countryside construction. *China Water Resources*, 2006, (14): 17-18.
- [3] China Energy Development Strategy in the Research Project Group. *China Energy Long-Term (2030, 2050) Development Strategy Research-Renewable Energy*. Beijing: Science Press, 2011: 40-41.
- [4] The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Xinhua News Agency: China expands the scale of rural hydropower to alleviate energy and environmental crisis, 2012. Available from: http://www.mwr.gov.cn/slxz/mtzs/xhsxhw/201205/t20120525_321968.html.
- [5] Paish O. Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6(6): 537-556.
- [6] Abbasi T, Abbasi S A. Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(4): 2134-2143.
- [7] Zou T F, Wang Z J. The problems existing in the development of small hydropower in China and countermeasures research. *China Rural Water and Hydropower*, 2007, (2): 82-84.
- [8] Zhang W Y. Carrying out "the same grid, the same price" is the key to the development of rural hydropower and promoting the increase in farmers' income. *Small Hydro Power*, 2010, (2): 15-21.
- [9] Fu X C, Tang T, Jiang W X, Li F Q, Wu N C, Zhou S C, Cai Q H. Impacts of small hydropower plants on macroinvertebrate

- communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1):45-52.
- [10] Ding Y F, Tang D S, Wang T. Benefit evaluation on energy saving and emission reduction of national small hydropower ecological protection project. *Energy Procedia*, 2011, 5:540-544.
- [11] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [12] Lan S F, Qin P. Emergy analysis of ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 129-131.
- [13] Zhang L X. Emergy analysis of ecosystem // Cai X M, Cai B F eds. *The Theory and Practice of Ecosystem*. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 249-270.
- [14] Zhang L X, Yang Z F, Chen G Q. Emergy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy Policy*, 2007, 35(7): 3843-3855.
- [15] Ton S, Odum H T, Delfino J J. Ecological-economic evaluation of wetland management alternatives. *Ecological Engineering*, 1998, 11(1/4):291-302.
- [16] Zhang L X, Chen B, Yang Z F, Chen G Q, Jiang M M, Liu G Y. Comparison of typical mega cities in China using emergy synthesis. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(6):2827-2836.
- [17] Zhang L X, Yang Z F, Chen B, Liu G Y, Liang J. An analysis on urban ecological competition capability with biophysical accounting method. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4344-4352.
- [18] Chen D, Webber M, Chen J, Luo Z H. Emergy evaluation perspectives of an irrigation improvement project proposal in China. *Ecological Economics*, 2011, 70(11): 2154-2162.
- [19] Brown M T, Ulgiati S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10(4):321-334.
- [20] Brown M T, McClanahan T R. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong River dam proposals. *Ecological Modelling*, 1996, 91(1/3):105-130.
- [21] Kang D, Park S S. Emergy evaluation perspectives of a multipurpose dam proposal in Korea. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(3):293-306.
- [22] Yang J, Tu Q, Liu B L. The estimate of sediment loss in the Emergy-based flows of hydropower production system // Brown M T, ed. *Emergy Synthesis 7*. FL: University of Florida Gainesville, 2012.
- [23] Brown M T, Herendeen R A. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, 1996, 19(3): 219-235.
- [24] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1/2):201-213.
- [25] Odum H T, Brown M T, Brandt-Williams S. Folio # 1: Introduction and Global Budget. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios*. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2000.
- [26] Pulselli R M, Simoncini E, Ridolfi R, Bastianoni S. Specific emergy of cement and concrete: an energy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5):647-656.
- [27] Zhang X H, Jiang W J, Deng S H, Peng K. Emergy evaluation of the sustainability of Chinese steel production during 1998—2004. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(11):1030-1038.
- [28] Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M, Tiezzi E. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 2001, 9(4):365-373.
- [29] Brown M T, Bardi E. Folio #3: Emergy of ecosystems. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios*. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 2001.
- [30] Ingwersen W W. Uncertainty characterization for emergy values. *Ecological Modelling*, 2010, 221(3):445-452.
- [31] Chen S Q, Chen B. Sustainability and future alternatives of biogas-linked agrosystem (BLAS) in China: An emergy synthesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3948-3959.
- [32] Zhang L X, Ulgiati S, Yang Z F, Chen B. Emergy evaluation and economic analysis of three wetland fish farming systems in Nansi Lake area, China. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 683-694.
- [33] Zhang L X, Song B, Chen B. Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 28: 33-44.
- [34] 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.
- [35] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*, 1998, 108(1/3):23-36.
- [36] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 1997, 9(1/2):51-69.
- [37] Cuadra M, Rydberg T. Emergy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua. *Ecological Modelling*, 2006, 196(3/4):421-433.
- [38] Huang H L, Yan Z. Present situation and future prospect of hydropower in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6/7): 1652-1656.

参考文献:

- [1] 王信茂. 实施国家能源发展战略要优先开发水电. *能源技术经济*, 2010, 22(12): 1-4.
- [2] 程回洲. 小水电资源利用与促进新农村建设. *中国水利*, 2006, (14): 17-18.
- [3] 中国能源中长期发展战略研究项目组. *中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究·可再生能源卷*. 北京: 科学出版社, 2011: 40-41.
- [4] 中华人民共和国水利部. 新华社: 中国扩大农村水电规模助解能源环境危机, 2012. Available from: http://www.mwr.gov.cn/slxz/mtzs/xhsxhw/201205/t20120525_321968.html.
- [7] 邹体峰, 王仲珏. 我国小水电开发建设中存在的问题及对策探讨. *中国农村水利水电*, 2007, (2): 82-84.
- [8] 章文裕. 实行“同网同价”是农村水电发展和促进农民增收的关键措施. *小水电*, 2010, (2): 15-21.
- [12] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 129-131.
- [13] 张力小. 生态系统的能值分析 // 蔡晓明, 蔡博峰. *生态系统的理论和实践*. 北京: 化学工业出版社, 2012: 249-270.
- [17] 张力小, 杨志峰, 陈彬, 刘耕源, 梁竞. 基于生物物理视角的城市生态竞争力. *生态学报*, 2008, 28(9): 4344-4352.
- [34] 李双成, 傅小峰, 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.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.3 Feb., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research advances and prospects of post-disaster ecological restoration assessment
..... LIU Xiaofu, WANG Wenjie, LI Jing, et al (527)
- The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting
..... PANG Mingyue, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (537)

Autecology & Fundamentals

- An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer
..... MA Lu, CAO Wenqing, ZHANG Wenjing, et al (546)
- Sexual size dimorphism and female individual fecundity of *Silurus asotus* and *Clarias fuscus*
..... FAN Xiaoli, LIN Zhihua, DING Xianlong, et al (555)
- Effect of environmental temperature on thermogenesis and evaporative water loss in Chinese bulbuls (*Pycnonotus sinensis*)
..... LIN Lin, CAO Mengting, HU Yilin, et al (564)
- Effects of irrigation on plant growth and nitrogen use characteristics of *Calligonum caput-medusae* Schrenk seedlings
..... HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (572)
- Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil
..... ZHU Fan, HONG Xiangqi, YAN Wende, et al (581)
- Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model
..... WEI Xingping, PU Junbing, ZHAO Chunyong (589)
- Monitoring salt and water dynamics in farmland and drainage ditch in a saline environment under reduced drainage intensity
..... PAN Yanxin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al (597)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population in the different altitude in degraded alpine grassland
..... GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang, ZHUO MA Lancuo (605)
- Biotic stress of predators on population of alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Col.: Chrysomelidae)
..... LIU Yufang, LI Fei, GUI Fangyan, et al (613)
- Characteristics of phytoplankton community in the northern South China Sea in summer and winter
..... MA Wei, SUN Jun (621)
- The amount and dynamics of litterfall in the natural secondary forest in Mopan Mountain
..... FAN Chunnan, GUO Zhongling, ZHENG Jinping, et al (633)
- Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere
..... LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al (642)
- The basic principle of random forest and its applications in ecology: a case study of *Pinus yunnanensis*
..... ZHANG Lei, Wang Linlin, ZHANG Xudong, et al (650)
- Quantitative analysis of driving factors for wetland degradation based on hydrology balance
..... HOU Peng, SHEN Wenming, WANG Qiao, et al (660)
- Stomatal and environmental control on evapotranspiration in a plantation in the lower mountain areas of North China
..... HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (667)
- The fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in alpine grassland of the Tianshan Mountains, Xinjiang
..... HE Guixiang, LI Kaihui, SONG Wei, et al (674)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: Partial Least-Squares Regression (PLS) MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al (682)
- Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone DONG Linlin, YANG Hao, YU Dongsheng, et al (690)
- Molecular mechanism on carbon dioxide assimilation of autotrophic microorganism and carbon translocation in agricultural soils WU Xiaohong, JIAN Yan, CHEN Xiaojuan, et al (701)

Resource and Industrial Ecology

- Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach SUN Yufeng, GUO Quanying (710)
- Assessing synthetic carrying capacity based on AD-AS model: a case study in Coastal Zone, Zhoushan SU Panpan, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (718)

Urban, Rural and Social Ecology

- Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (727)

Research Notes

- Spatial-temporal variability of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in different ecological regions of Shaanxi LIANG Ting, TONG Yan'an, LIN Wen, et al (738)
- The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area LIU Xiaoyong, LI Hongxun, LI Jianming, et al (746)
- Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China WANG Zhenhai, YIN Xiuqin, JIANG Yunfeng (755)
- Modeling the total allowable area for coastal reclamation: a case study of Xiamen, China LIN Chenchen, RAO Huanhuan, LIU Yan, et al (766)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 3 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 3 (February, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元