

姬金雪, 王乐, 要威, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的蓄滞洪区可持续发展评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 299-308. JI J X, WANG L, YAO W, et al. Evaluation of sustainable development of flood storage area based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 299-308. (in Chinese)

基于 AHP-模糊综合评价法的 蓄滞洪区可持续发展评价

姬金雪¹, 王乐², 要威², 刘勇³, 王宇晖¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010;
3. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029)

摘要: 基于生态系统服务价值理论, 对蓄滞洪区生态系统的气候调节价值、水质净化价值、空气净化价值、土壤保持价值、碳固定价值、生物多样性价值和科研教育价值 7 个方面进行生态服务价值评估, 采用替代成本法、成果参数法等核算方法对各项生态服务功能进行价值核算。通过评估生态系统服务价值, 将生态效益纳入可持续发展评价体系, 系统构建能够有效反映经济资源子系统、防洪子系统、生态功能子系统之间相互作用与制约关系的蓄滞洪区可持续发展评价指标体系。此外, 构建模糊综合评价模型进行现状评价和情景预测。结果表明: 2 个蓄滞洪区现阶段可持续发展评价为一般。在调整种植结构、土地利用方式、打造特色养殖模式等方式的情景下, 区域可持续发展水平较好。研究能为蓄滞洪区的生态效益量化评价和可持续发展提供参考。

关键词: 蓄滞洪区; 可持续发展; 生态价值核算; 指标体系; 模糊综合评价

中图分类号: TV212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0032

蓄滞洪区可持续发展主要包括 3 个部分, 分别为社会可持续发展、经济可持续发展和生态环境可持续发展。可持续发展的目标是防洪上保证安全、经济上保证有序发展、环境上保证状态良好。在研究蓄滞洪区可持续发展评价指标体系的过程中, 叶明等^[1]提出了一套适用于蓄滞洪区可持续发展的评价指标体系, 从资源、环境、经济、社会和防洪 5 个方面对蓄滞洪区的可持续发展水平进行评价。但是在生态方面, 如何体现生态系统的服务价值并将其纳入可持续发展评价指标体系中对区域进行综合评价还有待研究。因此, 本文在适用于蓄滞洪区可持续发展的评价指标研究体系基础上增加对生态系统服务价值的研究, 侧重于生态指标的选取, 重点研究生态对区域可持续发展的影响。在评判蓄滞洪区可持续发展的方法研究过程中, 采用 AHP-模糊综合评价法进行蓄滞洪区的和谐发展研究是一种较为常用的评价方法, 将可持续发展目标具体化, 并在此基础上提出针对各个蓄滞洪区和谐发展

的对策^[2]。本文以滁河流域荒草二、三圩蓄滞洪区为例, 基于圩区的生态服务功能价值, 分别从经济资源、防洪和生态功能 3 个方面对蓄滞洪区进行功能指标选取, 注重蓄滞洪区的生态服务价值, 并采用模糊综合评价法对蓄滞洪区的可持续发展进行评价。对蓄滞洪区的发展状况进行评价, 并根据评价结果协调经济资源、防洪、生态功能三者关系, 最大限度发挥蓄滞洪区的各种功能的综合效益, 对蓄滞洪区的规划建设有着重要意义。

1 评价模型和方法

1.1 蓄滞洪区可持续评价指标体系的建立

采用层次分析法, 结合荒草二、三圩蓄滞洪区的基础情况, 将可持续发展评价体系分为目标层、准则层和指标层。目标层是蓄滞洪区可持续发展水平, 准则层是经济资源子系统、防洪子系统以及生态功能子系统, 并从中选取 17 个具有代表性的指

收稿日期: 2023-09-25 修回日期: 2024-03-13 网络出版时间: 2024-03-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240328.1008.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000102)

作者简介: 姬金雪(2000—), 女, 江苏宿迁人, 主要从事蓄滞洪区可持续发展研究。E-mail: 2787766255@qq.com

通信作者: 王宇晖(1984—), 男, 上海人, 教授, 博士, 主要从事生态保护与可持续发展研究。E-mail: yhwang@dhu.edu.cn

标作为指标层,见图 1^[3]。选取 3 种情景对蓄滞洪区的不同状态进行评价,其中,情景二是荒草二、三圩 2 个蓄滞洪区的发展现状,情景一是在现阶段蓄滞洪区的发展水平上减少湿地面积的状态,情景三是对生态化农田改造后及增加湿地面积的状态。情景一主要是湿地面积减少到总面积的 5%,情景三将湿地面积增加到总面积的 20%,同时丰富当地农作物种植种类,发展适水性农业,减少田埂占地面积,在农田过渡区域种植合适的作物形成绿植防护带。对于荒草二、三圩来说,区内以种植经济作物

为主,当蓄滞洪区内经济社会发展受蓄滞洪区启用制约时,对区内的种植结构进行调整并对农田进行生态化改造和将部分农田永久性的湿地化有助于区内居民获得经济收入,同时提高区内的生态效益。生态化农田改造技术在保证农田提高供给服务的情况下还能提高支持和调节等服务,这不仅满足了经济发展的需要,同时也增强了区域抵抗分蓄洪水时的风险能力,对维持蓄滞洪区内良好的农田生态环境具有重要的现实意义。

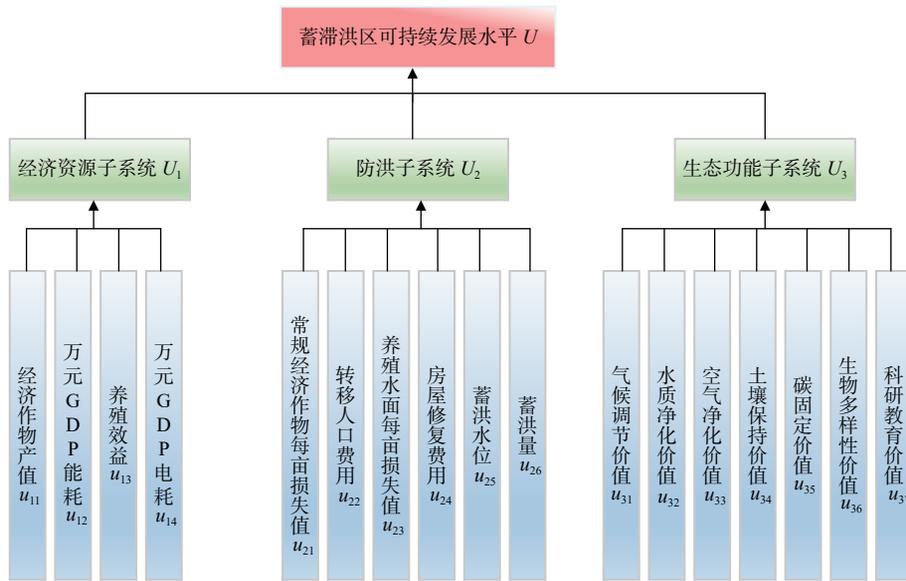


图 1 蓄滞洪区可持续发展评价指标体系

Fig. 1 Sustainable development evaluation index system of flood storage area

1.2 隶属度函数的建立

隶属度是刻画因素对模糊集合隶属关系不确定性大小的数学标尺,模糊综合评价基于模糊数学的隶属度理论将定量评价转化为定性评价^[4]。因此,在模糊综合评价中,确定隶属度函数是一个非常关键的步骤。建立隶属度函数从本质上来讲是一个客观的过程。然而,在实际处理数据的过程中也会有一些主观因素的影响^[5-6]。结合已有的研究成果,并与荒草二、三圩部分指标现有水平相结合,分别构建出各指标的隶属度函数。

经济资源子系统各指标的隶属度函数为

$$\mu_{u_{11}}(x) = e^{-\left(\frac{x-50}{1.2232 \times 5}\right)^2} \quad (1)$$

$$\mu_{u_{12}}(x) = e^{-0.2x^2} \quad (2)$$

$$\mu_{u_{13}}(x) = \frac{1}{1 + 0.00002(x-50)^2} \quad (3)$$

$$\mu_{u_{14}}(x) = e^{-0.000001x^2} \quad (4)$$

防洪子系统各指标的隶属度函数为

$$\mu_{u_{21}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + 0.02x^{1/5}}, & x > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{u_{22}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + 0.02x^{1/5}}, & x > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{u_{23}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + 0.0000002x^{1/2}}, & x > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{u_{24}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + 0.00009x^2}, & x > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{u_{25}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + 2x^2}, & x > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{u_{26}}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + 2x^2}, & x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

生态功能子系统各指标的隶属度函数为

$$\mu_{u_{31}}(x) = \begin{cases} 0, & x < 5 \\ 1 - e^{-0.04(x-5)}, & x \geq 5 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{u_{32}}(x) = \begin{cases} 0, x < 15 \\ 1 - e^{-0.04(x-15)}, x \geq 15 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{u_{33}}(x) = \begin{cases} 0, x < 0.5 \\ 1 - e^{-0.4(x-0.5)}, x \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{u_{34}}(x) = \begin{cases} 0, x \leq 5 \\ 1 - e^{-\left(\frac{x-5}{0.2364 \times S \times 50\%}\right)^2}, x > 5 \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{u_{35}}(x) = \begin{cases} 0, x \leq 30 \\ 1 - e^{-\left(\frac{x-30}{0.09729 \times S}\right)^2}, x > 30 \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{u_{36}}(x) = \begin{cases} 0, x < 5 \\ 1 - e^{-0.03(x-5)}, x \geq 5 \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu_{u_{37}}(x) = \begin{cases} 0, x \leq 2 \\ 1 - e^{-\left(\frac{x-2}{0.3205 \times S \times 10\%}\right)^2}, x > 2 \end{cases} \quad (17)$$

式(1)~(11)中: S 为蓄滞洪区面积, hm^2 ; x 为蓄滞洪区各个指标对应的指标值。

1.3 确定指标权重

建立层次结构模型。第一层为目标层,即蓄滞洪区可持续发展水平;第二层为准则层,选取经济资源子系统、防洪子系统和生态功能子系统为准则层;第三层为指标层,选取蓄洪水位、水质净化价值、科研教育价值等 17 个指标组成指标层。

构造判断矩阵,进行单排序及一致性检验。采用 1~9 标度法构造判断矩阵,并对判断矩阵进行一致性检验,当判断矩阵通过一致性检验时,此时所求的特征向量经归一化处理后即可用作层次单排序的权重。

对目标层的总排序进行一致性检验,得到最终的目标权重系数。层次总排序是指标层相对于被评价层的重要程度进行权重排序,当总排序通过一致性检验时,最终的权重即为最终的指标权重系数。

1.4 综合评判

评判向量 $C=WR=(b_1, b_2, \dots, b_n)$,即将指标权重系数矩阵 W 与单因素评价矩阵 R 进行数学运算。常用的模糊算子有加权平均型、主因素突出型等,本文选择加权平均型^[7]进行计算, $C_{j=1}^m = \sum_{i=1}^n w_i r_{ij}$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。通过计算,可以得到蓄滞洪区的可持续发展水平的评价结果。

2 蓄滞洪区生态系统服务价值评估

蓄滞洪区在气候调节、水质净化、空气净化、水土保持、碳固定、生物多样性以及科研教育等方面有着重要贡献,为了使生态系统得到更好的保护以及更加全面地评价区域的可持续发展程度,对生态系统服务价值评价必不可少。国外对生态系统

服务价值评价的研究首先在美国展开,随后国内也逐渐对生态系统服务价值进行研究,而后逐渐成为生态学和经济学领域的热门研究内容,参照已有研究^[8-9]中关于生态系统服务价值的核算方法,主要采用替代成本法、影子工程法、成果参数法、单位面积价值法等核算方法对各项服务价值进行评估^[10]。

2.1 气候调节价值

蓄滞洪区内水面可通过大量水的蒸发等过程给区域带来降温增湿的效果。可运用替代成本法,即人工调节温度和湿度所需要的耗电量来核算生态系统蒸散发和水面蒸发调节温度及湿度的价值^[11]。

$$V_1 = \sum Q_q \times C \times y \quad (18)$$

式中: Q_q 为蓄滞洪区的蒸发水量, m^3 ; C 为当地电价,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); y 为将 1 m^3 水转化为蒸汽的耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。滁州市的电价为 0.56 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$),通常情况下将 1 m^3 水转化为蒸汽的耗电量约为 125 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ^[12]。

2.2 水质净化价值

水质净化指湿地通过植物、土壤、微生物之间复杂的物理、化学等过程对水质净化,一般通过工业治理水污染物成本核算生态系统水质净化价值^[13]。

$$V_2 = \sum Q_{s,i} \times S \times C_{s,i} \quad (19)$$

式中: $Q_{s,i}$ 为单位湿地对第 i 种污染物的净化能力, t/hm^2 ; S 为蓄滞洪区面积, hm^2 ; $C_{s,i}$ 为工业处理第 i 种水污染物的费用,元/ t 。 $i=1,2$ 分别表示总磷和总氮,主要核算湿地对氮、磷的去除价值。湿地单位面积的氮、磷去除率^[14]分别为 3.98 和 1.86 t/hm^2 ;工业上去除氮、磷的价值分别为 1 500 和 2 500 元/ t ^[15]。

2.3 空气净化价值

空气净化功能指生态系统净化大气污染物,改善大气环境的功能。空气净化价值采用影子工程法^[16]即工业治理大气污染物成本来核算生态系统空气净化价值。这里主要考虑农田对二氧化硫和氮氧化物的净化价值。

$$V_3 = \sum Q_{k,i} \times S \times C_{k,i} \quad (20)$$

式中: $Q_{k,i}$ 为农田生态系统单位面积吸收第 i 种空气空气污染物的能力, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; S 为蓄滞洪区面积, hm^2 ; $C_{k,i}$ 为单位面积治理第 i 种空气污染物的成本。 $i=1,2$ 分别表示 SO_2 和 NO_x ,主要核算净化 SO_2 和 NO_x 的成本,农田生态系统单位面积吸收 SO_2 和 NO_x 的能力分别为 40 和 29.6 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[17];治理费用参考国家林业局发布的《森林生态系统服务功能评估规范(LY/T 1721—2008)》, SO_2 的治理费用为

1.2 元/kg, NO_x 的治理费用为 0.63 元/kg^[18]。

2.4 土壤保持价值

土壤保持功能主要是生态系统保护土壤,增加土壤抗蚀性,减少土壤流失的功能,采用成果参数法核算生态系统土壤保持的价值。本文研究的荒草二、三圩蓄滞洪区区内以农田为主,因此主要核算农田生态系统土壤保持价值。

$$V_4 = S \times C_t \quad (21)$$

式中: S 为蓄滞洪区面积, hm^2 ; C_t 为农田生态系统单位面积土壤保持价值, 元/ hm^2 , 参照张飞雪^[19] 研究中的标准, 生态化农田改造前单位面积土壤保持价值为 2 839.96 元/ hm^2 , 改造后单位面积土壤保持量为 3 089.82 元/ hm^2 。

2.5 碳固定价值

生态系统固碳功能指自然生态系统吸收二氧化碳将碳固定在植物或土壤中, 生态系统的固碳功能有利于降低大气中二氧化碳含量, 减缓温室效应。生物系统固定碳价值可以采用成果参数法核算生态系统固碳的价值。

$$V_5 = S \times C_c \quad (22)$$

式中: S 为蓄滞洪区面积, hm^2 ; C_c 为农田生态系统单位面积固碳价值, 元/ hm^2 。参照张飞雪^[19] 研究中的标准, 生态化农田改造前单位面积碳固定价值为 2 022.10 元/ hm^2 , 改造后单位面积碳固定价值为 2 284.04 元/ hm^2 。

2.6 生物多样性价值

生物多样性是人类赖以生存和发展的重要基础, 是生态系统演化和生物进化所必需的, 本文研究的荒草二、三圩蓄滞洪区区内以农田为主, 因此主要核算农田生态系统对生物多样性的保持价值。采用成果参数法核算生态系统生物多样性的价值^[19]。

$$V_6 = S \times C_s \quad (23)$$

式中: S 为蓄滞洪区面积, hm^2 ; C_s 为农田生态系统单位面积维持生物多样性的价值, 元/ hm^2 。参照张飞雪^[19] 研究中的标准, 生态化农田改造前单位面积生物多样性保持价值为 1 507.62 元/ hm^2 , 改造后单位面积生物多样性保持价值为 1 936.90 元/ hm^2 。

2.7 科研教育价值

湿地生态系统是进行科研教育的良好平台, 采用单位面积价值法核算生态系统科研教育的价值^[20]。

$$V_7 = S \times C_k \quad (24)$$

式中: S 为可供开展科研教育的蓄滞洪区面积, hm^2 ; C_k 为单位湿地面积所能提供的科研价值, 元/ hm^2 。

取国内外单位湿地面积科研价值的平均值^[21], 取 2 968.37 元/ hm^2 。

3 工程应用

3.1 蓄滞洪区的基本情况

荒草二圩、三圩蓄滞洪区均位于安徽省滁州市全椒县境内, 是滁河流域国家级蓄滞洪区, 位于境内滁河干流与襄河交汇处, 其主要功能是分蓄襄河口以上超额洪水, 圩内地势平坦, 以耕地、养殖水面和经济林为主。荒草二圩面积 4.4 km^2 , 设计蓄洪水位 13.6 m, 蓄洪量 2 320 万 m^3 。荒草三圩面积 7.1 km^2 , 设计蓄洪水位 13.5 m, 设计蓄洪量 3 750 万 m^3 。两个蓄滞洪区均无常住人口。荒草二圩、三圩历史上运用过 5 次, 在历次大水中发挥了较大的分洪减灾作用。

3.2 指标体系

建立蓄滞洪区可持续发展评判对象的指标体系见表 1。其中, U 为蓄滞洪区可持续发展水平, U_1 为经济资源子系统, U_2 为防洪子系统, U_3 为生态功能子系统。对每个子系统进行分解, 进而构建各子系统的要素集: 经济资源子系统 $U_1 = \{u_{11}, u_{12}, \dots, u_{14}\}$, 防洪子系统 $U_2 = \{u_{21}, u_{22}, \dots, u_{26}\}$, 生态功能子系统 $U_3 = \{u_{31}, u_{32}, \dots, u_{37}\}$ 。具体各指标值见表 2。

表 1 蓄滞洪区可持续发展指标

Tab. 1 Indicators of sustainable development of flood storage areas

目标层	准则层	指标层
经济资源子系统 U_1		经济作物产值 u_{11} /万元
		万元GDP能耗(标准煤) u_{12} /t
		养殖效益 u_{13} /万元
蓄滞洪区可持续发展水平 U	防洪子系统 U_2	万元GDP电耗 u_{14} /($\text{kW}\cdot\text{h}$)
		常规经济作物每亩损失值 u_{21} /元
		转移人口费用 u_{22} /(元 \cdot 人 $^{-1}$)
	生态功能子系统 U_3	养殖水面每亩损失值 u_{23} /元
		房屋修复费用 u_{24} /(元 $\cdot\text{m}^2$)
		蓄洪水位 u_{25} /m
蓄滞洪区可持续发展水平 U		蓄洪量 u_{26} /万 m^3
		气候调节价值 u_{31} /万元
		水质净化价值 u_{32} /万元
		空气净化价值 u_{33} /万元
		土壤保持价值 u_{34} /万元
		碳固定价值 u_{35} /万元
		生物多样性价值 u_{36} /万元
科研教育价值 u_{37} /万元		

3.3 计算隶属度

将表 2 中的数值代入隶属度函数的计算公式, 结果见表 3。

表 2 3 种情景下蓄滞洪区的指标值

Tab. 2 Indicator values for flood storage areas under three scenarios

指标层	情景一		情景二		情景三	
	荒草二圩	荒草三圩	荒草二圩	荒草三圩	荒草二圩	荒草三圩
$u_{11}/\overline{\text{万元}}$	324.13	523.04	349.07	563.27	324.13	523.04
u_{12}/t	0.268 5	0.268 5	0.268 5	0.268 5	0.268 5	0.268 5
$u_{13}/\overline{\text{万元}}$	297.00	479.25	198.00	319.50	148.50	239.63
$u_{14}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	609.02	609.02	609.02	609.02	609.02	609.02
$u_{21}/\overline{\text{元}}$	749	749	749	749	749	749
$u_{22}/(\overline{\text{元}}\cdot\text{人}^{-1})$	840	840	840	840	840	840
$u_{23}/\overline{\text{元}}$	4 857	4 857	1 943	1 943	968	968
$u_{24}/(\overline{\text{元}}\cdot\text{m}^{-2})$	700	700	120	120	50	50
u_{25}/m	13.60	13.50	13.60	13.50	13.60	13.50
$u_{26}/\overline{\text{万m}^3}$	2 320	3 750	2 320	3 750	2 320	3 750
$u_{31}/\overline{\text{万元}}$	34.65	55.91	34.65	55.91	133.15	214.86
$u_{32}/\overline{\text{万元}}$	41.05	66.24	41.05	66.24	467.28	754.02
$u_{33}/\overline{\text{万元}}$	2.93	4.73	2.93	4.73	3.29	5.31
$u_{34}/\overline{\text{万元}}$	56.84	91.72	127.33	205.47	135.95	219.38
$u_{35}/\overline{\text{万元}}$	88.97	143.56	100.49	161.17	235.73	380.38
$u_{36}/\overline{\text{万元}}$	66.34	107.04	85.22	137.52	97.34	157.07
$u_{37}/\overline{\text{万元}}$	6.53	10.54	13.06	21.07	21.12	42.15

注:表2中的生态功能子系统的数据由价值核算得到,经济资源子系统和防洪子系统中数据来源于《滁州市统计年鉴——2021》《关于印发2020年蓄滞洪区运用补偿范围、补偿对象及补偿标准等有关事项的通知》。

表 3 指标隶属度

Tab. 3 Indicator affiliation

指标层	情景一		情景二		情景三	
	荒草二圩	荒草三圩	荒草二圩	荒草三圩	荒草二圩	荒草三圩
u_{11}	0.771	0.743	0.734	0.705	0.771	0.743
u_{12}	0.986	0.986	0.986	0.986	0.986	0.986
u_{13}	0.450	0.213	0.695	0.408	0.837	0.582
u_{14}	0.690	0.690	0.690	0.690	0.690	0.690
u_{21}	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
u_{22}	0.229	0.229	0.229	0.229	1.000	1.000
u_{23}	0.175	0.175	0.570	0.570	0.842	0.842
u_{24}	0.022	0.022	0.436	0.436	0.816	0.816
u_{25}	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
u_{26}	0	0	0	0	0	0
u_{31}	0.695	0.870	0.695	0.870	0.994	1.000
u_{32}	0.647	0.871	0.647	0.871	1.000	1.000
u_{33}	0.622	0.816	0.622	0.816	0.672	0.854
u_{34}	0.630	0.656	0.996	0.997	0.998	0.999
u_{35}	0.850	0.933	0.934	0.973	1.000	1.000
u_{36}	0.841	0.953	0.910	0.981	0.937	0.990
u_{37}	0.098	0.131	0.460	0.505	0.841	0.956

3.4 确定指标权重系数

根据确立的层次结构模型构造判断矩阵,进行单排序及一致性检验。采用 1~9 标度法构造判断矩阵,见表 4 至表 7。

表 4 $U-U_i$ 判断矩阵、单排序权重、一致性检验

Tab. 4 $U-U_i$ judgment matrix, single-ranking weights and consistency test

U	U_1	U_2	U_3	权重 W_i
U_1	1	1/2	1/2	0.197 6
U_2	2	1	2	0.490 5
U_3	2	1/2	1	0.311 9

注:最大特征值 $\lambda_{\max}=3.053 7$,一致性指标 $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=0.026 85$,一致性比例 $CR=0.051 7<0.1$,满足一致性检验要求。

表 5 U_1-u_{1i} 判断矩阵、单排序权重、一致性检验

Tab. 5 U_1-u_{1i} judgment matrix, single-ranking weights and consistency test

U_1	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	W_i
u_{11}	1	3	1/3	3	0.283
u_{12}	1/3	1	1/3	1	0.122
u_{13}	3	3	1	3	0.473
u_{14}	1/3	1	1/3	1	0.122

注: $\lambda_{\max}=4.154 3$, $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=0.051 43$, $CR=0.057 8<0.1$,满足一致性检验要求。

表 6 U_2-u_{2i} 判断矩阵、单排序权重、一致性检验

Tab. 6 U_2-u_{2i} judgment matrix, single-ranking weights and consistency test

U_2	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}	u_{26}	W_i
u_{22}	1	2	1/2	2	1/3	1/3	0.121
u_{22}	1/2	1	1/2	2	1/3	1/2	0.104
u_{23}	2	2	1	2	1/2	1/2	0.166
u_{24}	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1/2	0.089
u_{25}	3	3	2	2	1	1	0.268
u_{26}	3	2	2	2	1	1	0.252

注: $\lambda_{\max}=6.275 5$, $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=0.055 1$, $CR=0.043 7<0.1$,满足一致性检验要求。

表 7 U_3-u_{3i} 判断矩阵、单排序权重、一致性检验

Tab. 7 U_3-u_{3i} judgment matrix, single-ranking weights and consistency test

U_3	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{34}	u_{35}	u_{36}	u_{37}	W_i
u_{31}	1	1/3	2	1/2	2	2	3	0.164
u_{32}	3	1	3	3	2	1	3	0.268
u_{33}	1/2	1/3	1	1/2	1	1/2	2	0.088
u_{34}	2	1/3	2	1	2	1	2	0.163
u_{35}	1/2	1/2	1	1/2	1	1	3	0.113
u_{36}	1/2	1	2	1	1	1	2	0.145
u_{37}	1/3	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2	1	0.059

注: $\lambda_{\max}=7.433 7$, $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=0.072 28$, $CR=0.053 1<0.1$,满足一致性检验要求。

进行总排序及一致性检验,见表 8。

表 8 蓄滞洪区可持续发展评价体系指标层次单排序和层次总排序

Tab. 8 Hierarchical single ranking and hierarchical total ranking of indicators of sustainable development evaluation system for flood storage areas

指标层	U_1	U_2	U_3	目标权重系数
	0.197 6	0.490 5	0.311 9	
u_{11}	0.283			0.056
u_{12}	0.122			0.024
u_{13}	0.473			0.094
u_{14}	0.122			0.024
u_{22}		0.121		0.059
u_{22}		0.104		0.051
u_{23}		0.166		0.081
u_{24}		0.089		0.044
u_{25}		0.268		0.132
u_{26}		0.252		0.124
u_{31}			0.164	0.051
u_{32}			0.268	0.084
u_{33}			0.088	0.027
u_{34}			0.163	0.051
u_{35}			0.113	0.035
u_{36}			0.145	0.045
u_{37}			0.059	0.018

3.5 综合评价

参考已有蓄滞洪区可持续发展水平的划分等级成果^[3],将蓄滞洪区可持续发展水平划分为 5 个等级,见表 9。

表 9 可持续发展水平等级划分

Tab. 9 Classification of levels of sustainable development

可持续发展水平等级	隶属度取值范围
好	(0.8,1]
较好	(0.6,0.8]
一般	(0.4,0.6]
较差	(0.2,0.4]
差	(0,0.2]

将指标权重系数矩阵 W 与单因素评价矩阵 R 通过数学运算可以得到荒草二、三圩蓄滞洪区的可持续发展水平的评价结果,见表 10。

表 10 3 种情景下荒草二、三圩蓄滞洪区可持续发展综合评价

Tab. 10 Comprehensive evaluation of the sustainable development of the Huangcaowei under three scenarios

蓄滞洪区	情景一		情景二		情景三	
	荒草二圩	荒草三圩	荒草二圩	荒草三圩	荒草二圩	荒草三圩
评价结果	0.376	0.395	0.478	0.488	0.629	0.613
可持续发展水平	较差	较差	一般	一般	较好	较好

可持续发展水平差意味着该区域防洪、经济、生态矛盾明显突出,主要表现为经济发展状态差,蓄滞洪区难以启用,忽略生态环境的发展。可持续发展水平较差意味着该区域防洪、经济、生态矛盾较为突出,主要表现为经济无序发展,防洪工程设施和安全设施不完备,几乎不考虑生态环境的发展。可持续发展水平一般意味着该区域防洪、经济、生态矛盾一般,主要表现为经济发展水平状态一般,蓄滞洪区能正常启用但是损失较大,关注生态环境的状况但是目前未作出改变。可持续发展水平较好意味着该区域防洪、经济、生态矛盾不太突出,主要表现为经济有序发展,防洪工程设施和安全设施完备,能正常启用且不会造成巨大的经济损失和人员伤亡,并且注重生态环境的状况,制定改善生态环境的措施并加以实施。可持续发展水平好意味着该区域防洪、经济、生态三者协调发展,主要表现为经济发展状态较好,防洪功能可以正常发挥且损失很少,无人员伤亡,同时生态环境状况较好,实现利益最大化。

情景预测是蓄滞洪区洪水管理和可持续发展途径选择的边界值。由表 4 可以看出,经济资源子系统对蓄滞洪区可持续发展的贡献率为 19.76%,防洪子系统对蓄滞洪区可持续发展的贡献率为 49.05%,生态功能子系统对蓄滞洪区可持续发展的贡献率为 31.19%。情景一是在现阶段蓄滞洪区的发展水平上减少农田及湿地面积的状态,可以看出情景一中荒草二、三圩蓄滞洪区的评价结果处于 0.2~0.4,该情境下的蓄滞洪区可持续发展水平明显比现状的发展状况差,主要原因是这种情境下的蓄滞洪区经济发展相对较好但是不注重整体的生态环境价值。情景二是蓄滞洪区的发展现状,荒草二、三圩两个蓄滞洪区的评价结果处于 0.4~0.6,由此可知,现阶段荒草二、三圩蓄滞洪区的可持续发展水平为一般,基本符合圩区内的发展状况。情景三是对农田进行生态化改造且增加区内湿地面积后的状态,两个蓄滞洪区的评价结果处于 0.6~0.8,结果表明这种情景下的蓄滞洪区可持续发展水平相对于现状

来说较好,主要是因为生态化农田改造后,在满足了区内经济发展需要的同时增加了农田的生物多样性,改善了农田土壤,对维护良好的生态环境具有重要意义。两个蓄滞洪区现阶段在经济资源子系统中存在的问题主要是经济作物和养殖效益不高,原因主要是种植结构单一,区内以种植常规经济作物和水产养殖为主;防洪子系统中存在的问题主要有分蓄洪水时损失较为严重、分流量较大等,说明蓄滞洪区区内防洪安全建设还有待于进一步完善;生态功能子系统中现阶段整体水平都不高,说明现阶段区内对生态建设的重视程度还不够。

针对蓄滞洪区可持续发展现存的问题,提出如下对策:

改善区内防洪设施。荒草二、三圩蓄滞洪区在历次分洪中起到了重要作用,在保护周边地区方面承担着必不可少的作用。但是也存在着洪水退水时间过长的的问题,应对圩内的排涝设施进行更新改造,可以通过改造涝洼地、疏通排水沟、建造排涝站等方式加快退水的过程^[22]。每次滞洪过后,应当适当安排资金对沟渠等小型农田水利设施进行清淤、修复治理。同时应该提高堤防建设标准并规划设立临时居住庄台,避免每次蓄滞洪区运用都有临时居住设施和生产设施淹没损失。除此之外,完善预警通信系统,配备必要的通信设施和器材。

调整区内种植结构。在经济方面,区内主要以种植水稻、小麦等经济作物和以水产养殖为主,而农业生产受洪涝影响很大,并且单纯发展传统的、简单的粮食生产方式是难以实现脱贫致富的综合发展目标的。因此对于以农业发展为主的蓄滞洪区,可以通过调整区内种植结构,种植经济价值高、耐水性好的经济作物,选择优质品种,提高农产品的质量^[2]。同时还应该发挥区内优势,加大生态养殖的力度,实施生态养殖,打造特色养殖模式。随着防洪工程的建设,可以对耕地进行土壤改良,使耕地价值得到提高^[23]。优化调整蓄滞洪区土地利用方式,降低洪水灾害损失^[24]。

注重蓄滞洪区生态环境建设。在生态方面,应

当走绿色发展道路,对于荒草二、三圩蓄滞洪区来说,发展特色经济,加快推进现代农业发展,因地制宜开发生态湿地和农业观光项目^[25],可以结合具体情况将蓄滞洪区内部分农田永久性恢复为湿地或者改造为永久性的蓄水设施;加强蓄滞洪区植物生态修复,防洪堤沿岸种植生态防护林、农田防护林^[26];湿地化蓄滞洪区可以增强水源涵养、水土保持等功能,在发挥蓄滞洪区防洪功能的同时,也要充分发挥其在生态方面的重要作用,努力实现区域的可持续发展^[27]。

建立和完善补偿救助保障体系。应提前开展财产登记,蓄滞洪区所在地的相关部门对区内居民承包的土地、住房、农业生产机械和家庭耐用品等进行登记并定期核查变更情况,明确补偿范围和标准,对于不在补偿范围内自发种植或养殖的不予补偿。同时出台生态补偿政策,目前对蓄滞洪区的补偿依旧是建立在防洪功能的基础上的,对于生态补偿的研究很少,并且补偿资金渠道单一,使用后主要依靠国家及地方财政资金承担全部损失和灾后重建^[28],建议建立起政府主导、社会参与的生态补偿机制,发挥多方面的积极性,为生态补偿基金探索多种融资渠道。

蓄滞洪区的可持续发展是一个复杂的问题,涉及洪水管理、生态保护、水资源利用和经济发展等多个方面。目前,荒草二、三圩蓄滞洪区的主要任务在保障防洪安全上,形式相对单一,导致综合效益不够明显。因此,应当充分发挥区内的多功能潜力,包括防洪、蓄水、抗旱、生态恢复等,以实现社会效益、生态效益和经济效益的最大化。通过建立可持续发展评价指标体系,探讨既能在发生超标准洪水时及时分蓄洪水,又能保障区内居民生存发展要求的可持续发展模式,把蓄滞洪区的管理建设与生态建设相结合,建立起荒草二、三圩蓄滞洪区特有的可持续发展模式,这样可以在满足洪水防御需求的同时,实现水资源和生态环境的可持续管理。对于改善水环境质量、缓解水资源短缺矛盾,以及促进经济持续高速发展具有重要的意义。

4 结论与展望

利用 AHP-模糊综合评价法对蓄滞洪区的可持续发展水平进行评判,构建了能够反映经济资源子系统、防洪子系统和生态功能子系统互制关系的可持续发展评价指标体系,将生态效益纳入评价体系

中,量化生态系统服务价值,突出生态对区域可持续发展的影响,运用层次分析法赋予其权重,通过模糊综合评价法对其做出综合评价,评价方法具有一定的适用性。

针对目前两个蓄滞洪区可持续发展过程中存在的问题,通过构建可持续发展的模糊综合评价模型对蓄滞洪区进行现状评价和情景预测。三次情景可持续发展的结果对比分析结果显示,蓄滞洪区的可持续发展要朝着调整种植结构、打造特色养殖模式和湿地保护方向发展,同时满足经济发展、防洪及生态需求,并针对目前两个蓄滞洪区可持续发展过程中存在的问题,提出了相应的可持续发展的建议和对策。

由于缺乏标准的生态系统服务价值评价指标体系,实际值与估算值之间仍存在一定偏差,后续进一步对不同评价方法进行比较和交叉验证,以提高评价的准确性。同时在指标选取方面,应开展更多的调研与分析选取更为完善的指标。

参考文献:

- [1] 叶明,杨志峰,刘昌明.蓄滞洪区可持续发展评价指标体系研究[J].中国水利,2001(3):29-30,5.
- [2] 申莹.基于模糊综合评价的环境可持续性评价指标体系构建研究[J].环境科学与管理,2021,46(8):180-184.
- [3] 朱静儒.南四湖生态湿地型蓄滞洪区可持续发展评价研究[D].济南:济南大学,2014.
- [4] ZHANG P, FENG G Q. Application of fuzzy comprehensive evaluation to evaluate the effect of water flooding development[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, 8(4): 1455-1463. DOI: 10.1007/s13202-018-0430-y.
- [5] 梁翔,朱积军,罗优,等.基于改进AHP法的蓄滞洪区可持续发展模糊评价[J].人民长江,2020,51(5):17-21. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.05.003.
- [6] 罗冬林,陈文喆.基于隶属度函数的地方政府间合作信任测度研究:以南昌、九江、宜春空气污染合作治理为例[J].东华理工大学学报(社会科学版),2020,39(6):524-529.
- [7] 朱积军,吕辉,简鸿福,等.模糊综合评判在蓄滞洪区可持续发展水平评价中的应用[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):229-234.
- [8] ZHANG X Q, HE S Y, YANG Y. Evaluation of wetland ecosystem services value of the Yellow River delta[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(6): 352-353. DOI: 10.1007/s10661-021-09116-9.

- [9] THAPA S, WANG L H, KOIRALA A, et al. Valuation of ecosystem services from an important wetland of Nepal: A study from Begnas watershed system[J]. *Wetlands*, 2020, 40(5): 1071-1083. DOI: [10.1007/s13157-020-01303-7](https://doi.org/10.1007/s13157-020-01303-7).
- [10] 张秀峰. 辽宁省湿地生态系统服务功能价值评估[J]. *辽宁林业科技*, 2023(2): 21-25,52.
- [11] 丁俊, 曹敏, 孙冠, 等. 浙江松阴溪湿地公园生态系统服务价值评估[J]. *湿地科学与管理*, 2023, 19(4): 54-58,68.
- [12] 周文昌, 张维, 胡兴宜, 等. 湖北省湿地生态系统的服务价值评估[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 305-311,364. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.040](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.040).
- [13] 宁潇, 吴伟志, 胡咪咪, 等. 浙江省滨海湿地生态系统服务功能价值初步研究[J]. *湿地科学与管理*, 2016, 12(4): 22-26.
- [14] 马佳吟. 洞庭湖湿地生态系统服务价值与生态补偿机制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [15] 左凌霄. 城市湿地生态系统服务价值评估[D]. 南昌: 江西财经大学, 2021. DOI: [10.27175/d.cnki.gjxcu.2021.001360](https://doi.org/10.27175/d.cnki.gjxcu.2021.001360).
- [16] 邓紫君, 刘鑫, 祖浩然, 等. 湖南省森林型国家级自然保护区森林生态系统服务功能价值评估[J]. *湖南林业科技*, 2023, 50(4): 72-80.
- [17] 李胜男. 迁西县农田生态系统服务价值核算研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [18] LY/T 1721—2008, 森林生态系统服务功能评估规范[S].
- [19] 张飞雪. 丹江口库区农田生态强化的生态系统服务价值评估[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. DOI: [10.27010/d.cnki.gdbnu.2022.000197](https://doi.org/10.27010/d.cnki.gdbnu.2022.000197)
- [20] 马国强, 王亚萍, 李秋洁, 等. 玉溪市湿地生态系统服务价值评估研究[J]. *林业建设*, 2022(3): 18-23.
- [21] 武亦可. 太原市湿地生态系统服务价值评估[D]. 太原: 山西财经大学, 2021. DOI: [10.27283/d.cnki.gsxcc.2021.000454](https://doi.org/10.27283/d.cnki.gsxcc.2021.000454)
- [22] 关成达, 李娜, 俞茜, 等. 基于组合赋权法的蓄滞洪区建设与管理评估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 97-107. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.009](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.009).
- [23] 季红飞, 沈菊琴, 谢函. 防洪社会经济效益量化初步构架[J]. *人民黄河*, 2005(12): 10-12.
- [24] 张晓蕾, 雷添杰, 宋豫秦, 等. 基于情景分析的蓄滞洪区土地利用方式优化模拟研究: 以蒙洼蓄洪区为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 55-66. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0034](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0034).
- [25] 王翔, 李兴学, 郭健玮, 等. 妥善处理蓄滞洪区建设与经济发展的关系: 蓄滞洪区经济社会发展状况及扶持政策调研报告[J]. *中国水利*, 2015(1): 55-57.
- [26] 王开荣. 蓄滞洪区植物生态修复技术: 以全椒县荒草圩蓄滞洪区为例[J]. *安徽林业科技*, 2016, 42(3): 27-29.
- [27] 王艳艳, 李娜, 俞茜, 等. 我国蓄滞洪区建设管理问题及措施研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(4): 1-7. DOI: [10.16867/j.issn.1673-9264.2022124](https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2022124).
- [28] 夏军, 陈进. 从防御2020年长江洪水看新时代防洪战略[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(1): 27-34.

Evaluation of sustainable development of flood storage area based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method

Ji Jinxue¹, WANG Le², YAO Wei², LIU Yong³, WANG Yuhui¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Huangcaowei is a national-level storage and detention zone in the Chu River basin. The two regions serve a dual function for flood control by retaining excess water and ensuring the survival and development of local residents by water supply. The reality of a growing population and limited land has given rise to a multifaceted role for flood storage areas in China, encompassing flood control and development. In addition, the flood storage area also possesses ecological functions such as climate regulation, which bestows unique ecological service functions and economic value. Therefore, we should correctly deal with the relationship between flood control, development and ecological environmental protection in these regions, maintain and maximize the functions and benefits of the flood storage area, putting flood storage areas on a gradual path to sustainable use.

Taking these two flood storage areas as case studies, an assessment of their ecological service value is conducted, mainly including values of climate regulation, water purification, air purification, soil conservation, carbon fixation, biodiversity and scientific research and education. Various accounting methods, including the

alternative cost method and outcome parameter method, are applied to evaluate the value of each service. Accurate quantification of the ecosystem's service value facilitates the integration of ecological benefits into the economic and social development evaluation system. On the basis of calculating the value of regional ecosystem services, evaluation indicators are constructed for the sustainable development of flood storage and detention areas from three aspects: flood prevention, economic and ecological functions. The sustainable development level of flood storage and detention areas are evaluated by AHP-fuzzy comprehensive evaluation method, incorporating weights assigned by the AHP method and comprehensive evaluation is made by fuzzy comprehensive evaluation method. According to the evaluation results, the relationship between flood control, economy and ecology is coordinated to maximize the comprehensive benefits of various functions of the flood storage area and realize the sustainable development of the flood storage area.

Meanwhile, scenario analysis and development prediction for the future state of the flood storage area are carried out to provide a reference for the quantitative evaluation of ecological benefits and sustainable development of the flood storage area. The results show that the sustainable development level of the Huangcaoweis are general, which basically accords with the development pattern in the polder area. A reduction in the ecological function of farmland and wetlands at the current stage of flood storage area development would lower its sustainability. Conversely, if the flood storage area shifts toward farmland ecological transformation and expansion of wetland areas, its sustainable development level could surpass the current stage.

Finally, the challenges encountered during the sustainable development process are addresses in the two flood storage areas and proposes corresponding suggestions and countermeasures. To alleviate issues related to regional water withdrawal challenges, it is recommended to expedite water withdrawal through drainage ditch dredging and drainage station construction. For this kind of flood storage area where agricultural development takes precedence, adjustments to the crop planting structure are suggested, planting crops with high economic value and good water resistance to optimize and adjust the land use mode in the flood storage area, and to reduce the flood disaster losses. Leveraging the region's advantages, an emphasis on ecological farming is encouraged to establish a distinctive farming model. Developing ecological wetlands and agricultural sightseeing projects according to local conditions, the region's vital ecological role can be maximized, and striving to achieve sustainable development of the region.

Key words: flood storage area; sustainable development; ecological value accounting; indicator system; fuzzy comprehensive evaluation