

周莹, 方红远, 陆泰戈, 等. 基于耦合协调性的区域洪水资源利用评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 884-895. ZHOU Y, FANG H Y, LU T G, et al. Evaluation of regional floodwater resource utilization based on coupling coordination[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 884-895. (in Chinese)

## 基于耦合协调性的区域洪水资源利用评价

周莹, 方红远, 陆泰戈, 刘楠楠

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 为全面理解和优化区域水资源利用格局、提高区域水资源利用率, 以南水北调东线工程江苏段主要涉及的徐州、宿迁、淮安3个城市为研究对象, 以2010—2022年数据为基础从基于洪水资源开发利用的水资源利用、经济社会发展、生态环境保护3个维度, 采用共23项指标在使用熵权法确定权重的基础上, 构建基于洪水资源开发利用的水资源利用-经济社会-生态环境系统容量耦合协调发展模型, 并结合匹配度模型进行比较分析, 运用障碍度模型分析影响耦合协调发展的因素。结果表明: 3个城市的综合系统发展水平均由初级阶段上升到良好阶段。徐州、宿迁和淮安市的耦合协调度变化分别为勉强协调到良好协调、初级协调到良好协调以及初级协调到中级协调, 而3个城市耦合协调度在后期均超越匹配度, 达到理想协调状态。影响协调度的主要障碍因子为洪水资源利用潜力、森林覆盖率以及洪水资源量, 且对于3个系统的障碍度分析, 3个城市各自有不同的主导影响因素, 徐州市复合系统耦合协调度主要受水资源利用影响较大, 宿迁市受经济社会影响较大, 而淮安市则受生态环境影响较大, 因此, 各市应当合理利用水库及蓄滞洪区的削峰、调蓄能力, 增加洪水资源可利用量, 提高洪水资源利用效率, 降低洪灾发生频率, 在保证经济和生态用水效率的同时, 减少因洪灾带来的经济及生态损失。

**关键词:** 洪水资源利用; 耦合协调发展; 评价模型; 南水北调东线工程江苏段

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0088

水资源利用包括常规水资源利用与非常规水资源利用, 常规水资源包括地表水资源与地下水资源, 非常规水资源包括处理后可以利用或在一定条件下可直接利用的再生水、集蓄雨水、淡化海水、微咸水、矿坑水等, 其中汛期洪水资源利用一般属于非常规水资源利用。洪水资源利用是指通过优化水利工程的运行方式, 将部分洪水转化为可利用的水资源, 适时适地提供维持区域经济社会发展和生态环境良性循环所需的水量, 是水资源“开源”的重要措施和现实选择<sup>[1]</sup>。作为南水北调工程的重要组成部分, 南水北调东线工程江苏段承载着重要的水资源输送任务。该段以京杭运河为输水线, 以洪泽湖、骆马湖、南四湖作为沿线主要调蓄水库, 逐级提水北上, 而微山湖(下级湖)-骆马湖-洪泽湖区段作为下游水体的承载者, 扮演着连接南水北调资源的纽带角色。在这一地区, 水资源的高效利用、经济

社会的可持续发展以及生态环境的保护成为亟待解决的问题。系统耦合协调度研究, 作为全面理解和优化区域水资源利用格局的手段, 提高区域水资源利用率, 对于实现区域内水资源的可持续开发与利用具有重要的现实意义。

国内外学者对此也展开了深度的研究。针对洪水资源利用的概念: 王宗志等<sup>[2]</sup>从洪水资源利用概念形成与流域水量平衡方程出发, 建立了流域洪水资源利用的定义和概念性模型, 指出洪水资源利用的本质是风险与效益的博弈; 刘友春等<sup>[3]</sup>分析了山东淮河流域洪水资源利用可行性, 强调其平衡供需、优化经济运行、提升保障能力的必要性。针对系统耦合协调模型, 水资源利用系统常与经济<sup>[4-5]</sup>、社会发展<sup>[6-7]</sup>、环境<sup>[8-9]</sup>、城市化<sup>[10-11]</sup>、人口<sup>[12-13]</sup>、农业<sup>[14-15]</sup>、工业<sup>[16-17]</sup>等系统进行耦合协调分析。多数研究者都以二元及三元耦合协调度模型研究为主, 目前耦合

收稿日期: 2024-03-31 修回日期: 2024-09-15 网络出版时间: 2024-09-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240924.1702.006>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379027); 江苏省水利科技项目(2021050)

作者简介: 周莹(2000—), 女, 江苏南京人, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: 452774102@qq.com

通信作者: 方红远(1963—), 男, 江苏溧水人, 教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: hyfang@yzu.edu.cn

维度最高的为六元耦合<sup>[18]</sup>。关于匹配度模型:张国立等<sup>[19]</sup>利用基尼系数和不平衡指数分析了中国水资源分布与经济发展匹配度;张晓涛等<sup>[20]</sup>对黄河流域各行政区经济发展与水资源利用的匹配情况进行了分析;张吉辉等<sup>[21]</sup>以水资源分布和配置相关数据为基础,对水资源与经济发展要素的匹配演变规律进行了分析。

因此,本文的成果:一是从发展水平角度来探究基于洪水资源开发利用的水资源利用-经济社会-生态环境系统(the system of water utilisation system based on flood resource exploitation and utilisation, socialeconomy, ecological environment, WSE)的综合发展水平;二是将每个分区的各个系统进行耦合协调,得到各个分区的耦合协调度,并与各分区匹配度进行对比分析;三是通过障碍度模型识别出主要的障碍因子,找出WSE系统耦合协调性的主要影响因素。本研究的目标在于全面了解研究区的洪水资源综合利用情况,分析区域系统中各个要素之间的相互关系,为未来区域水资源的科学管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

南水北调东线工程江苏段是整个东线工程的关键性组成部分,其沿线众多湖库、闸站、水利工程及其运行管理策略对安全、可靠调水起着重要作用。微山湖(下级湖)-骆马湖-洪泽湖区段(域)是南水北调东线工程江苏段的重要一环,微山湖(下级湖)虽行政上属山东省管辖,但作为南水北调东线工程的重要调蓄湖泊,对江苏段及整个工程具有关键作用。其库容能有效调节水量,平衡区域水资源需求,确保南水北调东线工程稳定运行。将研究区确定为这一区段所涉及的江苏省的3个城市级区域:徐州市、宿迁市以及淮安市。研究区地形起伏较小,主要为丘陵、平原和河湖交织的地貌,湖泊分布广泛,形成了丰富的水系,为该区域水资源集蓄与调控提供了良好的客观基础。

该区段位于江苏省徐淮北部地区,水资源短缺造成的供需矛盾依然比较突出,干旱缺水现象较严重且频繁发生,已成为该地区经济社会可持续发展的主要制约因素之一。季风气候特征使得本区域地表水资源量的70%以上表现为每年的汛期洪水,从这一意义上说,该区域当地水资源利用率的提高很大程度上将取决于汛期洪水资源的利用。区域

内长期的水利工程建设,使以水库(群)、闸涵枢纽、分蓄洪河道、蓄洪洼地(蓄滞洪区)等构成的区域防洪工程体系业已形成,且调控洪水的工程格局将在一定时期内相对稳定。因此,聚焦洪水资源利用分析,能够揭示区域水资源利用的特殊性和地域特征,为增强区域供水能力和水资源开发利用管理提供决策参考。

## 2 分区洪水资源利用量化计算

根据徐州市、宿迁市和淮安市的《水资源公报》可知,徐州市和宿迁市汛期为每年5—9月,淮安市汛期为每年6—9月,洪水资源量化计算根据各区汛期水量进行计算。

### 2.1 洪水资源量

洪水资源量的定义,现发表的多数文献将其表示为一定区域由当地降水形成的天然河川洪水径流量<sup>[22-23]</sup>,有文献<sup>[24]</sup>定义为当某时段区域产出水量超过该时段多年平均天然径流量一定数量时,考虑将超过的水量记为有利用潜力的洪水资源量。本文根据文献<sup>[25-26]</sup>将洪水资源量定义为洪水期区域入境水量加上本地降雨的产水量。洪水资源量的计算公式为

$$W_F = W_R + W_{in} = \int_{t_0}^{t_1} Q_1(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} Q_2(t) dt \quad (1)$$

式中: $W_F$ 为洪水资源量,亿 $m^3$ ;  $W_R$ 为洪水期降雨产水量,亿 $m^3$ ;  $W_{in}$ 为洪水期区域入境水量,亿 $m^3$ ;  $t_0$ 和 $t_1$ 表示洪水期的开始与结束时间,s;  $Q_1(t)$ 表示洪水期本地降雨的产水流量;  $Q_2(t)$ 表示洪水期区域入境流量,亿 $m^3$ 。

### 2.2 洪水资源可利用量

洪水资源可利用量是指在确保区域防洪安全的前提下能够调控并有效利用的洪水资源的最大量。本文采取扣除法进行计算,由不可利用量间接得出。包括受调控利用能力限制而无法利用的量,称为不可控洪水资源量<sup>[27]</sup>以及为满足下游生态需水而不得利用的量<sup>[28]</sup>。其公式为

$$W_{FU} = W_F - W_{out} \quad (2)$$

式中: $W_{FU}$ 为洪水资源实际利用量,亿 $m^3$ ;  $W_{out}$ 为洪水期区域出境水量,亿 $m^3$ 。

$$W_{nu} = \max(W_F - W_0, 0) \quad (3)$$

式中: $W_{nu}$ 为不可控洪水资源量,亿 $m^3$ ;  $W_0$ 表示所选取的研究年份中洪水资源实际利用量的较大值,计算时取 $(W_F - W_0)$ 和0的外包,亿 $m^3$ 。

$$W_N = \max(W_{nu}, W_{FE}) = \max(W_{nu}, \alpha W_{FA}) \quad (4)$$

式中:  $W_N$ 为洪水资源不可利用量, 亿  $m^3$ , 计算时取最小月平均径流量;  $W_{FE}$ 为下游生态需水量;  $W_{FA}$ 为多年平均洪水资源量, 亿  $m^3$ , 选取 2010—2022 年洪水资源量平均值。

$$W_A = W_F - f(W_{nu}, W_N) \quad (5)$$

式中:  $W_A$ 为洪水资源可利用量, 亿  $m^3$ ;  $f(W_{nu}, W_N)$ 为与调控利用能力对应的区域洪水资源不可利用量, 亿  $m^3$ , 计算时取  $W_{nu}$ 和  $W_N$ 的外包, 一般用  $\max(W_{nu}, W_N)$ 表示。

### 2.3 洪水资源利用潜力

洪水资源利用潜力为在满足区域防洪安全以及下游生态需水量的前提下, 通过经济合理、技术可行的措施, 能够进一步开发和利用的最大洪水径流量<sup>[29]</sup>, 计算公式为

$$W_P = W_A - W_{FU} \quad (6)$$

式中:  $W_P$ 为区域洪水资源利用潜力, 亿  $m^3$ 。若  $W_P > 0$ , 则说明区域洪水资源还有进一步开发利用的空间, 可以通过合理地调蓄洪水, 增加洪水资源可利用量;  $W_A$ 为洪水资源可利用量, 亿  $m^3$ ;  $W_{FU}$ 为洪

水资源实际利用量, 亿  $m^3$ 。

$$\omega = \frac{W_{FU}}{W_F} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $\omega$ 为区域洪水资源利用率, %;  $W_{FU}$ 为洪水资源实际利用量, 亿  $m^3$ ;  $W_F$ 为洪水资源量, 亿  $m^3$ 。

### 2.4 洪水资源利用量化结果分析

根据前述相关洪水资源利用量、利用潜力等计算原则可获得研究区相应计算成果, 见图 1、图 2。从图 1 可以看出: 徐州市多年平均洪水资源量为 39.20 亿  $m^3$ , 平均利用率为 39.5%; 宿迁市平均洪水资源量 257.04 亿  $m^3$ , 平均利用率为 11.0%; 淮安市平均洪水资源量为 221.71 亿  $m^3$ , 平均利用率为 14.8%。洪水资源利用率与洪水资源总量有一定的关联性, 可用洪水资源量的偏少反而促进了其洪水资源利用率的提高。徐州市洪水资源总量较少, 但洪水资源实际利用量占资源总量的比例较高, 而宿迁和淮安市虽然洪水资源总量多, 但利用量却不多, 因此 2 个城市更应该在开发洪水资源利用潜力的基础上加强洪水资源的科学调度和管理, 优化资源配置, 最大化利用洪水资源。

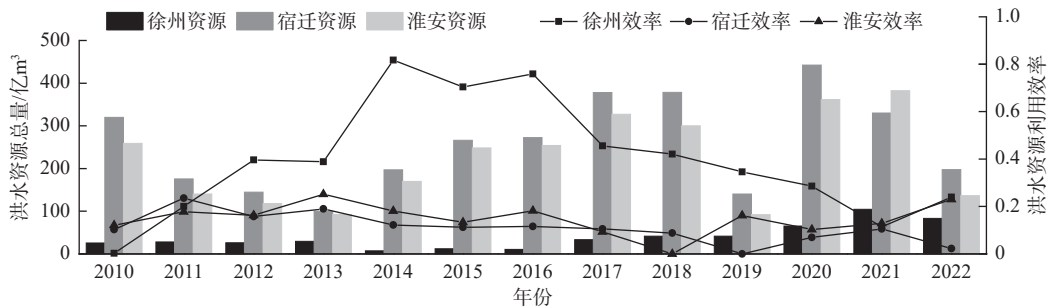


图 1 洪水资源总量、利用效率的关系

Fig. 1 Relationship between total flood resources, utilization efficiency

通过图 2 可以看出, 2010—2022 年徐州市, 洪水资源平均利用量约 11.40 亿  $m^3$ , 宿迁市平均利用量 26.50 亿  $m^3$ , 淮安市平均利用量 28.61 亿  $m^3$ , 3 个城市合计平均利用量达 66.52 亿  $m^3$ , 总利用潜力 40.70 亿  $m^3$ 。2019 年利用潜力最大, 达 79.63 亿  $m^3$ 。通过对宿迁市、淮安市与徐州市的洪水资源利用状况进行综合分析, 发现宿迁市和淮安市的洪水资源利用量及其利用潜力均显著高于徐州市, 显示出 2 个城市洪水资源管理和利用的巨大潜力和改进空间。但想要提升洪水资源利用效率, 不仅要从洪水资源本身出发, 更要结合各城市经济社会和生态环境状况进行合理分析规划, 做到在提

高洪水资源利用效率的同时加强城市经济社会发展以及生态环境保护, 以达到三者互利共进的局。

### 3 耦合协调性研究方法及模型

依据耦合协调发展原理, 对研究区各分区的基于洪水资源开发利用的水资源利用与经济社会发展及生态环境维护间的耦合协调发展状况进行评价分析。经济社会和生态环境指标数据主要来源于各城市统计年鉴、国家统计局数据库、水资源公报等, 洪水资源利用相关数据主要是通过前述计算以及水资源公报等途径获取。

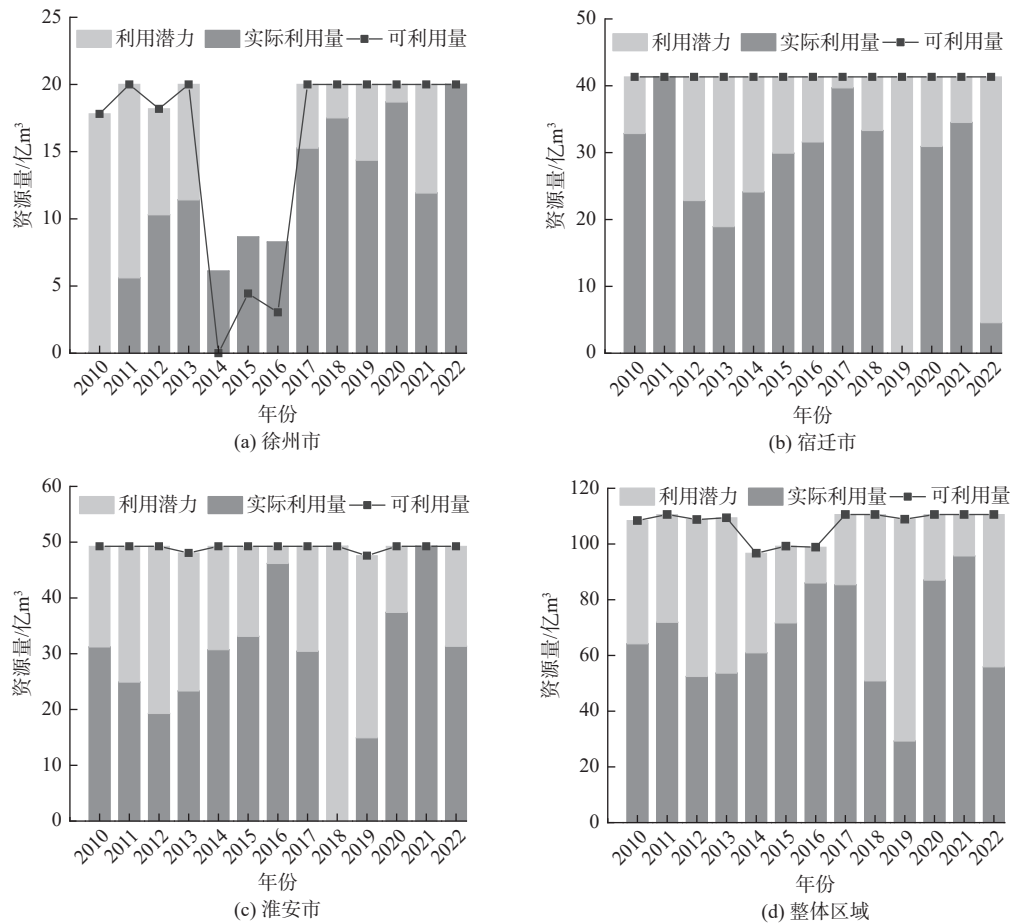


图2 洪水资源实际利用量、可利用量以及利用潜力的关系

Fig. 2 Relationship between actual utilization, availability and potential utilization of flood resources

### 3.1 指标体系构建

根据前述洪水资源利用量化计算成果、区域水资源利用状况以及经济社会、生态环境发展等相关数据的统计,可以构建各分区基于洪水资源开发利用的水资源利用系统(简称水资源利用系统,下同)与经济社会发展系统及生态环境维护系统三者间的WSE系统评价指标体系,见表1。

### 3.2 耦合协调度评价分析

#### 3.2.1 改进的可调功效函数

功效函数是根据多目标规划原理,参照度量标准,对评价对象的评价指标样本进行标准化处理,转化为具有可比性的功效系数<sup>[30]</sup>。传统的min-max功效函数的上下限和加权平均中的贡献权重难以确定,主观性大。此外,min-max功效函数中指标期望值与不允许值相互间是不可比的,若改进为可调功效函数<sup>[31]</sup>,则其中指标调控参数相互间则是可比的,且改进的功效函数具有归一性,计算方法如下:

$$\begin{cases} t_{i,j} = \alpha_j x_{ij} / \beta_j & \text{正功效} \\ t_{i,j} = 1 - \alpha_j x_{ij} / \beta_j & \text{负功效} \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} / n \quad (9)$$

$$\alpha_j = \beta_j / (\beta_j + x_{j,\max} - x_{j,\min} + P_j \psi_j) \quad (10)$$

$$\psi_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \beta_j)^2 / (n-1)} \quad (11)$$

式(8)~(11)中:  $t_{i,j}$ 为 $t$ 样本 $j$ 指标功效系数;  $x_{i,j}$ 为 $t$ 样本 $j$ 指标量值;  $\beta_j$ 为样本本期平均水平;  $\alpha_j$ 为 $n$ 个样本的 $j$ 指标均值功效系数;  $x_{j,\max}$ 与 $x_{j,\min}$ 为 $j$ 指标 $n$ 个样本的最大与最小值;  $\psi_j$ 为 $j$ 指标 $n$ 个样本的标准差;  $P_j$ 为指标调控参数,根据样本的变化趋势估计;  $t_{i,j} \in [0, 1]$ ;  $\alpha_j \in [0, 1]$ ;  $j=1, 2, \dots, m$ ;  $i=1, 2, \dots, n$ 。因为 $j$ 指标 $n$ 个样本的最大功效为  $\frac{\alpha_j x_{j,\max}}{\beta_j} = \frac{x_{j,\max}}{(\beta_j + x_{j,\max} - x_{j,\min} + P_j \psi_j)} \leq 1$ ,所以均值功效系数阈值为 $[0, 1]$ 。

#### 3.2.2 子系统熵值赋权法

由于所选子系统的发展程度各有不同,各子系统的贡献权重也各不相同。根据熵值赋权法的原理,使区域洪水资源利用协调发展的容量耦合度主

要取决于客观样本数据, 尽量减少主观因素的影响, 以样本均值综合功效为基础, 计算各子系统的权重, 计算公式为

$$\varphi_i = \left( \prod_{j=1}^m \alpha_j \right)^{\frac{1}{m}} \quad (12)$$

$$t_i = \varphi_i \left/ \sum_{i=1}^s \varphi_i \right. \quad (13)$$

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^s (t_i \ln t_i) \quad (14)$$

$$\omega_i = (1 - e_i) \left/ \sum_{i=1}^s (1 - e_i) \right. \quad (15)$$

式(12)~(15)中:  $\varphi_i$  为  $i$  子系统样本均值综合功效;  $t_i$  与  $e_i$  为结构比与熵值;  $\omega_i$  为  $i$  子系统的贡献权重;  $s$  为子系统数量;  $i=1, 2, \dots, s$ 。

表 1 各分区 WSE 系统协调发展评价指标体系及其均值功效

Tab. 1 The evaluation index system and mean efficiency for the coordinated development of WSE system in various regions

准则层	指标层	数据来源及计算方法	属性	均值功效系数
基于洪水资源开发利用的水资源利用系统 ( $U_1$ )	$A_1$ 常规水资源量	统计数据	+	0.486
	$A_2$ 区域水资源利用总量	统计数据	+	0.481
	$A_3$ 洪水资源量/亿 $m^3$	公式(1)计算所得	+	0.411
	$A_4$ 洪水资源实际利用量/亿 $m^3$	公式(2)计算所得	+	0.597
	$A_5$ 洪水资源利用潜力/亿 $m^3$	公式(6)计算所得	+	0.360
	$A_6$ 洪水资源利用效率/%	公式(7)计算所得	+	0.512
	$A_7$ 洪水资源量占水资源总量比值/%	洪水资源量 / 水资源总量	+	0.532
经济社会系统 ( $U_2$ )	$B_1$ 地区生产总值/亿元	统计数据	+	0.481
	$B_2$ 人均收入/元	统计数据	+	0.470
	$B_3$ 单位生产总值用水量/( $m^3 \cdot$ 万元 $^{-1}$ )	区域总用水量 / 国内生产总值	+	0.629
	$B_4$ 人均用水量/ $m^3$	区域总用水量 / 区域总人口数	+	0.489
	$B_5$ 万元工业增加值用水量/ $m^3$	工业用水量 / 工业增加值	+	0.504
	$B_6$ 农田灌溉水有效利用系数	净灌溉用水量 / 毛灌溉用水量	+	0.562
	$B_7$ 洪水灾害社会保障水平/(元 $\cdot$ 人 $^{-1}$ )	洪水灾害救助金额 / 受洪水灾害影响的人口数	+	0.497
	$B_8$ 区域排涝模数 $m^3/(s \cdot km^2)$	每平方公里排水面积的排涝流量	+	0.487
$B_9$ 区域水资源短缺率/%	(实际需水量 - 可供水量) / 实际需水量	-	0.374	
生态环境系统 ( $U_3$ )	$C_1$ 河流水系连通率/%	连通河流水系长度 / 总水系长度	+	0.337
	$C_2$ 森林覆盖率/%	森林覆盖面积 / 区域总面积	+	0.399
	$C_3$ 水功能区水质达标率/%	水功能区水质达标数量 / 水质检测总数	+	0.528
	$C_4$ 再生水利用率/%	再生水利用量 / 污水处理量	+	0.786
	$C_5$ 区域水面率/%	区域内水体的总面积 / 区域总面积	+	0.549
	$C_6$ 污径比	地表径流量 / 污水排放量	+	0.374
	$C_7$ 河道生态断面流量控制达标率/%	实际流量满足生态流量目标的次数 / 总监测次数	+	0.701

### 3.2.3 综合发展指数计算

根据熵值赋权法所求得各子系统贡献权重, 结合样本综合功效, 计算 WSE 系统的综合发展指数, 计算公式为

$$U_{t,i} = \left( \prod_{j=1}^m t_{t,j} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

$$I_t = \sum_{i=1}^n (\omega_i \times U_{t,i}) \quad (17)$$

式(16)和(17)中:  $U_{t,i}$  为评价对象  $i$  子系统  $t$  样本的综合功效,  $U_{t,i} \in [0, 1]$ ;  $I_t$  为系统在  $t$  样本处的综合调和系数, 在本文中表示各子系统综合发展指数。

将综合发展指数等级划分为 5 大类, 评价等级划分见表 2。

表 2 综合发展水平分类体系及判别标准

Tab. 2 Comprehensive development level classification system and discrimination standards

发展水平指数	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1]
发展水平阶段	落后阶段	初始阶段	提升阶段	良好阶段	饱和阶段

### 3.2.4 容量耦合协调度计算

耦合协调度模型用于分析事物的协调发展水平。

所采用的容量耦合度计算公式为

$$C_t = \left[ \frac{\prod_{i=1}^3 U_{t,i}}{\prod_{i \neq k}^3 (U_{t,i} + U_{t,k})} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

耦合协调度计算公式为

$$D_t = (I_t \times C_t)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

式(18)和(19)中:  $D_t$ 为水资源利用、经济社会和生态环境 3 个系统的耦合协调度;  $C_t$ 为系统在  $t$  样本处的容量耦合度,  $C_t \in [0, 1]$ ;  $I_t$ 为系统在  $t$  样本处的耦合协调度,  $I_t \in [0, 1]$ 。

根据已有研究成果<sup>[32]</sup>,将耦合协调度等级划分为 10 小类进行评价,见表 3。

表 3 耦合协调发展分类体系及判别标准

Tab. 3 The classification system and criteria for evaluating coupled and coordinated development

区间	协调发展度	级别	区间	协调发展度	级别
[0,0.1)	极度失调衰退类	1级	[0.5,0.6)	勉强协调发展类	6级
[0.1,0.2)	严重失调衰退类	2级	[0.6,0.7)	初级协调发展类	7级
[0.2,0.3)	中度失调衰退类	3级	[0.7,0.8)	中级协调发展类	8级
[0.3,0.4)	轻度失调衰退类	4级	[0.8,0.9)	良好协调发展类	9级
[0.4,0.5)	濒临失调衰退类	5级	[0.9,1.0]	优质协调发展类	10级

### 3.3 匹配度研究方法及模型

匹配度通常指的是在理论层面上不同因素或系统之间的理想协同关系,它代表了理论上短期期望达到的最佳状态或目标。在水资源利用、经济社会和生态环境三者的关系中,匹配度高意味着理论上这三者之间的相互作用和相互影响是协调、互补的,能够实现整体的最优效果。耦合协调性是一个更侧重于实际运作和交互过程的概念,它反映了系统长期在实际环境中的适应性和稳定性。因此匹配度一般是短期的、理想的,而耦合协调度更偏向于长期的、实际的。2 个模型比较分析能更广泛更全面地对系统的协调性进行评价。

在处理关于水资源利用、经济社会发展与生态

环境之间匹配度的计算时,基于数列匹配度计算方法,针对每个研究单元(共  $K$  个),利用各自  $X$  与  $Y$  值的数据对  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ ,通过特定的匹配度计算公式,定量评估这三者之间的协调程度。随后,将这一匹配度结果与耦合协调度计算结果进行对比分析,以更全面地揭示三者间的互馈关系及潜在的不平衡问题<sup>[33]</sup>。

$$a_i = 1 - \frac{|w_i - v_i|}{\max(w_k, v_k) - \min(w_k, v_k)} \quad (20)$$

其中:

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^k x_i}, \quad v_i = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{\sum_{i=1}^k y_i} \quad (21)$$

式(20)和(21)中:  $a_i$ 为计算单元  $i$  在数值排序占比法下的匹配度,  $a_i \in (0, 1)$ ;  $w_i$ 为计算单元  $i$  对应要素  $X$  进行升序排列后数值占比;  $v_i$ 为计算单元  $i$  对应要素  $Y$  进行升序排列后的数值占比。按照常规评判准则,匹配度值域设定在 0~1,数值愈趋近于 1,则代表所考察要素之间的匹配程度愈高,即协调性更佳。具体评价指标匹配度划分标准为:(0.8, 1)为高度匹配;(0.7, 0.8]为比较匹配;(0.6, 0.7]为相对匹配;(0.5, 0.6]为比较不匹配;(0, 0.5]为高度不匹配。其中  $k=1, 2, \dots, K$ 。

3 种要素的匹配度取加权平均数:

$$P = \alpha a_1 + \beta a_2 + \delta a_3 \quad (22)$$

式中:  $P$ 为水资源利用、经济社会和生态环境三者的匹配度;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 分别为水资源利用与经济社会的匹配度、水资源利用与生态环境的匹配度和经济社会与生态环境的匹配度;由于匹配度表示理想状态下的各系统协调性,因此取权重  $\alpha=\beta=\delta=1/3$ 。

### 3.4 基于障碍度函数的协调发展障碍因子识别

障碍度模型量化分析 WSE 系统耦合协调的障碍因素,低障碍度表示该指标对系统协调度影响小,反之则大。通过计算各指标的障碍度,可明确主要障碍因子,为政策制定提供科学依据,确保政策措施能够精准针对关键问题,有效提升系统的耦合协调度和匹配度<sup>[34]</sup>。障碍度计算公式为

$$F_i = \omega_i \times b_{ij} \quad (23)$$

$$H_j = \frac{F_i \times (1 - X_j)}{\sum_{j=1}^3 F_i \times (1 - X_j)} \times 100\% \quad (24)$$

式(23)和(24)中:  $F_i$ 为因子贡献度;  $\omega_i$ 为 WSE 系统中第  $i$  个子系统的权重, 由公式(15)计算可得;  $H_j$ 为障碍度;  $b_{ij}$ 为第  $i$  个子系统中的第  $j$  个指标的权重;  $X_j$ 为经标准化后第  $j$  项指标的值。

## 4 结果与分析

### 4.1 综合发展水平分析

上述关于各分区子系统发展水平的计算和分析结果见图 3。结果显示, 2010—2022 年研究区域各城市系统发展水平呈现不同的态势。徐州市各系统发展平均水平高低依次为经济(0.51)>生态(0.47)>水资源(0.38), 宿迁市各系统发展平均水平高低依次为生态(0.53)>水资源(0.50)>经济(0.47), 淮安市各系统发展平均水平高低依次为经济(0.55)>水资源(0.50)>生态(0.48), 3 个城市经济与生态发

展水平相当, 而 3 个城市的水资源利用系统发展水平差距较大, 尤其是徐州市与其他 2 个城市之间, 主要原因在于 3 个城市之间洪水资源总量的差距较大, 徐州市的洪水资源量远低于宿迁市和淮安市, 这主要受城市地理位置与水系分布的影响, 宿迁和淮安位于江苏的中部偏北地区, 地势相对平坦, 且处于淮河和长江两大水系的交汇地带, 这种地理位置和地形特点使得该地区容易接纳来自不同方向的径流, 但因区域汛期防洪排涝标准与防洪安全目标要求, 加之区域内滞蓄与调控雨季水量的工程设施容量限制, 其出境水量相对也较大; 相比之下, 徐州市位于江苏的西北部, 地形地貌包括山地、丘陵和平原等多种形态, 这类地形特征在一定程度上决定了地表径流的产、汇机制和洪水过程的形成规律。

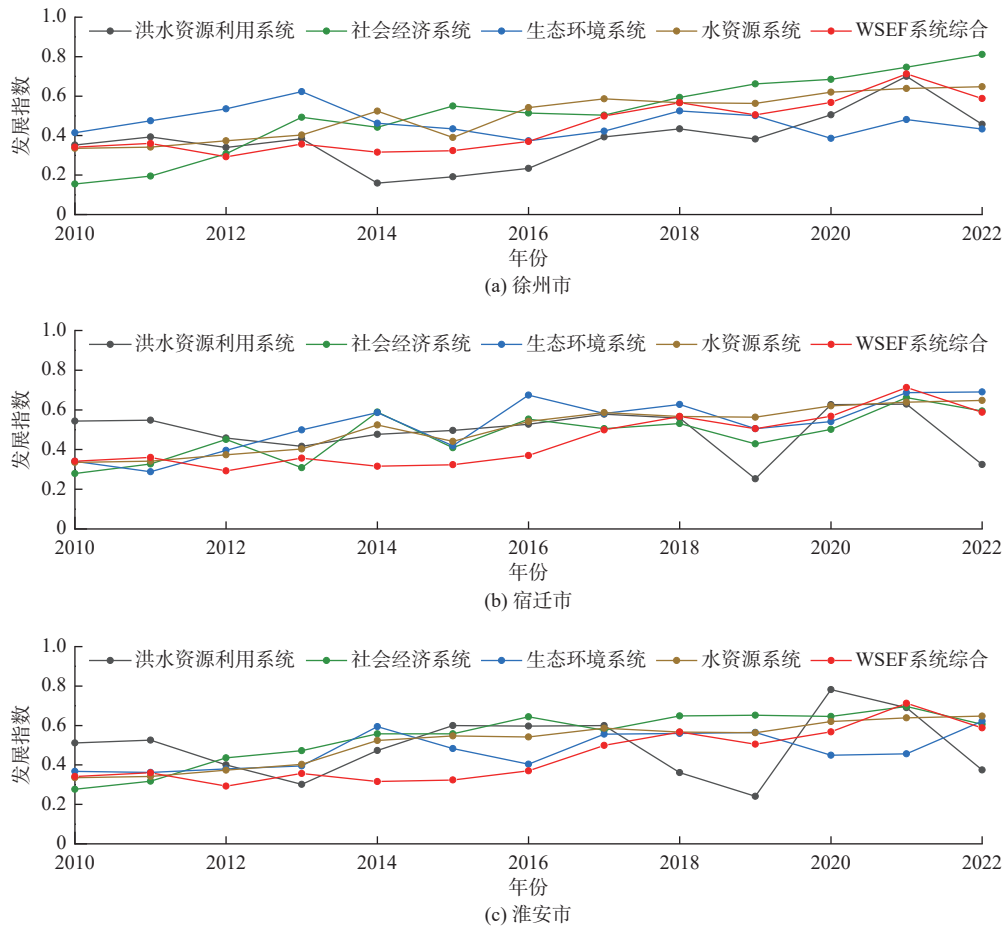


图 3 各分区子系统及 WSE 系统综合发展水平分析

Fig. 3 Graph analysing the level of integrated development of subsystems and WSE systems in each subdistrict

观察 3 个城市的 WSE 系统综合发展水平, 徐州市的 WSE 系统从发展初始阶段(0.307)提升至发展良好阶段(0.642), 宿迁市实现了从发展初始阶段(0.388)显著提升到发展良好阶段(0.659), 淮安市发

展则由 2010 年的发展初始阶段(0.385)跨越到 2020 年的发展良好阶段(0.626)。3 个城市在 WSE 系统综合发展水平上均取得了不同程度的进步, 体现了 3 个城市综合发展理念的深入实施。洪水资源

利用效率提升,经济社会持续健康发展,生态环境质量显著改善,展现了3个城市在平衡经济发展与资源开发、环境保护方面的积极成效。

#### 4.2 WSE系统耦合协调度与匹配度分析比较结果

通过对各分区耦合协调度以及匹配度的计算分析和比较,绘制图4(a)~4(c),可以看出:徐州市的WSE(水资源利用-经济社会-生态环境)系统匹配度在2018年达到高度匹配阶段,其值高达0.983,随后在2021年降至最低点,其相对匹配阶段值为0.614,其耦合协调度在2014—2016年略有下降,为勉强

协调发展阶段,到2021年(0.80)达到良好协调发展状态;宿迁市的WSE系统匹配度最低点在2022年,其高度不匹配阶段值为0.481,在2018年达到高度匹配阶段,其值为0.945,其耦合协调度在13年间波动上升,由2010年(0.611)的初级协调发展类上升至2021年(0.811)的良好协调发展类;淮安市的WSE系统匹配度最低点在2019年,其值为0.564,处于比较不匹配阶段,最高值在2012年,达到0.995,处于高度匹配阶段,耦合协调度发展平稳,由2010年(0.611)的初级协调发展类迅速上升至2020年(0.781)的中级协调发展类。

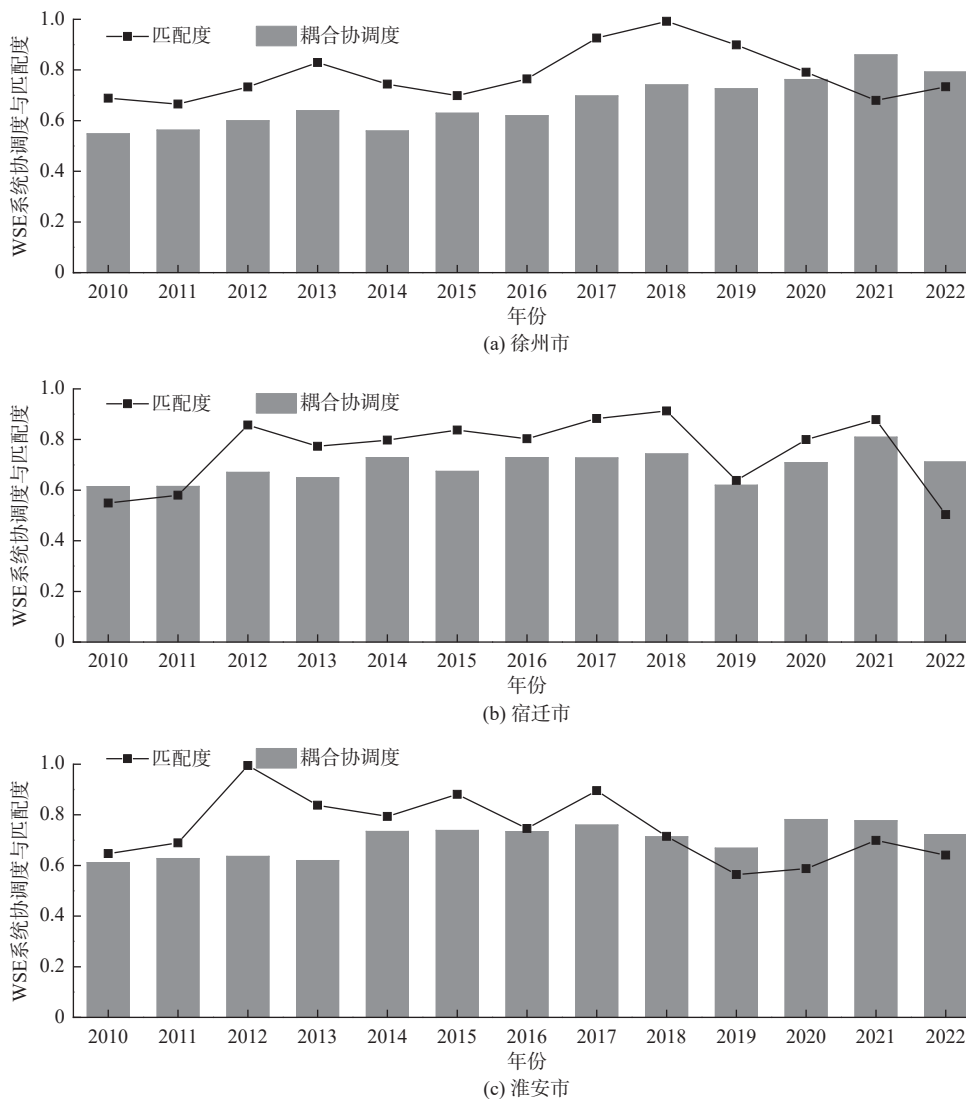


图4 WSE系统匹配度与耦合协调度比较结果

Fig. 4 Comparison result of matching degree and coupling coordination degree of WSE system

3个城市平均匹配度均高于耦合协调度,体现出基于洪水资源开发利用的水资源利用、经济社会与生态环境系统在战略规划层面的高度一致性,但在实际执行和运作过程中,各系统间的协同作用并未达到理想状态。这一状况可能源于洪水资源

在系统间、部门间的分配不均导致水资源利用与经济和生态系统的适配性不同,除此之外洪涝灾害等突发事件也会影响系统间的协同作用。因此,为了实现更加均衡和可持续的发展,需要通过科学评估和资源调配,确保洪水资源在系统间、行业间得到



合理分配,并建立健全的洪水风险预警和应对机制,提高系统应对突发事件的能力。然而,出现耦合协调度在前期和后期高于匹配度的情况,前期主要由于经济发展步伐滞后于水资源利用与生态环境保护的需求,这种滞后性体现在经济发展尚未能提供足够的资源、技术和政策支持,以匹配和支撑洪水资源高效利用与生态环境保护的快速发展。后期随着城市化和工业化的快速推进,水资源需求急剧增加,而既有的洪水资源分配和管理策略未能及时响应和适应这一变化,导致匹配度有所下降。然而,随着技术和管理水平的提升,以及对洪水资源潜力的开发和洪水资源配置的优化,洪水资源针对经济

发展和生态保护的供给水量增大,增强了水资源利用、经济和生态的互补性和协同作用,从而提高了整体的耦合协调度,使之超越了原有的匹配度,而且反映出尽管系统间的适配性有所降低,但系统内部的协作和协调能力得到了显著增强,从而实现了更高的整体稳定性。

### 4.3 WSE 系统耦合协调度影响因素分析

利用障碍度公式计算得到 2010—2022 年准则层  $U_1$ (基于洪水资源开发利用的水资源利用)、 $U_2$ (经济社会)、 $U_3$ (生态环境)3 个指标以及标准层  $A_1\sim C_7$  共 23 项指标的障碍度,取 13 年均值,并列出口标层障碍度排名前 5 位的障碍因子,见图 5。

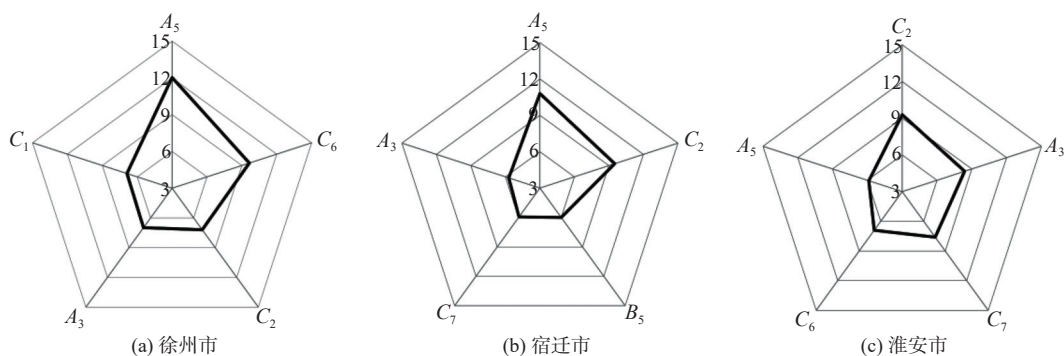


图 5 各分区 WSE 复合系统协调发展障碍因子及其障碍度

Fig. 5 Barriers to the coordinated development of the WSE composite system in each subdistrict and their degree of barrier

从图 5 可以看出:影响徐州市 WSE 复合系统协调发展障碍因子第一为洪水资源利用潜力( $A_5$ ),障碍度达 12.03%,第二为污径比( $C_6$ ),障碍度达 9.64%,其后依次为森林覆盖率( $C_2$ )、洪水资源量( $A_3$ )和河流水系连通率( $C_1$ ),其障碍度依次为 7.20%、7.00%和 6.88%;影响宿迁市 WSE 复合系统协调发展障碍因子前五分别为洪水资源利用潜力( $A_5$ )、森林覆盖率( $C_2$ )、万元工业增加值用水量( $B_5$ )、河道生态断面流量控制达标率( $C_7$ )和洪水资源量( $A_3$ ),障碍度分别为 10.79%、9.51%、6.00%、5.94%和 5.71%;影响淮安市 WSE 复合系统协调发展障碍因子前五分别为森林覆盖率( $C_2$ )、洪水资源量( $A_3$ )、河道生态断面流量控制达标率( $C_7$ )、污径比( $C_6$ )和洪水资源利用潜力( $A_5$ ),障碍度分别为 9.28%、8.38%、7.61%、6.90%和 5.88%。

3 个城市前五位的障碍因子分布于水资源利用、经济和生态 3 个系统,其中洪水资源利用潜力( $A_5$ )、森林覆盖率( $C_2$ )以及洪水资源量( $A_3$ )对 3 个城市耦合协调发展均产生较大影响。增加森林覆盖能减缓水流,降低洪水峰值,提供缓冲,不合理的森林覆

盖变化可能导致洪水调蓄能力降低、经济结构变化、生物多样性减少等后果。因此,保持合理的森林覆盖结构对于增强洪水资源的调蓄和利用效率至关重要,同时对经济发展和生态保护也起到促进作用。因此,为了推动 3 个城市的可持续发展,必须重视关键因子的改善。因此,3 个城市可以加强洪水监测预警与资源化利用技术研究,提高水资源利用效率;同时,强化森林保护,提升森林覆盖率,以发挥其防洪减灾功能;此外,还需优化水资源管理,推动跨流域调水工程,以实现水资源的均衡配置与可持续利用,从而实现水资源利用、经济和生态的和谐共生与协调发展。

关于准则层  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  的 3 个指标,徐州市  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  指标的障碍度分别为 37.14%、29.78% 和 33.08%;宿迁市  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  指标的障碍度分别为 31.57%、36.93% 和 31.51%;淮安市  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  指标的障碍度分别为 33.94%、29.99% 和 36.07%。可以看出 3 个系统的障碍度与其发展水平呈负相关,发展水平越低其障碍度越高,对 WSE 复合系统协调发展影响越大。徐州市复合系统耦合协调度主要

受水资源利用影响较大,宿迁市受经济社会影响较大,而淮安市则受生态环境影响较大,体现出徐州市、宿迁市和淮安市在 WSE 复合系统的协调发展,各自有其不同的主导影响因素。因此,各市应当根据自身情况,制定有针对性的发展策略。徐州市应提升洪水资源管理水平和洪水调蓄能力,宿迁市和淮安市应当分别提高洪水在经济及生态方面的利用效率,力求通过有针对性的改善策略使各分区能够共同推动 WSE 复合系统的协调发展。

## 5 结论

以南水北调东线工程江苏段 3 个地级市(徐州、宿迁、淮安)作为研究区,基于 2010—2022 年的数据,计算得出各市 WSE 复合系统综合发展水平与耦合协调度,并运用匹配度模型对协调度进行比较分析,最后运用障碍度模型找出耦合协调度影响因素,得出如下结论:

徐州市、宿迁市和淮安市 WSE(基于洪水资源开发利用的水资源利用-经济社会-生态环境)系统发展水平总体上升,都由初级阶段上升至良好阶段,这表明 3 个城市在平衡经济发展、资源利用和环境保护方面取得了积极成效。但 3 个城市发展上各有侧重,徐州市水资源利用相对滞后,宿迁经济社会发展水平待提升,淮安市生态环境发展水平稍欠。徐州市主要是由于整体洪水资源总量较少,而宿迁和淮安市则是由于洪水资源在经济和生态方面的利用效率较低。因此,徐州市应当加强水利工程建设,合理利用水库及蓄滞洪区等设施来提高洪水拦蓄能力;而宿迁和淮安市则应当优化洪水资源配置,发掘洪水利用潜力,提高洪水利用效率。

3 个城市的 WSE 系统在近年来经历了匹配度的显著波动,但平均匹配度均处于相对匹配阶段,显示出战略规划与水资源利用、经济社会和生态环境之间的较高一致性。徐州、宿迁和淮安市的耦合协调度分别经历了从勉强协调到良好协调、从初级协调到良好协调以及从初级协调到中级协调 3 个阶段。3 个城市在后期协调性高于适配性,主要由于随着城市化发展,各方面用水量增多,而洪水资源分配和管理策略未能及时响应和适应这一变化,导致匹配度有所下降,而系统内部协调性则一直保持上升趋势,直到后期协调度超越匹配度达到理想协调状态。

通过障碍因子的分析,准则层指标障碍度分析

得出,徐州市、宿迁市和淮安市障碍度最高的指标分别水资源利用系统、经济社会系统和生态环境系统,与各分区系统发展水平呈负相关。指标层障碍度分析得出洪水资源利用潜力( $A_5$ )、森林覆盖率( $C_2$ )以及洪水资源量( $A_3$ )对 3 个城市耦合协调发展均产生较大影响,不合理的森林覆盖变化可能导致洪水调蓄能力降低、生物多样性减少等后果。因此,各市应当加强洪水预警与利用技术研发,提升洪水资源储蓄能力及利用效率;积极实施植树造林,提高森林覆盖率以增强防洪能力;优化水资源配置,促进跨域合作,共同推动 3 个城市水资源、经济和生态协调可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 李庆航,钱凯霞,肖昌虎,等.长江流域用水趋势及用水总量控制指标研究[J].人民长江,2012,43(2):12-15 DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2012.02.015.
- [2] 王宗志,王银堂,胡四一,等.流域洪水资源利用的理论框架探讨 I: 定量解析[J].水利学报,2017,48(8):883-891. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20161100.
- [3] 刘友春,何庆平,闫芳阶,等.山东省淮河流域洪水资源利用思路探讨[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):25-28. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.006.
- [4] ZHANG Y, KHAN S U, SWALLOW B, et al. Coupling coordination analysis of China's water resources utilization efficiency and economic development level[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 373: 133874. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133874.
- [5] 苗峻瑜. 黄河流域工业水资源效率与经济发展耦合协调分析[J]. 工业技术经济, 2023, 42(9): 142-150. DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2023.09.015.
- [6] ZHEN J, NAN J, HOU J. Quantitative analysis of regional water resources and secure development of economic and social coupling systems[J]. Water Supply, 2023, 23(8): 3192-3204. DOI: 10.2166/ws.2023.198.
- [7] 张莉,邱士可,闫丽洁,等.基于流域视角的河南省水资源利用与经济社会发展耦合协调分析[J].地域研究与开发,2022,41(6):14-19. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2022.06.003.
- [8] 陈晓,李景保,王飞,等.近 10 年间南京市生态环境与水源的耦合关系[J].水电能源科学,2017,35(7):65-68.
- [9] 高峰.辽阳县生态环境与水源的耦合关系研究[J].水利技术监督,2018(2):143-146. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2018.02.045.
- [10] ZHANG K Z, SHEN J Q, HE R, et al. Dynamic anal-

- ysis of the coupling coordination relationship between urbanization and water resource security and its obstacle factor[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4765.
- [11] 侯雷. 武汉市城市化与水资源协调发展研究 [J]. *人民长江*, 2023, 54(8): 124-130. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.017](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.08.017).
- [12] YUAN L, CHEN G P, WANG J S, et al. A quantitative analysis method for the degree of coupling coordination between drinking water carrying capacity and population spatial aggregation[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2022, 24(9): 11392-11423. DOI: [10.1007/s10668-022-02229-2](https://doi.org/10.1007/s10668-022-02229-2).
- [13] 杨思敏. 黄河河龙区间人水耦合系统特征变化及协调调度评估 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023. DOI: [10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000107](https://doi.org/10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000107).
- [14] 张恩月, 苏迎庆, 张云枫, 等. 汾河流域水土资源耦合协调格局及驱动因素 [J]. *中国沙漠*, 2023, 43(3): 169-177. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00018](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00018).
- [15] LI Z Q, GUO J Y, YOU X Y. A study on spatio-temporal coordination and driving forces of urban land and water resources utilization efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, 14(1): 272-288. DOI: [10.2166/wcc.2022.324](https://doi.org/10.2166/wcc.2022.324).
- [16] HU M H, YUAN J H, CHEN L. Regional pattern and coupling analysis of water-energy natural capital utilization in urban agglomerations[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2023, 32(4): 3591-3604. DOI: [10.15244/pjoes/163154](https://doi.org/10.15244/pjoes/163154).
- [17] WANG X P, SONG J N, XING J H, et al. System nexus consolidates coupling of regional water and energy efficiencies[J]. *Energy*, 2022, 256: 124631. DOI: [10.1016/j.energy.2022.124631](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124631).
- [18] TOMAL M. Evaluation of coupling coordination degree and convergence behaviour of local development: A spatiotemporal analysis of all Polish municipalities over the period 2003-2019[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71: 102992. DOI: [10.1016/j.scs.2021.102992](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102992).
- [19] 张国兴, 徐龙. 基于时空维度的水资源与经济匹配分析 [J]. *水电能源科学*, 2020, 38(3): 54-57.
- [20] 张晓涛, 于法稳. 黄河流域经济发展与水资源匹配状况分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(10): 1-6. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2104.2012.10.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2104.2012.10.001).
- [21] 张吉辉, 李健, 唐燕. 中国水资源与经济发展要素的时空匹配分析 [J]. *资源科学*, 2012, 34(8): 1546-1555.
- [22] 胡庆芳, 王银堂. 海河流域洪水资源利用评价研究 [J]. *水文*, 2009, 29(5): 6-12. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0852.2009.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0852.2009.05.002).
- [23] 李晓英, 郑浩然, 吴淑君, 等. 基于二元极限理论的流域洪水资源利用现状与潜力分析 [J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 70-77. DOI: [10.15961/j.jsuese.201900441](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.201900441).
- [24] 许继军, 陈进, 黄思平. 鄱阳湖洪水资源潜力与利用途径探讨 [J]. *水利学报*, 2009, 40(4): 474-480. DOI: [10.3321/j.issn:0559-9350.2009.04.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:0559-9350.2009.04.013).
- [25] 吴浩云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 太湖流域洪水识别与洪水资源利用约束分析 [J]. *水利水电工程学报*, 2016(5): 1-8. DOI: [10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.001](https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.001).
- [26] 陆志华, 潘明祥, 蔡梅, 等. 太湖雨洪资源利用可行性分析 [J]. *水电能源科学*, 2018, 36(1): 32-35.
- [27] 李煜连, 钟小敏, 帅红, 等. 湘江流域洪水资源可利用量与水库调蓄方案研究 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(1): 78-81.
- [28] 刘德东, 石飞, 刘廷廷, 等. 山东省非常规水资源利用现状及途径分析 [J]. *中国水利*, 2019(9): 14-17. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2019.09.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2019.09.009).
- [29] 杨吉, 巨鑫慧, 李力群, 等. 基于 SWAT 模型的西枝江流域洪水资源利用潜力研究 [J]. *水电能源科学*, 2023, 41(8): 61-65. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230106](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230106).
- [30] 方红远, 王银堂, 胡庆芳. 区域洪水资源可利用量评价分析 [J]. *水利学报*, 2009, 40(7): 776-781. DOI: [10.3321/j.issn:0559-9350.2009.07.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:0559-9350.2009.07.002).
- [31] 杜栋, 庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [32] 李艳明, 方红远, 侯金甫, 等. 苏州市水资源-经济-环境-再生水系统耦合协调分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 108-119. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.010](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.010).
- [33] 左其亭, 赵衡, 马军霞, 等. 水资源利用与经济社会发展匹配度计算方法及应用 [J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(6): 1-6. DOI: [10.3880/j.issn.10067647.2014.06.001](https://doi.org/10.3880/j.issn.10067647.2014.06.001).
- [34] 张茵, 王婷, 游进军, 等. 全国水-社会经济耦合协调时空演变及其障碍因子分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 64-74.

## Evaluation of regional floodwater resource utilization based on coupling coordination

ZHOU Ying, FANG Hongyuan, LU Taige, LIU Nannan

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** The study was undertaken to gain a profound comprehension and optimize the patterns of regional water resource utilization, with a strong emphasis on efficiency, focusing particularly on Xuzhou, Suqian, and Huaian, the pivotal beneficiaries of the Jiangsu segment of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project. Recognizing the indispensable role of water resources in fueling socioeconomic development and safeguarding ecological integrity, a comprehensive analysis was conducted to explore the intricate interplay between these facets. The objective was to ensure sustainable utilization of water resources while promoting balanced socioeconomic growth and protecting the delicate ecological balance in these regions.

A multifaceted analytical framework was devised to examine the coupling and coordinated development among the water resource utilization, socioeconomic development, and ecological environment protection systems. This model encompassed a broad range of 23 carefully selected indicators, distributed across three core dimensions. The methodology entailed the application of the entropy weight method to objectively and precisely determine the weights of these indicators, thereby enhancing the robustness of the analysis. Subsequently, the constructed model was benchmarked against a matching degree model, and an obstacle degree model was employed to meticulously identify and analyze the factors that potentially hindered the desired levels of coupling and coordination. This rigorous approach aimed to uncover insights into the complex dynamics of the integrated system and to pinpoint areas requiring targeted interventions.

The study revealed marked advancements in the overall development levels of the integrated systems in Xuzhou, Suqian, and Huaian, showcasing a discernible transition from nascent to advanced stages. Specifically, their coupling coordination degrees underwent notable transformations: Xuzhou progressed from a state of barely coordinated to well-coordinated, Suqian experienced a leap from primary coordination to well-coordination, while Huaian progressed from primary coordination to a moderately coordinated state. Notably, in the later stages of the analysis, the coupling coordination degrees of all three cities surpassed their respective matching degrees, indicative of an optimal state of harmonious development. However, the investigation also surfaced key impediments, namely, the untapped potential of floodwater resource utilization, limited forest coverage, and inadequate volumes of floodwater resources. Furthermore, distinct dominant factors influencing the coupling coordination degree of each city's composite system were elucidated: water resource utilization emerged as the pivotal factor in Xuzhou, socioeconomic factors predominated in Suqian, and the ecological environment held sway in Huaian.

To address the identified challenges and harness the full potential of water resources, it is imperative to implement effective measures aimed at enhancing the peak-clipping and storage capabilities of reservoirs and flood detention areas. These initiatives will not only mitigate the frequency and severity of floods but also minimize associated economic and ecological losses. Furthermore, ensuring the efficient utilization of water resources for both socioeconomic growth and ecological preservation is critical for the sustainable development of Xuzhou, Suqian, and Huaian. By adopting these strategies, a solid foundation will be laid for the long-term prosperity of these cities and the preservation of their fragile ecosystems, fostering a harmonious balance between human activities and the natural environment.

**Key words:** flood water resource utilization; coupled and coordinated development; evaluation model; Jiangsu section of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project