

苏北地区水资源-社会经济-生态环境 复合系统耦合协调发展研究

刘雨桐¹, 郑子沁¹, 周强², 陈霞², 闫怀春², 杨璐宇²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210024; 2. 江苏省水利数字中心, 江苏南京 210012)

摘要:以苏北地区“水资源-社会经济-生态环境”复合系统为研究对象,通过构建评价指标体系,结合模糊层次分析法与熵权法确定指标权重,利用耦合协调度模型对2013—2022年间苏北8市的多系统耦合协调发展规律进行解析。研究表明:近年来水资源短缺对苏北地区发展的约束效应凸显;区域复合系统综合评价指数和耦合协调度的上升特征证明总体往好的方向发展,但区域整体仍有较大的上升空间;空间分布形成“鞍型”格局。该研究为揭示区域系统协调发展机制提供了实证参考,验证了“以水定城”策略在区域可持续发展中的科学价值,为区域水资源管理提供理论依据和科学支撑。

关键词:水资源; 社会经济; 生态环境; 耦合协调; 苏北地区

中图分类号:[TV123] 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2025)08-0043-0006

Research on coupling and coordinated development of water resources-socioeconomic-ecological environment composite system in northern Jiangsu

LIU Yutong¹, ZHENG Ziqin¹, ZHOU Qiang², CHEN Xia²,
YAN Huaichun², YANG Luyu²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Digital Center, Nanjing 210012, China)

Abstract: Taking the “water resources-socioeconomic-ecological environment” composite system in northern Jiangsu as the research object, this study constructs an evaluation index system, combines fuzzy analytic hierarchy process and entropy weight method to determine the index weights, and uses a coupling coordination degree model to analyze the multi system coupling and coordinated development laws of eight cities in northern Jiangsu from 2013 to 2022. The research results show that: in recent years, the constraining effect of water resource shortages on the development of northern Jiangsu has become prominent; the rising characteristics of the comprehensive evaluation index and coupling coordination degree of the regional composite system prove that the overall development is

收稿日期: 2025-05-20

基金项目: 江苏省水利科技项目(2023027)

作者简介: 刘雨桐(2001—),女,硕士研究生,研究方向为水资源规划与管理。E-mail: 952555708@qq.com

通信作者: 郑子沁(1999—),女,博士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail: zzzzq@hhu.edu.cn

moving in a positive direction, but there is still significant room for improvement in the region as a whole; the spatial distribution has formed a “saddle shaped” pattern. This study provides empirical reference for revealing the coordinated development mechanism of regional systems, verifies the scientific value of the “water determines the city” strategy in regional sustainable development, and provides theoretical basis and scientific support for regional water resource management.

Key words: water resources; socioeconomic; ecological environment; coupling coordination; northern Jiangsu

近年来,“耦合”与“协调”理念在自然科学、社会科学及人文科学等诸多学科领域内得到普遍应用,系统耦合协调发展的相关研究也日益成为学术热点,尤其在水利领域的研究已渐趋完善。水资源在促进经济社会进步与维护生态环境平衡方面扮演着关键角色,而水资源匮乏和生态环境脆弱等挑战在一定程度上阻碍了经济的高质量发展进程。鉴于此,确保水资源、社会经济和生态环境的协调发展是重中之重。深入探究水资源复合系统内“水资源-社会经济-生态环境”三者相互影响与作用的互馈规律^[1],对于推动该系统的协调与可持续发展具有不可忽视的现实价值。

张凤太等^[2]通过主观和客观综合权重法赋权,构建了贵州省2000—2011年水资源-经济-生态环境-社会复合系统综合评价模型,分析其耦合协调度。张文睿等^[3]基于修正耦合协调度模型,计算河西走廊2006—2021年经济-水资源-生态三大系统的耦合协调状况。张恬姿等^[4]为推进甘肃省水资源、经济社会和生态环境三者之间的复杂耦合协调,采用耦合协调度模型测算分析了2010—2019年的耦合协调度演变特征。刘丙军等^[5]选取广东省为研究区域,结合1980—2017年数据运用相对色散系数法和耦合函数法水资源-社会经济复合系统的协同竞争关系进行评价,并计算了系统的耦合协调度。白美霞等^[6]对青海省水资源-社会经济-环境复合系统同时运用耦合协调模型及灰色关联模型分别进行2000—2020年定量的耦合协调特征评价。贾晴雯等^[7]为探究水生态环境和社会经济发展之间的矛盾,选取江苏省13个市运用耦合协调模型进行综合探究,得到两个系统之间的协调发展度,为实现区域的可持续发展提供参考。以上研究表明,基于水资源因素的耦合协调模型在研究区域规律方面具有一定优势^[8],构建适合地区特点的指标体系和评价模型能够更好地应用此方法。

由于苏北地区地处我国东部沿海经济带与长江经济带的交汇之处,是我国区域开发战略的重要基地。在水资源短缺与需求不断增长的背景下,如

何平衡水资源利用、社会发展与生态保护的关系,成为亟待解决的课题。因此开展“水资源-社会经济-生态环境”复合系统协调发展研究能够为苏北地区及江苏省的可持续发展规划提供理论参考和决策支持。

1 研究区概况及数据来源

苏北地区(31°38'~35°07'N,116°22'~121°55'E)地处华东腹地,是中国东部沿海经济带的重要组成部分,内辖徐州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、泰州和宿迁8市,总面积约为7.6万km²。苏北地区多年平均水资源总量为273.08亿m³,其中多年平均地表水资源量为200.79亿m³。到2022年末苏北地区常住人口为4666.91万人,其中城镇人口为3151.42万人,占比为67.4%,区域内城市众多,人口密集,城市化进程迅速。苏北地区经济水平较高,2022年实现地区生产总值为53283.4亿元,占江苏省43.4%。

本研究数据资料主要来源于2013—2022年间的《江苏省统计年鉴》《江苏省水资源公报》《中国城市统计年鉴》以及各市的水资源公报和统计年鉴。对于极个别缺失的数据,运用数理统计方法插值补全。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

2.1.1 评价指标选取

水资源、社会经济、生态环境三大子系统具有各自的特性,但系统之间又存在着协作和制约的关系。在对苏北地区复合系统耦合协调度进行分析研究时,为全面真实地反应相关情况,在参考其他研究的基础上^[9],考虑研究区的实际特征和现有资料的完整性,构建了复合系统评价指标体系。评价指标体系分为目标层、准则层、指标层。目标层为“复合系统耦合协调发展研究”;标准层涵盖“水资源子系统”、“社会经济子系统”和“生态环境子系统”3个;指标层共有33项指标。

2.1.2 指标体系数据处理

为保障各指标间即便单位与量级不同仍具备横向可比性,对数据实施标准化处理。设样本j的第i项指标观测值为 x_{ij} ,标准化处理后结果记为 Z_{ij} 。针对正向指标(数值越大越优)与逆向指标(数值越小越优),分别采用以下标准化公式:

正向指标:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

逆向指标:

$$Z_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

式中, $x_{j\min}$ 是样本最小值, $x_{j\max}$ 是样本最大值。

2.1.3 评价指标筛选

主成分分析的核心在于通过降维技术实现指标筛选。具体计算步骤如下:

设子系统包含n个要素指标,记为 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)^T$,将m年的指标数据整合为矩阵X:

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \dots & X_{1,m} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{n,1} & \dots & X_{n,m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

计算矩阵X的相关系数矩阵,公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (X_{ki} - \bar{x}_i) (X_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (X_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4)$$

式中, r_{ij} 为标准化后第i项和第j项要素指标的相关系数,整理所有的 r_{ij} 之后得到相关矩阵R。

随后,求解相关系数矩阵的特征值及特征向量,并计算各特征值对应的方差贡献率与累计贡献率。在筛选主成分因子时,选取特征值大于1的变量,并确保累计方差贡献率超过75%,从而获得前p项主成分的原始数据,这些变量即为所选要素指标。依据主成分因子进行指标筛选前,需通过KMO值检验(KMO值>0.6)与巴特莱特球度检验。若未通过,则表明初步筛选的要素指标中存在与其他同类型指标相关性过高或过低的情况,需应用相关性统计分析方法剔除部分指标后重新检验,直至通过检验。最终重新构建苏北地区复合系统耦合协调度研究评价指标体系,见表1。

2.3 指标权重模型

各指标权重的确定是构建复合系统指标体系的另一核心环节。

表1 苏北地区复合系统最终评价指标体系

目标层	准则层	序号	指标	正逆向	
水资源子系统		C1	人均水资源量	正	
		C2	地表水资源量	正	
		C3	年降水量	正	
		C4	水资源总量	正	
		C5	用水量	逆	
		C6	农业用水量	逆	
		C7	产水系数	正	
水资源复合系统		C8	人均GDP	正	
		C9	第二产业产值占比	正	
		社会经济子系统	C10	人口总数	正
			C11	城镇化率	正
			C12	人口自然增长率	正
		C13	人口密度	正	
		C14	万元工业增加值用水量	逆	
C15	万元GDP耗水量	逆			
生态环境子系统		C16	人均公园绿地面积	正	
		C17	建成区绿化覆盖率	正	
		C18	工业固体废弃物产生量	逆	
		C19	化学需氧量排放量	逆	
		C20	城市污水处理率	正	

2.3.1 模糊层析分析法

模糊层次分析法是对传统层次分析法的改进。对同一层次的指标进行两两比较,据表2所示标度法量化比较结果。

表2 层次分析法标度含义

重要性标度	含义(a_{ij} ,i为前项指标,j为后项指标)
0.5	i和j同等重要
0.6	i比j稍微重要
0.7	i比j明显重要
0.8	i比j极其重要
0.9	i比j绝对重要
0.1,0.2,0.3,0.4	上述标度的反向比较

构造的判断矩阵满足:

$$A = (a_{ij})_{m \times n} \quad (5)$$

$$0 < a_{ij} < 1, a_{ii} = 0.5, a_{ij} + a_{ji} = 1(i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

对判断矩阵进行标准化处理,按行求和并再次标准化,得到权重向量 ω_j ,构建模糊一致性矩阵:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (7)$$

$$\bar{W}_j = \sum_{j=1}^m \bar{a}_{ij} \quad (8)$$

$$\omega_j = \frac{\bar{W}_j}{\sum_{j=1}^m \bar{W}_j} \quad (9)$$

2.3.2 熵权法

熵权法通过度量系统无序度来量化指标离散程度。指标的信息熵越小,离散度越大,对综合评价的影响越显著。根据归一化后的数据计算第*i*年第*j*项指标的熵值 H_j :

$$H_j = -K \sum_{i=1}^n (F_{ij} \ln F_{ij}) \quad (10)$$

$$F_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad (11)$$

式中: K 为常数, $K=1/\ln n > 0$; $\ln F_{ij}$ 为第*i*年第*j*项指标所占的比重。

其次计算第*j*项指标的信息效用值 D_j :

$$D_j = 1 - H_j \quad (12)$$

最后计算第*j*项指标的熵值权重 W_j :

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (13)$$

2.3.3 组合权重

在权重计算中,采用博弈论思想融合模糊层次分析法与熵权法,假定模糊层次分析法和熵权法得到的权重向量集 $W = \{W_1, W_2\}$,基于线性组合系数为 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2\}$,则 W^* 满足:

$$W^* = \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T \quad (14)$$

以 W^* 与各权重向量的离差最小化为目标,优化线性组合系数。

$$\min \left\| \sum_{k=1}^n \alpha_k \omega_k^T - W_k^T \right\|, k=1,2 \quad (15)$$

按照矩阵微分性质,求解上式变化成的最优一阶导数矩阵得到最优组合系数值 α 并归一化。

$$\begin{vmatrix} W_1 W_1^T & W_2 W_1^T \\ W_2 W_1^T & W_2 W_2^T \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} W_1 W_1^T \\ W_2 W_2^T \end{vmatrix} \quad (16)$$

$$\alpha_k^* = \frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^2 \alpha_k} \quad (17)$$

此时考虑主观和客观两种权重计算方法均具有一致的重要性,分别取 $\alpha_1^* = 0.5, \alpha_2^* = 0.5$,计算得到

最终的组合权重。

$$W^* = \alpha_1^* W_1^T + \alpha_2^* W_2^T \quad (18)$$

2.4 耦合协调度评价模型

本研究引入耦合协调度模型,以定量评估区域复合系统的协调特征。首先需分别计算水资源、社会经济、生态环境三大子系统的综合评价指数— $f(x)$ 、 $g(y)$ 、 $h(z)$,其计算公式为

$$\begin{cases} f(x) = \sum_{i=1}^m x_i^* \omega_i^f \\ g(y) = \sum_{i=1}^m y_i^* \omega_i^g \\ h(z) = \sum_{i=1}^p z_i^* \omega_i^h \end{cases} \quad (19)$$

式中: x_i^* 、 y_i^* 、 z_i^* 分别为子系统中各评价指标的标准化值; ω_i^f 、 ω_i^g 、 ω_i^h 分别为子系统中各评价指标的权重; m 、 n 、 p 分别为子系统中评价指标的个数,本研究中确定 $m=7, n=8, p=5$ 。

基于综合评价指数的计算结果,进一步构建系统耦合协调度模型,量化区域复合系统的协调发展水平。模型相关具体计算公式如下:

$$C = \sqrt[3]{\frac{f(x)g(y)h(z)}{[f(x)+g(y)+h(z)]/3}} \quad (20)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (21)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) + \gamma h(z) \quad (22)$$

式中: C 为耦合度; D 为耦合协调度; T 为综合评价指数; α 、 β 、 γ 均为待定系数,鉴于水资源子系统是社会经济与生态环境子系统相互作用的核心纽带,设定参数为: $\alpha=0.4, \beta=0.3, \gamma=0.3$ 。

据耦合协调度结果可划分为不同等级(表3),以评估复合系统的耦合协调发展阶段和类型。

表3 耦合协调度评价等级标准

发展阶段	耦合协调度	协调类型
发展失调阶段	0~0.09	极度失调衰退
	0.10~0.19	严重失调衰退
	0.20~0.29	中度失调衰退
过渡阶段	0.30~0.39	轻度失调衰退
	0.40~0.49	濒临失调衰退
	0.50~0.59	勉强失调衰退
协调发展阶段	0.60~0.69	初级协调耦合
	0.70~0.79	中级协调耦合
	0.80~0.89	良好协调耦合
	0.90~1.00	优质协调耦合

3 结果与分析

3.1 发展水平分析

复合系统的综合评价指数反映了系统整体的发展状态。苏北地区整体来看,2013—2022年复合系统及各子系统的综合评价指数变化如图1所示。

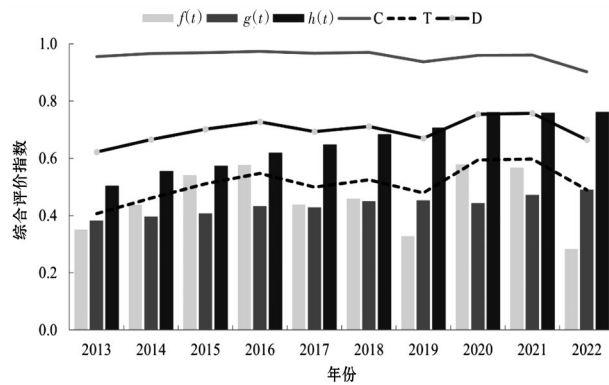


图1 苏北地区水资源-社会经济-生态环境复合系统综合评价指数

结果显示,复合系统综合评价指数变化整体上呈略有波动的上升变化,表明区域综合发展水平随着时间演变而提高,总体有着向较高水平状态发展的趋势,而且结果显示区域水资源子系统发展现阶段虽然存在波动的变化,但整体上稍显滞后于社会经济子系统和生态环境子系统,可见水资源短缺对社会经济发展和生态环境保护的制约作用显著。

3.2 耦合协调发展分析

根据图1所示,10年间苏北地区复合系统的耦合度总体保持平稳,均处于“高水平耦合”阶段,但存在小范围的上下波动现象,数值波动范围为0.85~0.99,并非稳定提升,水资源的利用与管理仍需协调。

根据苏北8市复合系统耦合协调度的时空分布图(图2),得到10年间苏北地区8个地级市的复合系统耦合协调度整体呈现出稍有波动的缓慢上升趋势,且全过程耦合协调值处于0.6~0.8之间。说明苏北地区全域10年间均处于协调发展阶段,随着时间演变发展趋向更佳。但各市不同年份的耦合协调度介于0.53~0.80之间,其协调等级覆盖勉强失调衰退、初级协调耦合和中级协调耦合3个状态,处于较低的耦合协调水平,因此具有一定的上升空间,需调整发展模式或管理手段,推动水资源、社会经济和生态环境三者长久稳定地进步。空间上,苏北地区复合系统的耦合协调度呈现出中间区域较差,

而西北和东南地区呈现更好的“鞍型”分布特征。经过10年的发展,区域复合系统的耦合协调度并不是完全提升的,在某些年份之间也存在轻微的下滑。造成这一现象的原因可能是水资源子系统的供需矛盾直接限制了社会经济的发展和生态环境的改善,说明单靠社会经济和生态环境的提升并不能有效提升其耦合协调能力,也说明了水资源是当前阶段区域发展的关键。上述对于区域协调发展的分析为水资源管理提供了系统和全新的视角,能够更加深入提高可持续发展水平。

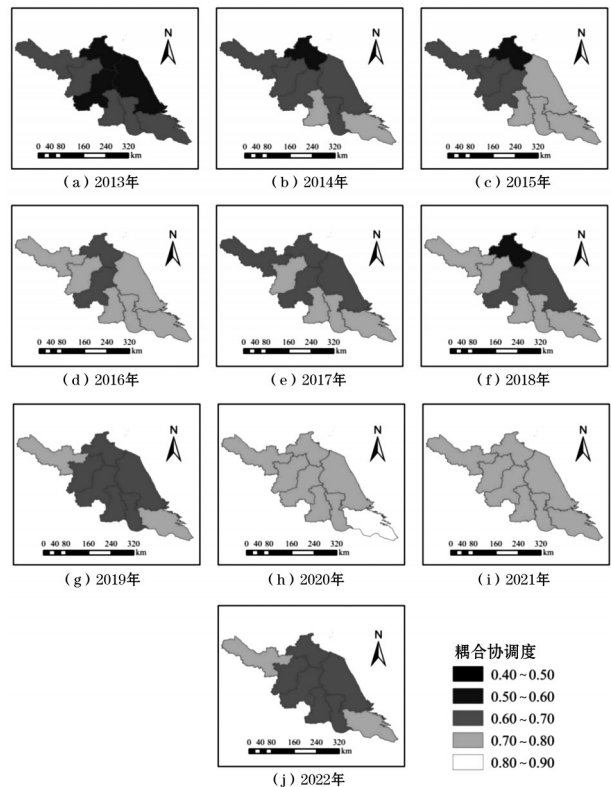


图2 苏北地区水资源-社会经济-生态环境复合系统耦合协调度

4 结论

本文基于苏北地区发展现状,构建了区域2013—2022年水资源-社会经济-生态环境复合系统的耦合协调度评价模型,对综合发展状况和系统耦合协调度进行了综合测算和分析。相较于传统研究,本研究成果能更加全面和多维地反映区域之间的均衡发展状况,对促进各地区多系统的协调发展具有指导作用。本研究主要结论如下:(1)苏北地区2013—2022年复合系统综合评价指数整体虽偶有上下起伏但大致呈现平稳缓慢的上升趋势,表

明区域总体往好的方向发展,但近年来水资源对社会经济和生态环境的发展呈现出制约作用;(2)苏北地区复合系统的耦合协调度10年间整体呈现增长趋势,尽管苏北地区总体协调发展水平呈现上升态势,但与高层次协调发展目标仍存在差距,亟待进一步优化提升。空间上,各市发展速度存在一定差异,耦合协调度呈现出东南和西北地区较高,而中间区域较低的格局。

综上,在苏北地区“水资源-社会经济-生态环境”复合系统中,水资源系统对整体运行发挥着核心驱动作用,需依托科技手段进行水资源策略优化,构建与社会经济发展及生态环境保护协调适配的水资源配置体系,以提升区域多系统的耦合协调发展水平。

参考文献:

- [1] 唐家凯. 沿黄河九省区水资源承载力评价与障碍因素研究[D]. 兰州:兰州大学,2021.
[2] 张凤太,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.

- [3] 张文睿,孙栋元,王亦可,等. 河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合关系及时空分异[J]. 干旱区研究,2024,41(9):1527-1537.
[4] 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]. 水利水运工程学报,2023(2):53-63.
[5] 刘丙军,黄睿,于海霞,等. 广东省社会经济-水资源复合系统协调度评价[J]. 人民珠江,2020,41(5):38-42.
[6] 白美霞,王高旭,张轩,等. 青海省水资源-环境-社会经济系统耦合协调特征[J]. 人民黄河,2023,45(4):70-75,91.
[7] 贾晴雯,董增川,朱圣男,等. 江苏省水生态与经济耦合协调度评价[J]. 水利经济,2022,40(3):42-47,94.
[8] 刘科,韩路,范聪喆. 关中地区水资源-社会经济-生态系统耦合协调发展评价[J]. 水利建设与管理,2023,43(11):6-12,16.
[9] 苏莹,董增川,崔璨,等. 湖南省“水资源-经济社会-生态环境”耦合系统协调发展评价[J]. 中国农村水利水电,2023(7):63-73.

(上接第42页)

物。其中高淳项目区TN、COD_{Mn}去除率约20%~40%,TP、悬浮物的去除率超过50%,泗洪项目实施前养殖尾水水质情况是: $\rho(\text{TN})=4.3\text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{TP})=0.56\text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})=17.84\text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{SS})=79\text{ mg/L}$,项目实施后养殖尾水水质情况是: $\rho(\text{TN})=3\text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{TP})=0.4\text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})=15\text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{SS})=40\text{ mg/L}$,处理后水质均可满足《淡水池塘养殖尾水排放限值》(DB32/4043)一级排放限值。经测算,泗洪项目区年削减污染物TN 10.1 t,TP 1.2 t,高锰酸盐指数22 t,悬浮物302.4 t。

4 结 语

应用养殖池塘原位及异位净化技术,构建适用于平原圩区的“沉淀区-过滤坝-曝气区-过滤坝-生物净化区-过滤坝-洁水区”的养殖尾水生态净化体系,有效提高了水资源利用率,节约农业用水,削减氮磷等污染物排放,有效控制了面源污染,实现尾水达标排放,保障省国考断面水质。通过物联网智

能化建设,实现水产养殖监测数据的实时采集、实时通信及精准分析,以及水产养殖管理的智能化、移动化,促进水产养殖的信息化水平进一步提高,为精准分析和研判水产运行状态、防范和化解生产风险以及保证产品质量提供有力保障。

参考文献:

- [1] 陈义浦,高健,王宁. 生态化岸坡在圩区河道治理工程中的应用与探讨[J]. 江苏水利,2024(8):17-21.
[2] 付龙龙,潘建林. 2021年江苏河蟹产业存在的主要问题与2022年应对策略[J]. 科学养鱼,2022(4):1-2.
[3] 林连升,缪为民,袁新华,等. 沉水植物在池塘养殖生态系统中的水质改良作用[J]. 水产科学,2005,24(12):45-47.
[4] 聂司宇,孟昊,李婷婷,等. 水生植物对富营养化水体中氮磷去除的研究进展[J]. 环境保护与循环经济,2020,40(4):47-51
[5] 刘梅,原居林,倪蒙,等. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报,2021,11(1):97-106.