

基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的瓯江流域 “水资源-社会-生态”协调发展评价

周月娇¹,董增川¹,李琼²,郑大成²,刘彪²,朱圣男¹,刘宇鹏¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098; 2. 温州市水文管理中心,浙江温州 325000)

摘要:为寻求区域的可持续发展,基于 InVEST 和 CA-Markov 模型分析了不同时期瓯江流域生境质量,通过构建“水资源-社会-生态”耦合系统的评价指标体系对瓯江流域协调发展状况进行评价。结果表明:2000—2020 年瓯江流域内以高生境质量区为主,但生境质量水平呈下降趋势,2030 年下降幅度将进一步增加;流域内高生境质量区集中于西南侧,低生境质量区主要在温州龙湾区以及丽水市市中心附近;“水资源-社会-生态”系统建设水平与耦合协调度向好发展,水资源子系统的建设状况是影响整体水平的关键因素。提出了科学引导土地利用、合理规划水资源配置、优化产业结构三方面改进措施,以实现区域生态保护与高质量发展。

关键词:“水资源-社会-生态”耦合系统;生境质量;协调发展;InVEST 模型;CA-Markov 模型;瓯江流域
中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-9511(2023)03-0029-05

生态环境是区域长期高质量发展的基础与保障。而水资源是保障社会经济发展、维护生态健康的基础性、战略性要素,其开发利用的合理性与经济社会发展的程度以及区域生态质量状况之间存在复杂的互馈关系^[1]。推动区域“水资源-社会-生态”的协调发展,对缓解水资源压力、解决社会发展与生态环境之间的矛盾,实现可持续发展具有重要意义。目前学者们对于“水资源-社会-生态”关系的研究多聚焦于构建综合指标体系描述系统状况,再结合耦合协调模型进行分析^[2-4]。然而在生态方面,采用指标体系法往往受指标涉及内容不全面、长时间序列数据难获取的限制,生态状况描述的准确性有待商榷。因此本文采用 InVEST 模型对生境状况进行定量分析^[5-6],该模型以遥感产品为基础,具有数据易获取、操作简单、结果可视化、评估较为准确的特点。此外,目前研究多侧重于针对历史与现状条件下的协调发展分析结果,制定推动“水资源-社会-生态”协调发展的对策,措施的制定未关注到三者未来的变化趋势。本文采用 CA-Markov 和 InVEST 模型^[7]预测未来土地利用变化下的生态环境变化趋势,从

而预测未来“水资源-社会-生态”的协调发展状况。

综上所述,本文基于 InVEST 模型制定瓯江流域“水资源-社会-生态”耦合系统的评价指标体系,分析 2000 年、2010 年、2020 年系统的协调发展状况,并结合 CA-Markov 模型预测 2030 年耦合系统中生态子系统的变化趋势,进而提出保障瓯江流域“水资源-社会-生态”系统协调高效发展的措施,为区域生态保护与高质量发展提供参考。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区概况

瓯江流域(118°45'E ~ 121°00'E, 27°28'N ~ 28°48'N)位于浙江省南部,为浙江省第二大河,流域面积 18 165 km²,干流长度为 377 km,涉及浙江省丽水市、金华市、台州市、温州市以及福建省寿宁县在内的 22 个县(市、区)。流域地处东南沿海,属亚热带季风气候区,气候温和、降水丰沛,多年平均降水深 1 711.5 mm。流域西南高、东部低,平均坡度为 0.15%。流域内森林植被良好,以针叶林为主要森林植被;流域下游是温州市经济发展的重要地区,

基金项目:温州市水文高质量先行区建设项目(WZSW-GZLFZXXQ-202105)

作者简介:周月娇(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:425480770@qq.com

通信作者:董增川(1963—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:zcdong@hhu.edu.cn

2020年流域下游生产总值占温州市全市生产总值的62.81%。“十四五”时期,瓯江流域将围绕水安全、水资源、水管理、水经济、水环境、水文化六方面,全面推进幸福瓯江建设、流域内经济发展与生态建设。

1.2 数据来源

研究所需数据包括2000年、2010年、2020年的土地利用数据,分辨率为30m,来自Globeland30平台(<http://www.globallandcover.com>);DEM数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),并通过ArcGIS进行空间数据处理获取流域内坡度信息;高速、铁路、省道等交通道路信息通过地理监测云平台(<http://www.dsac.cn>)获得;其他水资源量、GDP、产业结构、人口等涉及水文、社会经济数据来源于《浙江省统计年鉴》《浙江省水资源公报》。

2 研究方法

2.1 基于InVEST模型的生境质量评价

InVEST模型通过构建不同土地利用类型与影响源之间的联系,参考影响因素的最大影响距离、权重、空间衰退类型等属性,以及不同土地利用类型的生境适宜度,获取区域生境质量状况。生境质量计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (1)$$

$$D_{xj}^z = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} w_r r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr}}{\sum_{r=1}^R w_r}$$

其中

式中: Q_{xj} 为j类土地利用中栅格x的生境质量; H_j 为j类土地利用的生境适宜度; D_{xj} 为j类土地利用中栅格x的生境胁迫水平; k 为半饱和系数; z 为尺度常数,取值为2.5; R 为影响因素数量; Y_r 为影响因素所占栅格数量; w_r 为影响因素权重; r_y 为影响因素对栅格y的胁迫值; i_{rxy} 为影响因素r对栅格的影响作用; β_x 为栅格x的受保护程度; S_{jr} 为j类土地利用对影响因素r的敏感性指标。

结合流域特点,考虑相似的经济程度、人类活动强度,以及气候条件,确定各影响因素的最大影响距离及权重^[7-11],如表1和表2所示。将生境质量取值在[0,1]之间,其数值越接近1,表明区域生态环境建设状况越好;以0.25为间隔进行等级划分,当取值在[0,0.25]、(0.25,0.5]、(0.5,0.75]、(0.75,1]时依次为低、较低、中等、高等级状态。

表1 瓯江流域影响因素权重与距离

| 影响因素 | 最大影响距离/km | 权重 | 空间衰退类型 |
|----------|-----------|-----|--------|
| 耕地面积 | 1.5 | 0.5 | 线性 |
| 城镇建设用地面积 | 4.0 | 0.8 | 指数 |
| 高速公路面积 | 6.0 | 0.6 | 线性 |
| 省道面积 | 6.0 | 0.6 | 线性 |
| 铁路面积 | 5.0 | 0.3 | 线性 |

表2 不同土地利用类型的生态适宜度与敏感性指标

| 土地利用类型 | 生境适宜度 | 敏感性指标 | | | | |
|--------|-------|-------|--------|------|-----|-----|
| | | 耕地 | 城镇建设用地 | 高速公路 | 省道 | 铁路 |
| 水田 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 旱地 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 林地 | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.9 |
| 草地 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| 水域 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.7 |
| 城镇建设用地 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 未利用土地 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

2.2 基于CA-Markov模型的预测

CA-Markov模型耦合了CA模型在空间形态上预测演变能力,以及Markov模型在时间维度上的推演特点^[6,12],可对土地利用格局进行预测,在空间上其计算方式如下:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (2)$$

式中: S_{t+1} 、 S_t 分别为元胞t+1、t时刻有限离散的集合状态矩阵; N 为元胞领域范围; f 为领域范围内元胞转化规则函数。结合研究区自然现状与社会经济发展状况,利用多准则判断模型MCE量化坡度、与道路距离、与城镇建设用地距离、与水域距离等多种要素,制作适宜性图集,从而完善CA转换规则。在时间上演变特征采用下式计算:

$$S_{t+1} = P_{ij} S_t = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mm} \end{bmatrix} S_t \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为状态转移概率矩阵; m 为土地利用类型总数。

2.3 “水资源-社会-生态”系统协调发展评价

结合以往涉及“水资源-社会-生态”耦合系统的研究成果^[13-15],结合瓯江流域水资源开发利用目标、区域发展需求以及生态保护要求,以可操作性、导向性、科学性为原则,采用目标-准则-指标层模型,分层次从水资源自然禀赋、利用效率、利用结构角度描述水资源系统发展水平;引入经济与社会发展状态、产业结构角度的描述指标反映社会系统发展水平,用水结构均衡度、产业结构变化速度、产业结构合理化指数统一反映水资源供给条件下的经济发展的现状以及未来趋势;并从生境质量角度描述生态系统发展水平。采用Person相关系数降低所

选指标中的信息重复度。最终选取 13 个指标构建瓯江流域“水资源-社会-生态”协调发展评价指标体系(表 3),由此准确把握瓯江流域水资源、社会发展与生态环境之间复杂的互馈关系。同时,对原始数据进行规则化处理以消除量纲影响,并采用改进 AHP 与熵权法结合的主客观赋权方法^[16-17]确定各项指标针对其所在子系统的权重^[18],如图 1 所示。

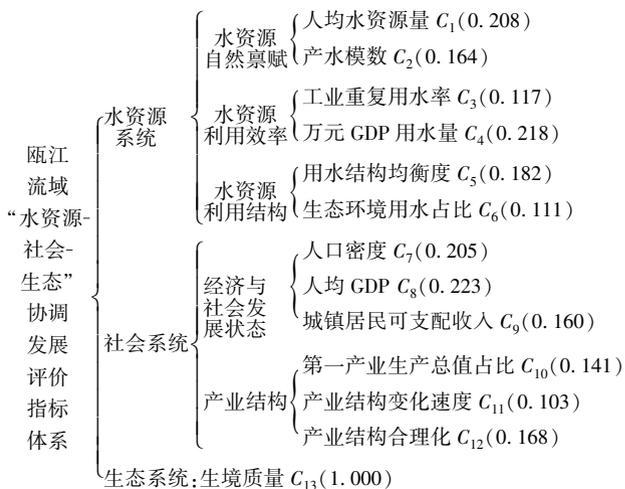


图 1 瓯江流域“水资源-社会-生态”协调发展评价指标体系

用水结构均衡度^[3]、产业结构变化速度、产业结构合理化^[14]3 项指标计算公式分别为

$$C_5 = - \sum_{i=1}^M \frac{P_i \ln P_i}{\ln M} \quad (4)$$

$$C_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_{it} W_{it+1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n W_{it}^2 \sum_{i=1}^n W_{it+1}^2}} \quad (5)$$

$$C_{12} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i/Y}{L_i/L} - 1 \right| \quad (6)$$

式中: P_i 为第 i 种利用类型水资源占总用水资源的比例; M 为水资源利用类型总数; W_{it} 为 t 时段第 i 产业的比重; n 为产业数; Y 为总产值; Y_i 为第 i 种产业产值; L 为总就业人数; L_i 为第 i 产业就业人数。

为探究各子系统之间相互作用、彼此影响,共同提升整体发展水平的程度,建立耦合协调发展评价模型,耦合协调度计算公式如下:

$$D = \sqrt{CT} \quad (7)$$

其中 $C = \sqrt[3]{\frac{f(x)g(y)h(k)}{[\{f(x) + g(y) + h(k)\}/3]^3}}$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \lambda h(k)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^8 x_i^* w_i \quad g(y) = \sum_{i=1}^6 y_i^* w_i$$

$$h(k) = 1 - (4 - \sum_{k=1}^4 kA_k) / 4$$

式中: D 为耦合协调度; C 为耦合度; T 为“水资源-社会-生态”耦合系统综合发展水平; $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(k)$ 分别为“水资源-社会-生态”各子系统评价指标; x_i^* 、 y_i^* 分别为水资源子系统、社会子系统规则化后的评价指标值; w_i 为评价指标 i 的权重; k 为生境质量等级; A_k 为 k 等级生境质量所占面积的比例; α 、 β 、 λ 为子系统系数,取值均为 $1/3$ 。

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年瓯江流域生境质量分析

2000—2020 年瓯江流域各等级生境质量变化情况如表 3 所示。总体看来,瓯江流域各等级生境质量面积占比由大到小依次是高、较低、中等、低,流域内生境质量总体偏好。同时,瓯江流域不同等级生境质量面积变化较为显著且存在明显差异。低等级生境质量占比表现出先减小后显著增大,整体呈扩大态势;2000—2010 年由其他等级转移为低等级的面积远小于 2010—2020 年,在后 10 年中由较低等级转移至低等级是面积增大的主要因素。较低等级面积占比表现相反,为先增大后显著减小,整体呈缩小态势;2000—2010 年由较低等级转移为其他等级的面积远小于 2010—2020 年,在后 10 年中较低等级面积大幅转移至低等级与高等级。中等等级面积变化总体上与低等级一致,呈扩大态势;后 10 年面积增大的主要原因为高等级生境质量退化。高等级面积变化总体上与较低等级一致,呈现出先增大后减小,整体缩小的状态;其前 10 年的转出面积占比小于后 10 年,且主要以生境质量退化至较低、中等等级为主。

表 3 瓯江流域各等级生境质量所占面积与比例

| 等级 | 2000 年 | | 2010 年 | | 2020 年 | | 2000—2020 年 占比变化/% |
|----|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|-----------------------|
| | 面积/ km ² | 所占 比例/% | 面积/ km ² | 所占 比例/% | 面积/ km ² | 所占 比例/% | |
| 低 | 336.48 | 1.98 | 224.51 | 1.32 | 589.63 | 3.47 | 1.49 |
| 较低 | 3087.48 | 18.16 | 3168.64 | 18.64 | 2837.27 | 16.69 | -1.47 |
| 中等 | 787.33 | 4.63 | 780.59 | 4.59 | 802.90 | 4.72 | 0.09 |
| 高 | 12792.38 | 75.23 | 12829.92 | 75.45 | 12773.86 | 75.12 | -0.11 |

空间上瓯江流域生境质量变化情况如图 2 所示,存在明显规律性。总体上流域内以高生境质量区域为主,普遍集中于流域西南侧;该区域主要为山区,土地利用类型多为林地,人类活动干扰较小。较低与中等等级的生境质量分布破碎化程度高,较低等级主要分布在区域东部与北部,中等等级分布位置与水域分布情况相似,瓯江流域集中式饮用水水源地以及河流、水库水质建设成果始终满足相关标准,且近年来水利部门对河流建设不再局限于河流

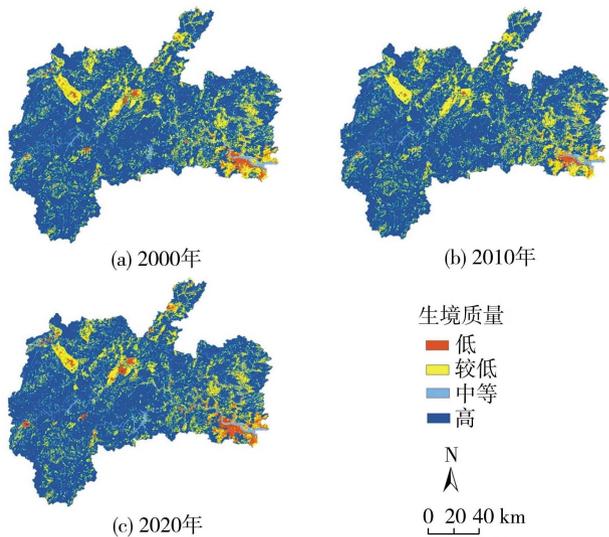


图2 瓯江流域2000、2010、2020年生境质量分布

本身,更关注河流的社会属性,促使临水区域生境质量较高。低等级生境质量区域主要集中在流域东南部与中部地区,该区域为温州市龙湾区以及丽水市中心区域,经济发达、人类活动剧烈。

3.2 “水资源-社会-生态”系统耦合评价

瓯江流域“水资源-社会-生态”耦合系统中各子系统的评价指标与系统综合发展水平 T 、耦合度 C 和耦合协调度 D 值如表4所示。由表4可知,3个子系统的发展状况存在明显差异。水资源子系统发展水平呈现先提高后降低的趋势,2020年发展水平较2000年提高了0.069;社会子系统发展水平呈显著上升趋势,2020年较2000年提高0.422;生态子系统评价指标值变化较小,始终保持在0.880左右。在社会子系统中,2010—2020年发展水平的变动幅度明显高于2000—2010年。

表4 瓯江流域各子系统2000、2010、2020年评价指标值

| 年份 | 评价指标 | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | $f(x)$ | $g(y)$ | $h(k)$ | T | C | D |
| 2000年 | 0.341 | 0.334 | 0.883 | 0.519 | 0.895 | 0.682 |
| 2010年 | 0.603 | 0.483 | 0.885 | 0.657 | 0.969 | 0.798 |
| 2020年 | 0.41 | 0.756 | 0.879 | 0.682 | 0.951 | 0.805 |

结合已有研究成果,按照0.25的间隔对 T 、 C 、 D 进行等级划分^[19-20],当指标在 $[0, 0.25]$ 、 $(0.25, 0.5]$ 、 $(0.5, 0.75]$ 、 $(0.75, 1]$ 区间内依次为初级、中等、良好、优质状态。由表4可知,系统综合发展水平始终为良好水平,耦合度始终保持在优质状态,耦合协调度自2000年由良好转为优质水平。此外,由于流域内生境质量存在西高东低且等级差别较大的情况,而社会与与水资源系统评价指标得分流域内分布正好相反,空间上系统综合发展水平呈东高西低、耦合协调度呈中部高状态。

此外,2000年、2010年、2020年生态子系统建

设状况明显优于整体建设水平,而水资源系统的建设得分远低于其余两个子系统以及整体得分;但子系统间的发展步调较为一致、相互配合耦合度很高,这表明水资源、社会、生态三者之间存在显著的相互影响和相互制约关系,水资源系统建设水平的提升是耦合系统整体水平提升的关键因素。同时,由于“水资源-社会-生态”耦合系统综合评价指标得分低于耦合度,使得“水资源-社会-生态”系统的耦合协调度低于耦合度,表明子系统间协调发展状态仍有一定的提升空间。

3.3 生境质量与系统协调发展状况预测

采用 CA-Markov 模型模拟2030年瓯江流域土地利用状况,并通过 Kappa 系数进行预测精度的评价,2030年 Kappa 系数为0.87,表明模型精度高、预测效果好。结合 InVEST 模型得到瓯江流域2030年生态子系统 $h(k)$ 值为0.841,低于历史时期的生态子系统得分。瓯江流域生境质量等级分布情况如图3和表5所示。由此可知,2030年瓯江流域生境质量等级空间分布状况与2000—2020年相近,低生境质量仍多集中于流域东南部与中部,与区域经济发展中心密切关联,且面积进一步扩大。此外2020—2030年各等级生境质量面积占比的演变趋势与2010—2020年变化情况相近,但变化幅度进一步增加。高等级生境质量面积缩小了1619.26 km²,占比降低9.52%;其余等级生境质量面积均有所扩大。总体上2030年生境质量较现状年存在恶化趋势。

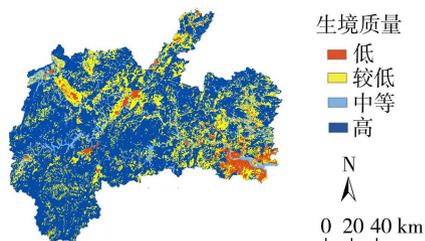


图3 瓯江流域2030年生境质量分布

表5 瓯江流域2030年各等级生境质量面积与占比

| 等级 | 2030年面积/ km ² | 2030年面积 占比/% | 2020—2030年 占比变化/% |
|----|-----------------------------|-----------------|----------------------|
| 低 | 712.75 | 4.19 | 0.72 |
| 较低 | 3573.79 | 21.02 | 4.33 |
| 中等 | 1562.53 | 9.19 | 4.47 |
| 高 | 11154.60 | 65.60 | -9.52 |

综上所述,“水资源-社会-生态”系统中生态子系统的发展存在退化情况。瓯江流域地形西南高、东部低,地形差异促使区域人类活动强度存在差别。西南部山区以林地为主、人为扰动较少,良好的生态环境得以保持。东部由于地势平坦、区位优势,社会经济发展速度不断提升、城市规模不断扩大,城镇建

设用地面积扩张;同时经济发展促使区域水资源供给压力增大,污染物产出增多,这些均会导致低等级生境质量区域面积增加。而生境质量的下降以及水资源过度开采,将影响区域水循环、抑制社会经济的进一步发展。此外,水资源子系统 $f(x)$ 总体处于上升趋势,结合线性趋势分析认为2030年流域水资源系统整体仍处于良好等级。由此可知,未来随着经济社会发展及流域内工业化与城镇化进程的加强,若仍保障现状条件下的土地利用经济发展模式以及生态保护措施,瓯江流域“水资源-社会-生态”系统安全将存在降低风险。

3.4 对策与措施

分析评价瓯江流域水资源开发利用、社会经济发展以及生态保护三者之间的发展状态,对统筹流域高质量发展具有重要价值。结合瓯江流域生境质量与“水资源-社会-生态”耦合系统的协调发展评价结果,可从以下方面采取措施,寻求符合流域自身特点的和谐发展模式。

在生态子系统建设方面,经济发展迅速且人口密集的区域生境质量等级较低,且面积持续扩大,需在符合国土空间规划的基础上,明确城市定位、科学引导城市建设用地规模,挖掘现有建设用地的利用潜力,推动区域绿色发展机制;考虑建设生态景观廊道,扩大绿化面积;健全区域生态保护责任体系,加强生态保护监管力度。

在水资源子系统建设方面,该子系统为“水资源-社会-生态”耦合系统中发展水平最低的子系统,其发展水平影响着耦合系统整体水平的提升。需重点关注改善流域水资源利用效率以及利用结构,从“开源”与“节流”两方面采取措施,合理规划适宜区域发展需求的水资源配置结构,提高科技创新能力并加大资金投入,同时,提升工业用水中水资源的循环使用效率,强化社会节水意识,推动节水政策的有效落实。

在社会子系统建设方面,其系统发展水平始终保持在上升趋势,但相较系统整体发展水平仍存在一定差距。需结合流域实际情况,进一步优化产业结构,促使流域社会经济发展模式改革,从而提升居民收入与社会经济效益;把控流域内城市化进程,合理调控流域内人口密度,满足居民对美好生活的需求。

4 结论

a. 2000—2020年瓯江流域各等级生境质量面积变化显著且存在明显差异;总体上流域内生境质量水平呈降低趋势。流域内以高生境质量区为主,

且该区域普遍集中于流域西南侧;低生境质量区主要分布在经济繁荣区域。预测2020—2030年各等级生境质量面积占比的演变趋势与2010—2020年变化相近,整体仍呈恶化趋势,且变化幅度增加。

b. 瓯江流域“水资源-社会-生态”系统发展水平不断提高,耦合协调度自2010年由良好转为优质水平。空间上,系统综合发展水平呈东高西低、耦合协调度呈中部高的状况。耦合系统整体水平提升的关键因素为水资源子系统的建设状况。

c. 为保障瓯江流域各系统和谐发展,避免系统整体发展水平下降,需从科学引导土地利用并进行生态修复,合理规划水资源配置结构并落实节水社会建设,优化产业结构并合理调控人口密度三方面进行改进。

参考文献:

- [1] 吴青松,马军霞,左其亭,等.塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J].水资源保护,2021,37(2):55-62.
- [2] 闻豪,文风.“一带一路”重点省份水资源-经济-生态环境耦合协调分析[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(10):870-877.
- [3] 杜新强,何立滢,姚泓钰,等.近15年来中国北方水资源-社会经济-生态环境耦合协调发展评价[J].中国农村水利水电,2022(6):66-75.
- [4] 赵翔,陈吉江,毛洪翔.水资源与社会经济生态环境协调发展评价研究[J].中国农村水利水电,2009(9):58-62.
- [5] 勾蒙蒙,刘常富,李乐,等.三峡库区典型流域生境质量时空演变特征与情景模拟[J].生态学杂志,2023,42(1):1-12.
- [6] 李亚楠,多玲花,张明.基于CA-Markov和InVEST模型的土地利用格局与生境质量时空演变及预测:以江西省南昌市为例[J].水土保持研究,2022,29(2):345-354.
- [7] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
- [8] 雷金睿,陈毅青,陈宗铸,等.基于InVEST模型的海南岛三大流域生境质量时空演变[J].应用生态学报,2022,33(9):1-12.
- [9] WANG Quan, WANG Haijun. Evaluation for the spatiotemporal patterns of ecological vulnerability and habitat quality: implications for supporting habitat conservation and healthy sustainable development [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2022. doi: 10.1007/S10653-022-01328-3.

(下转第50页)

- developing country water resource allocation [J]. World Development, 1994, 22 (11) :1613-1625.
- [2] GRAFTON R Q, LIBECAP G, MCGLENNON S, et al. An integrated assessment of water markets: a cross-country comparison [J]. Review of Environmental Economics and Policy, 2011, 5 (2) :219-239.
- [3] ENDO T, KALINUMA K, YOSHIKAWA S, et al. Are water markets globally applicable? [J]. Environmental Research, 2018; 13 (3) :34032.
- [4] 沈满洪. 水权交易与政府创新:以东阳义乌水权交易案为例[J]. 管理世界, 2005(6):45-56.
- [5] 王亚华. 水权解释 [M]. 上海:上海人民出版社, 2005.
- [6] 张瑞美, 尹献锋, 闫莉. 我国水权流转情况跟踪调查 [J]. 水利经济, 2014(1):20-25.
- [7] 刘世庆, 巨栋, 刘立彬, 等. 中国水权制度建设考察报告 [M]. 北京:社会科学文献出版社, 2015.
- [8] 水利部水资源管理局. 积极开展水权试点探索 加强水权制度建设[J]. 中国水利, 2018(19):1-3.
- [9] 刘悦忆, 郑航, 赵建世, 等. 中国水权交易研究进展综述 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(8):76-90.
- [10] 胡鞍钢, 王亚华. 从东阳-义乌水权交易看我国水分配体制改革[J]. 中国水利, 2001(6):35-37.
- [11] 安新代, 殷会娟. 国内外水权交易现状及黄河水权转换特点[J]. 中国水利, 2007(19):35-37.
- [12] 姜丙洲, 章博, 李恩宽. 内蒙古水权转换试验区监测效果分析[J]. 中国水利, 2007(19):47-48.
- [13] 李珂. 对黑河流域水权交易制度建设的思考[J]. 重庆科技学院学报(社会科学版), 2010(3):72-74.
- [14] 刘璠, 陈慧, 陈文磊. 我国跨区域水权交易的契约框架设计研究[J]. 农业经济问题, 2015, 36(12):42-49.
- [15] 刘世庆, 巨栋, 林睿. 跨流域水权交易实践与水权制度创新:化解黄河上游缺水问题的新思路[J]. 宁夏社会科学, 2016(6):99-103.
- [16] 郑航, 许婷婷, 李鹏学, 等. 干旱流域自流灌区农户水权交易行为分析[J]. 水利发展研究, 2016, 16(5):11-16.
- [17] 刘钢, 杨柳, 石玉波, 等. 准市场条件下的水权交易双层动态博弈定价机制实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(4):151-159.
- [18] 马海峰, 王景山, 鲍子云, 等. 宁夏水权交易试点实施技术方案研究:以中宁县农业节水向工业流转为例[J]. 中国农村水利水电, 2017(1):167-170.
- [19] 郭晖, 陈向东, 刘钢. 南水北调中线工程水权交易实践探析 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3):175-182.
- [20] 王丽珍, 黄跃飞, 田贵良. 国家试点省(区)水权改革经验比较与推进对策 [J]. 环境保护, 2018, 46(13):28-35.
- [21] 康德奎, 王昱, 方良斌, 等. 石羊河流域农户选择高效节水技术的影响因素研究 [J]. 节水灌溉, 2020(3):71-77.
- [22] 索东楷. 基于交易费用理论的河套灌区水资源有效利用研究 [J]. 内蒙古财经大学学报, 2020(2):86-88.
- [23] 赵清, 苏小飞, 刘晓旭, 等. 内蒙古黄河干流跨盟市水权试点研究 [J]. 水利经济, 2020(9):68-72.
- [24] 陈向南, 吴凤平, 李芳, 等. 高质量发展模式下内蒙古河套灌区的可交易水量 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2):130-139.

(收稿日期:2022-09-14 编辑:陈玉国)

(上接第33页)

- [10] 潘艺, 鲍海君, 黄玲燕, 等. 浙江沿海城市化时空格局演变及其对生境质量的影响:基于 InVEST 模型的研究 [J]. 上海国土资源, 2020, 41(3):18-24.
- [11] 陈实, 金云翔, 黄银兰. 长三角中心区生境质量时空变化及其影响机制 [J/OL]. 生态学杂志:1-14 [2023-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20221020.1139.007.html>
- [12] WANG Chunxiao, HUANG Shuyu, WANG Junjie. Spatio-temporal dynamic evolution and simulation of dike-pond landscape and ecosystem service value based on MCE-CA-Markov: a case study of Shunde, Foshan [J]. Forests, 2022, 13(8):1241.
- [13] 张恬姿, 王小军, 齐广平, 等. 甘肃省水资源-经济社会-生态环境耦合协调演变分析 [J/OL]. 水利水运工程学报:1-10 [2023-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20220622.1354.002.html>
- [14] 胡绵好, 廖桂萱, 袁菊红. 基于 EM-CCDM-RDDM 模型的区域用水效率与产业结构耦合协调评价 [J]. 水利科技与经济, 2019, 25(10):1-12.
- [15] 张风太, 苏维词. 贵州省水资源-经济-生态环境-社会系统耦合协调演化特征研究 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6):44-49.
- [16] 涂圣文, 赵振华, 邓梦雪, 等. 基于组合赋权-后悔理论的城市综合管廊运维总体风险评估 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27(6):160-167.
- [17] 陈隆吉, 董增川, 周月娇, 等. 基于健康与宜居协调发展的飞云江“幸福河”建设评价 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3):51-56.
- [18] 门业堃, 钱梦迪, 于钊, 等. 基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21):179-186.
- [19] 傅春, 邓俊鹏, 吴远卓. 基于 BP 神经网络和协调度的河流健康评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6):1422-1431.
- [20] 阳斌成, 张家其, 罗伟聪, 等. 基于 TOPSIS 及耦合协调度的湖南省 2009—2018 年水资源承载力综合评价 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(5):357-364.

(收稿日期:2022-10-07 编辑:骆超)