

基于水-能源纽带关系的 小型灌溉泵站可持续运行评价分析

高 静¹, 王 洁², 季 巍³, 汤树海⁴, 陈 丹¹

(1. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省农村水利科技发展中心, 江苏 南京 210029;
3. 南通市水利局, 江苏 南通 226007; 4. 淮安市涟水县水利科学研究所, 江苏 淮安 223400)

摘要: 水-能源纽带关系是当前国际研究的热点领域, 对于指导实现可持续发展目标具有重要意义。基于水-能源纽带关系理论, 提出了小型灌溉泵站可持续运行评价的关键指标, 包括能耗量、虚拟水消耗量和碳排放量。以江苏某地48个小型灌溉泵站为例, 通过实地调查和测流试验, 测算了泵站的提水量和耗电量及其运行过程中的虚拟水消耗量和碳排放量。研究发现, 泵站运行的可持续性受水泵特性、工作扬程、渠道现状、电机性能及规划布局等因素的影响。由此, 提出了数据收集与分析、问题诊断与改进、布局优化与规划和效率监测与维护等措施, 以提升泵站的运行效率和资源利用效率, 促进节能减排。

关键词: 水-能源纽带关系; 泵站; 碳排放; 可持续性

中图分类号: TV675 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2025)04-0001-0006

Evaluation and analysis of the sustainable operation of small irrigation pumping stations based on the water-energy nexus

GAO Jing¹, WANG Jie², JI Wei³, TANG Shuhai⁴, CHEN Dan¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China;
3. Water Conservancy Bureau of Nantong, Nantong 226007, China;
4. Huai'an Lianshui County Water Conservancy Scientific Research Station, Huai'an 223400, China)

Abstract: The water-energy nexus is currently a hot topic in international research and has significant implications for guiding the achievement of sustainable development goals. Based on the theory of water-energy nexus, key indicators for the sustainable operation evaluation of small irrigation pumping stations have been proposed, including energy consumption, virtual water consumption, and carbon emissions. Taking 48 small irrigation pumping stations in a certain area of Jiangsu Province as examples, the pumping capacity and power consumption of the pumping stations, as well as the virtual water consumption and carbon emissions during operation, were calculated through field investigation and flow measurement experiments. Research has found that the sustainability of pump station operation is influenced by factors such as pump characteristics, working head, channel status, motor performance, and planning layout. Therefore, measures such as data collection and analysis, problem diagnosis and improvement, layout optimization and planning, and efficiency monitoring and maintenance have been proposed to improve the operational efficiency and resource utilization efficiency of pumping stations, and to promote energy conservation and emission reduction.

Key words: water-energy nexus; pumping station; carbon emissions; sustainability

收稿日期: 2024-11-16

收稿日期: 江苏省水利科技项目(2022046)

作者简介: 高静(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土资源规划与管理研究。E-mail: 2323870510@qq.com

通信作者: 陈丹(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水土资源管理与生态灌区方面研究。E-mail: 23543458@qq.com

水-能源纽带关系揭示了水资源和能源系统之间相互依存、相互制约的关系^[1-2],这种关系涉及能源生产对水的需求以及水资源管理对能源的依赖。能源生产,尤其是火力发电和部分可再生能源技术(如生物质能、地热能),在运行过程中需要大量水作为冷却介质,而水资源的提取、净化、分配和处理过程又需要消耗能源^[3]。这种相互依存的关系在全球范围内受到广泛关注,它直接关系到经济、社会和环境的可持续发展,对于实现全球可持续发展目标至关重要^[4-5]。国际上已有不少学者对水-能源纽带关系进行了研究。普遍认为,自然资源的可用性及对资源的管理手段、气候变化、经济全球化趋势以及城市化进程中对资源需求的增长对水-能源纽带关系产生很大影响^[6],理解水和能源这两种资源之间相互依存关系对于确保资源的可持续利用和有效管理至关重要^[7]。

在我国,水-能源纽带关系近年来日益受到重视。有学者采用水-能源纽带关系理论框架对南水北调东线工程的能源消耗以及相关影响进行了分析^[8]。基于水-能源纽带关系的动态模型已应用于分析水费、能源税和水能源效率的改进对水-能源系统和国家经济的影响^[4]。在中国绿色经济发展研究中,也讨论了水-能源纽带关系对可持续发展的影响^[9]。我国政府已经实施了多项环境政策,以实现经济增长的同时解决水资源短缺问题,减少碳排放,应对全球变暖的挑战^[4]。国家《“十四五”节能减排综合工作方案》指出,要加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系,推进经济社会发展全面绿色转型,助力实现碳达峰、碳中和目标,将发展清洁能源作为能源结构调整的重要手段。

水电是重要的清洁可再生能源,是我国第二大常规能源^[10],大力发展水电成为应对全球气候变化的重要选择^[11]。随着我国水电工程数量的增长和规模的扩大,水电工程建设过程中因消耗能源和建筑材料而产生的碳排放也开始受到更多人关注^[12]。目前,提水工程的碳足迹测算大多涉及建设阶段,人们普遍认为提水工程等水电项目在运行阶段只涉及水和电,基本不产生碳排放。而实际上,提水工程与水电工程不同的是,提水工程在运行阶段多用电力作为动力提升水位,而任何发电方式对环境都会造成一定的影响。

本文对小型灌溉泵站的水-能源纽带关系进行分析,并根据纽带关系建立适用于小型灌溉泵站可持续性分析的评价体系,并以江苏某地48座小型灌

溉泵站为例对其运行过程进行可持续性评价并提出相应的可持续发展的建议和改进措施。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

本文主要关注小型灌溉泵站运行过程中的耗电情况以及碳排放对其可持续性的影响。泵站的运行过程会耗电,而在电力资源生产的过程中会伴随着水资源的消耗,也产生了碳排放,也就是泵站运行过程间接地消耗了虚拟水并间接产生了碳排放。这表明小型灌溉泵站工程中水与能源之间存在着相互依存、相互制约的纽带关系。

本文从水资源、能源出发,建立了基于水-能源纽带关系的小型灌溉泵站运行过程可持续性评价体系(表1),以此定量分析小型灌溉泵站运行过程中因提水用电而产生的能源消耗、水资源消耗以及碳排放。

表1 基于水-能源纽带关系的小型灌溉泵站运行过程可持续性评价指标

一级指标	二级指标
能耗/耗电量	总耗电量/kWh 单位提水量耗电量/(kWh·m ⁻³)
虚拟水消耗量	总虚拟水消耗量/L 单位提水量虚拟水消耗量/(L·m ⁻³)
碳排放量	总碳排放量/kg 单位提水量碳排放量/(kg·m ⁻³)

1.1.1 耗电量估算方法

小型灌溉泵站若配有独立电表则可以记录泵站提水的耗电量,因此一些泵站的耗电量可通过电表直接读取。对于样本过大,数据采集工作量大以及实际耗电量数据难以获取的部分泵站,则可以采用式(1)、(2)进行估算。式(1)表示能量无损耗状态下将1 m³水提高1 m的耗电量^[13]。

$$E = \frac{QH\rho g}{3600 \times 1000\eta} = \frac{9.8QH}{3600\eta} \quad (1)$$

$$e = \frac{E}{Q} = \frac{9.8H}{3600\eta} \quad (2)$$

式中: E 为提水耗电量,kWh; e 为单位提水量的耗电量,kWh/m³; Q 为提水的体积,m³; H 为提水扬程,m; ρ 为水的密度,此处取4℃时水的密度(1 000 kg/m³); g 为重力加速度,取值9.8 N/kg; η 为机械效率。

1.1.2 虚拟水估算方法

现有电力生产中水足迹的估算可采用耗电量乘以综合虚拟水系数,但由于清洁能源的发展及碳减排的需要,化石能源的生产构成比发生了变化。本文考虑了不同发电方式的水资源消耗差异,并根据电力能源构成比分别计算出提水过程在各不同发电方式的虚拟水消耗量。虚拟水消耗量、单位水量的虚拟水消耗量可由公式(3)、(4)求得。

$$V_w = \sum_j E \times \eta_j \times q_j \quad (3)$$

$$w = \frac{V_w}{Q} \quad (4)$$

式中: V_w 为虚拟水量, m^3 ; η_j, q_j 表示第 j 种发电方式在中国能源结构中的百分比(%)和该种发电方式发电过程中产生的虚拟水消耗量(m^3/kWh); w 为单位水量的虚拟水量, m^3/m^3 。

本文在计算提水工程因耗电而消耗的虚拟水量时将能源发电方式分为原煤发电、原油发电、天然气发电、水力发电和核力发电。对过去近10年中国能源结构百分比进行分析,原煤发电和原油发电所占比例有所下降,天然气发电、核力发电以及水力发电所占比例有所增加,但总体变化不大,原煤发电仍占据约70%的比重。参考项潇智等^[14-16]的研究对2030年能源生产量及构成进行预测,2030年5种发电方式分别占比约为64.5%(原煤发电)、5.5%(原油发电)、3.7%(天然气发电)、16.4%(核力发电)、9.9%(水力发电)。

1.1.3 碳排放估算方法

碳排放估算与虚拟水消耗量估算方法类似,碳排放量及单位水量的碳排放量可由式(5)、(6)求得。

$$G = \sum_j E \times \eta_j \times \varphi_j \quad (5)$$

$$g = \sum_j e \times \eta_j \times \varphi_j \quad (6)$$

式中: G 为温室气体排放量; g 为单位提水量的温室气体排放量; φ_j 为碳排放系数即不同发电方式每 kWh 发电量的碳排放量。

本文采用Hondo^[17]研究中不同燃料或能源发电方式生命周期内的碳排放系数进行计算:原煤发电(975.2 g/kWh)、原油发电(742.1 g/kWh)、天然气发电(607.6 g/kWh)、核力发电(24.2 g/kWh)、水力发电(11.3 g/kWh)。

1.2 数据来源

江苏某地提水灌溉面积达70%以上,其泵站体量小、数量多、分布广。本文选取了该地区48个典型的小型灌溉泵站作为样本,记录泵站以及泵站内

水泵的基本情况,调研泵站建设日期或泵站改造日期、泵站灌溉面积、灌溉作物类型、泵站管理状况、年亩均费用、年均灌水次数以及每次灌水天数、泵站运行状况等基本信息,并在灌水季节对泵站进行测流试验来确定各泵站的提水量。

1.2.1 泵站基本信息调查

调查并记录泵站基本状况,有无出水池,出水池新旧、破损状况,渠道进水口状况等。泵站内部观察水泵基本状况(包括数量,新旧,磨损等),电表互感器倍率,并留存水泵和电机的铭牌照片。在泵站现场向泵站管理人员或当地人调研泵站建设日期或泵站改造日期、泵站灌溉面积、灌溉作物类型、泵站管理状况(包括是否个人承包,如果个人承包,承包年费用以及年均电费、水费以及管理费成本)、年亩均费用、年均灌水次数以及每次灌水天数、泵站运行状况(维修次数、运行是否良好)等基本信息。

1.2.2 测流试验数据

定量分析某地农田灌溉泵站的水-能源纽带关系,需要对该地区灌溉泵站提水量和耗电量的关系进行测定,其中一定时间内各泵站的耗电量可从泵站电表上直接读取,相应时间内的提水量采用测流试验的方法进行测定。测定泵站提水量的主要仪器包括无纸记录仪、静压式液位变送器、电磁流速仪、直尺、手机计时器、卷尺等设备和材料。

首先用带有静压式液位变送器的无纸记录仪记录单个水泵工作时出水池的水位、流速与时间的关系。试验前,详细记录泵站的型号、设计流量、设计扬程等基本信息以及渠道的形状、尺寸。测流实验选取了48个泵站作为试验泵站在灌溉季进行测流,各泵站的泵型多为轴流泵,渠道均为梯形或矩形。测量时,选择流速稳定且便于测量的点位,采用单点流速测量法,每隔20 s记录1次流速仪的流速读数、稳定水深等数据。在水位和水流流速稳定后,记录20 min内的流速、稳定水深及电表读数,并据此计算水泵在稳定状态下20 min内的提水量和耗电量。

在计时开始和结束时,分别记录泵站内电表的初始读数和结束读数,两者之差即为20 min内水泵提水所消耗的电量。根据公式(2)和一次能源构成比分别估算出5种发电方式所提供的发电量,将各发电方式的分配所得的发电量代入公式(3)中并结合中国各发电方式发电过程中的单位耗水量值,即

可估算出各泵站在持续灌水 20 min 的耗电量因发电过程而产生的虚拟水消耗量。将各发电方式的分配所得的发电量代入公式(5)和公式(6)中,即可估算出各泵站在持续灌水 20 min 因发电过程而产生的碳排放量。

2 案例分析

2.1 主要测算数据

江苏某地 48 座小型灌溉泵站的测流试验及其测算结果见表 2。

表 2 各泵站测算结果汇总

泵站 编号	提水量/m ³	耗电量/kWh	单位水量的耗电量/ (kWh/m ³)	虚拟水 消耗量/L	单位水量的虚拟 水消耗量 L/m ³	碳排放量/ kg	单位水量碳排放 量/(kg·m ⁻³)
1	146.80	8.68	0.059	27.96	0.19	6.96	0.05
2	390.72	13.12	0.034	42.26	0.11	10.53	0.03
3	697.74	12.72	0.018	40.97	0.06	10.21	0.01
4	299.83	9.79	0.033	31.53	0.11	7.86	0.03
5	874.47	21.65	0.025	69.73	0.08	17.37	0.02
6	553.87	10.57	0.019	34.05	0.06	8.48	0.02
7	648.99	5.80	0.009	18.68	0.03	4.65	0.01
8	325.41	6.41	0.020	20.65	0.06	5.14	0.02
9	310.45	14.65	0.047	47.19	0.15	11.76	0.04
10	714.97	13.42	0.019	43.23	0.06	10.77	0.02
11	607.80	13.42	0.022	43.23	0.07	10.77	0.02
12	620.52	11.86	0.019	38.20	0.06	9.52	0.02
13	556.50	15.43	0.028	49.70	0.09	12.38	0.02
14	537.94	30.42	0.057	97.98	0.18	24.41	0.05
15	748.44	12.17	0.016	39.20	0.05	9.77	0.01
16	493.92	20.61	0.042	66.38	0.13	16.54	0.03
17	763.92	20.57	0.027	66.26	0.09	16.51	0.02
18	387.17	13.22	0.034	42.58	0.11	10.61	0.03
19	528.66	30.85	0.058	99.37	0.19	24.75	0.05
20	330.41	19.24	0.058	61.97	0.19	15.44	0.05
21	1 440.27	10.91	0.008	35.35	0.02	8.85	0.01
22	1 961.93	32.65	0.017	105.82	0.05	26.48	0.01
23	1 161.43	10.17	0.009	32.96	0.03	8.25	0.01
24	1 196.91	10.90	0.009	35.32	0.03	8.84	0.01
25	605.25	4.09	0.007	13.25	0.02	3.32	0.01
26	344.06	8.91	0.026	28.89	0.08	7.23	0.02
27	805.27	12.00	0.015	38.89	0.05	9.73	0.01
28	357.42	12.20	0.034	39.55	0.11	9.90	0.03
29	1 417.86	11.43	0.008	37.04	0.03	9.27	0.01
30	1 080.87	31.38	0.029	101.68	0.09	25.44	0.02
31	1 401.01	27.27	0.019	88.38	0.06	22.12	0.02
32	801.96	13.69	0.017	44.37	0.06	11.10	0.01

续表2 各泵站测算结果汇总

泵站 编号	提水量/m ³	耗电量/kWh	单位水量的耗电量/ (kWh/m ³)	虚拟水 消耗量/L	单位水量的虚拟 水消耗量 L/m ³	碳排放量/ kg	单位水量碳排放 量/(kg·m ⁻³)
33	526.08	28.97	0.055	93.88	0.018	23.49	0.04
34	1 128.57	27.51	0.024	89.14	0.08	22.31	0.02
35	647.42	8.97	0.014	29.08	0.04	7.28	0.01
36	1 625.57	14.61	0.009	47.36	0.03	11.85	0.01
37	1 901.68	22.85	0.012	74.06	0.04	18.53	0.01
38	2 128.00	26.34	0.012	85.37	0.04	21.36	0.01
39	1 189.64	17.84	0.015	57.82	0.05	14.47	0.01
40	893.39	11.72	0.013	37.97	0.04	9.50	0.01
41	831.29	13.47	0.016	43.64	0.05	10.92	0.01
42	504.96	10.75	0.021	34.84	0.07	8.72	0.02
43	1 717.28	9.81	0.006	31.79	0.02	7.95	0.00
44	479.67	10.31	0.021	33.41	0.07	8.36	0.02
45	868.73	15.29	0.018	49.54	0.06	12.40	0.01
46	514.94	7.79	0.015	25.25	0.05	6.32	0.01
47	1 433.17	12.04	0.008	39.02	0.03	9.76	0.01
48	726.06	10.93	0.015	35.42	0.05	8.86	0.01
49	1 347.09	25.37	0.019	82.20	0.06	20.57	0.02
50	803.90	11.80	0.015	38.25	0.05	9.57	0.01

灌溉泵站的提水量一般受水泵自身特性、扬程、运行工况、进出水池水位、渠道或管道形式及尺寸、泵站工作年限、农村电网等多种因素的综合影响^[18]。试验结果表明,在相同工况下,即泵站运行条件保持相对稳定时,渠道中的稳定水位和流速基本保持不变,因此,在相同灌溉时间内泵站的提水量也基本保持恒定。如表2所示,48个测流泵站单位提水量的耗电量、虚拟水消耗量和碳排放量三者之间呈正比例变化趋势。具体而言,测流泵站的单位提水量的耗电量主要介于0.015~0.045 kWh/m³,平均值为0.022 kWh/m³,中位数为0.019 kWh/m³,标准差为0.014;单位提水量的虚拟水消耗量主要介于0.02~0.10 L/m³,平均值为0.07 L/m³,中位数为0.06 L/m³,标准差为0.046;单位提水量的碳排放量主要介于0.01~0.05 kg/m³,平均值为0.019 kg/m³,中位数为0.020 kg/m³,标准差为0.012。

该地区提水灌溉面积率为70%,根据农田灌溉用水总量43 397万m³,可估算出提水灌溉用水量约为30 378万m³。基于测流泵站最小值、中间值、最大值及平均值的计算结果进行估算,总耗电量、虚拟

水消耗量和碳排放量的估算结果详见表3。

表3 某地提水灌溉总耗电量、虚拟水消耗量、碳排放量估算

评价指标	耗电量/ 10 ⁴ kWh	虚拟水消耗量/ 10 ⁴ L	碳排放量/ 10 ⁴ kg
最小值	182.27	607.56	303.78
中间值	577.18	1 822.68	607.56
最大值	1 792.30	5 771.82	1 518.90
平均值	682.24	2 196.08	575.92

2.2 结果讨论

理论上,若将该地区泵站的扬程(2~6 m)和效率(80%~85%)参数代入公式(1)中,预计得到的各泵站的提水耗电量约为0.006~0.020 kWh/m³。在48个测流泵站,有29个泵站的实际提水耗电量在这一理论值范围内。分析表明,泵站的运行工况对泵站提水效率有着显著的影响,进而影响能源、水资源消耗和碳排放。进一步分析发现,影响泵站耗电量的因素主要包括:

(1)水泵自身特性:不同泵站安装的水泵存在差异性,即便是相同型号的水泵,由于完好程度、维护状况和工况不同,导致安装角、扬程、流量等参数和效率存在差异,从而影响泵站的耗电量^[19-20]。

(2)实际工作扬程:泵站的实际扬程可能因抽水河道的水位变化而有所变动,进而影响流量。若测试时渠道水位处于高水期或低水期,可能导致测流结果产生偏差,使得估算耗电量比实际耗电量偏高;若抽水过程中进出水位高差与设计扬程差异较大,则泵站的实际耗电量可能高于设计值,降低泵站的提水效率^[21]。

(3)实测渠道现状:泵站出水口连接的渠道情况各异,包括渠道的分级、分水口和出水口设置、完好程度及维护情况。渠道衬砌状况越好、渠道内杂物越少、渠道到田间的长度越短,其耗电量越低^[20]。

(4)电机性能:电机完好程度及其实际工作状态对耗电量有着直接影响。电机实际消耗的电量是输入水泵的轴功率,考虑到电机的能量损耗,其实际效率也会影响提水耗电量^[20]。

(5)泵站布局规划:部分泵站在规划和布局上存在不合理之处,如泵站规模与其控制灌溉面积的不匹配,导致了资源利用效率低下,亟需优化以提高泵站的整体运行效率。

为提升泵站效率,减少能耗,实现节能减排的可持续发展目标,本文提出以下措施:

(1)数据收集与分析:依托数据库和计算机强大的数据处理能力,系统地收集影响泵站提水耗电量的基础数据,并进行分析,为泵站维护提供针对性的指导和建议。信息技术的发展和大数据时代的到来为实时记录灌溉水量、时间和耗电量等数据提供了技术支撑^[21]。

(2)问题诊断与改进:及时诊断泵站效率较低的原因,并采取相应措施,如调整工作扬程、修缮渠道、更改渠道、更新电机等,以提高效率,必要时可对泵站进行重新规划。

(3)布局优化与规划:定期优化灌区内泵站布局,对未建的泵站进行可持续性评价分析,并根据评价结果进行方案的优选。

(4)效率监测与维护:通过定期记录泵站的灌溉水量和耗电量来检测泵站的效率变化,并对效率过低的泵站进行维护和更新。

3 结 论

本文基于水-能源纽带关系的国际热点与相关

理论,建立了针对小型灌溉泵站运行过程的可持续性评价体系,涵盖了耗电量、虚拟水消耗量碳排放量3个一级指标以及总耗电量、单位提水量耗电量、总虚拟水消耗量、单位提水量虚拟水消耗量、总碳排放量、单位提水量碳排放量6个二级指标。以江苏某地48座小型灌溉泵站为例,本研究通过实地调查和测流试验,对泵站在一定时间内的提水量和耗电量进行了定量分析,并计算了相应的虚拟水消耗量和碳排放量。

研究结果表明,单位灌溉水量的耗电量主要介于0.015~0.045 kWh/m³,平均值为0.022 kWh/m³,中位数为0.019 kWh/m³,标准差为0.014;单位灌溉水量的虚拟水消耗量介于0.02~0.10 L/m³,平均值为0.07 L/m³,中位数为0.06 L/m³,标准差为0.046;单位灌溉水量的碳排放量介于0.01~0.05 kg/m³,平均值为0.019 kg/m³,中位数为0.020 kg/m³,标准差为0.012。对比理论值和实测值,发现仅有29个泵站的耗电量落在理论预测范围内。进一步分析发现,小型灌溉泵站的耗电量受到水泵自身参数、渠道参数、电机性能以及外部环境因素的综合影响。为实现节能减排的可持续发展目标,本文提出了以下措施:数据收集与分析、问题诊断与改进、布局优化与规划,以及效率监测与维护,以提升泵站的运行效率和可持续性。

参考文献:

- [1] 李激,姜珊,赵勇,等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 39-48.
- [2] 王恒,方兰. 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 150-157.
- [3] AHMAD S, JIA H, CHEN Z, et al. Water-energy nexus and energy efficiency: A systematic analysis of urban water systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110381.
- [4] WANG Y, HU J, PAN H, et al. Water-energy nexus: the coupling effects of water and energy policy applied in China based on a computable general equilibrium model[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 423: 138647.
- [5] FARMANDEH E, CHOOBCHIAN S, KARAMI S. Conducting water-energy-food nexus studies: what, why, and how[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 27310.
- [6] 王红瑞,赵伟静. 水-能源-粮食纽带关系若干问题解析[J]. 自然资源学报, 37(2): 307-319.
- [7] 郝林钢,于静洁,王平,等. 面向可持续发展的水-能源-

(下转第10页)

参考文献:

- [1] 徐坚,赵霞,陈庆玉,等. 基于高分辨率遥感影像的小流域综合治理水土保持设施图斑解译标志建立[J]. 江苏水利,2017(11):63-66.
- [2] 徐坚,陈庆玉,高鹏,等. 基于遥感影像的泊船山小流域综合治理成果图斑解译分析[J]. 中国水利,2017(12):59-61.
- [3] 吴杰,董小涛,张珂,等. 基于高分一号卫星数据的库区淹没频率分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):9-14,64.
- [4] 周婷,汪炎,邹俊,等. 基于PCA和SVM的遥感影像水体提取方法及验证[J]. 水资源保护,2023,39(2):180-189.
- [5] 张珂,吴星宇,吴南,等. 基于高分一号遥感影像的水体提取方法对比分析与改进[J]. 水资源保护,2024,40(4):9-16.
- [6] 凌峰,王敬贵,孙云. 基于高分辨率遥感影像的生产建设项目扰动图斑解译标志的建立[J]. 中国水土保持,2016(11):16-19.
- [7] 邝高明,亢庆,刘超英. 基于高分辨率遥感和GIS生产建设项目监管技术及示范[J]. 人民珠江,2016,37(4):97-101.
- (上接第6页)
- 粮食纽带关系系统解析及其研究框架[J]. 地理科学进展,2023,42(1):173-184.
- [8] CHEN D, ZHANG D, LUO Z, et al. Water-energy nexus of the Eastern Route of China's South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Policy, 2019, 21(5):945-963.
- [9] XU J. Current Situation and Prospect of Green Economy Development in China[J]. Sustainable Development, 2021, 11(3):398-407.
- [10] 周世春,周晓蔚. 中国水电可持续发展实践[J]. 水力发电学报,2012,31(6):1-6.
- [11] 吴世勇,申满斌. 大力发展水电是应对全球气候变化的重要选择[J]. 水力发电学报,2010,29(5):116-119.
- [12] 何稼炜,刘珂韵. 基于碳排放的水利水电工程建设分析[J]. 节能,2024,43(5):88-91.
- [13] WANG J, ROTHAUSEN S G S A, CONWAY D, et al. China's water-energy nexus: greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(1):014035.
- [14] 项潇智,贾绍凤. 中国能源产业的现状需水估算与趋势分析[J]. 自然资源学报,2016,31(1):114-123.
- [15] YU S, WEI Y. Prediction of China's coal production-environmental pollution based on a hybrid genetic algorithm-system dynamics model[J]. Energy Policy, 2012, 42:521-529.
- [16] CLARK C E, BURNHAM A J, HARTO C B, et al. INTRODUCTION: the technology and policy of hydraulic fracturing and potential environmental impacts of shale gas development[J]. Environmental Practice, 2012, 14(4): (4):249-261.
- [17] HONDO H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case [J]. Energy, 2005, 30(11): 2042-2056.
- [18] 陈丹,张娣,汤树海,等. 小型灌溉泵站以時計水和以电计水计量方法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(6):22-25.
- [19] 周春阳. 上海市金山区农业灌溉用水量测算与分析[D]. 扬州:扬州大学,2018.
- [20] 王滇红,蔡守华,张健. 京杭大运河江苏段里运河沿线大中型灌区灌溉用水计量方法探讨[J]. 节水灌溉, 2018(12):92-96,103.
- [21] 卢有伸. 水利信息化技术在农业灌溉用水精准计量中的应用价值[J]. 农业科技与信息,2018(23):112-113.