doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.058

# 河套灌区水-地-粮食-生态竞争发展协调关系演变规律

王友芝[1,2]　刘兵兵[1,2]　张　汉[1,2]　王　楠[1,3]　韩金旭[1,2]

(1.黄河水利委员会黄河水利科学研究院,郑州 450003;2.黄河实验室,郑州 450003;
3.河海大学农业科学与工程学院,南京 210098)

**摘要**:为定量揭示农田-生态系统用水和用地竞争协调关系,识别水-农田和水-生态系统协调与发展均衡关系,为灌区水土资源科学管理提供理论依据,本文构建了基于信息熵的可持续模型、Lotka-Volterra 模型,耦合水足迹和生态足迹,量化水-粮食、水-生态系统协调和发展的均衡状态,识别粮食-生态系统用水和用地协同/竞争程度及演变规律,解析渠系灌溉下渗蓝水足迹、化肥使用灰水足迹以及粮食生态足迹对粮食-生态用水和用地竞争关系的贡献程度。结果表明,河套灌区水-粮食系统和水-生态系统均处于高发展-低协调状态,且水-生态不协调发展趋势相较于水-粮食更为明显;粮食用水和用地均以牺牲生态用水和用地为代价;渠系灌溉水量下渗能缓解粮食-生态用水竞争 4% ~6%,粮食作物生态价值能缓解粮食-生态用地竞争 2% ~42%。研究结果可为灌区水土资源协同调控与粮食-生态可持续发展提供理论依据。

**关键词**:河套灌区;水-地-粮食-生态;基于信息熵的可持续模型;Lotka-Volterra 模型;生态足迹

**中图分类号**:TV213.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0677-09　　**OSID**:

# Evolution Rules of Competition, Development and Coordination of Water-Land-Food-Ecology for Hetao Irrigation District

WANG Youzhi[1,2]　LIU Bingbing[1,2]　ZHANG Han[1,2]　WANG Nan[1,3]　HAN Jinxu[1,2]

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou* 450003, *China*
2. *Yellow River Laboratory, Zhengzhou* 450003, *China*
3. *College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

**Abstract**: Aiming to quantitatively disclose water and land resources competitions of food-ecology system, and explore balance relationship between coordination and development of water-food, and water-ecology system, further support scientific management of water and land resources, a framework integrating water footprint, ecological footprint with sustainable development model and Lotka-Volterra model was formulated. It can quantify balance states of coordination and development of water-food, and water-ecology system. Besides, it can identify competition and coordination of water and land usages of food-ecology system, and corresponding evolution rules. Moreover, it can explain contributions of canal water infiltration, fertilizer usage, crop planting on competition or coordination degrees of food-ecology system. The results showed that water-food system and water-ecology system were all in high development and low coordinate state and unbalance degree of water-ecology system was higher than that of water-food system. Water and land usage of food system was expense of these of ecology system. Canal water infiltration could relieve water competition of food-ecology system by 4% ~6%, and crop planting could alleviate land competition of food-ecology system by 2% ~42%. The results could support water and land resources allocation and sustainable food and ecology development.

**Key words**: Hetao Irrigation District; water-land-food-ecology; entropy-based sustainable development model; Lotka-Volterra model; ecological footprint

收稿日期:2024-11-21　修回日期:2025-03-24

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300)和河南省青年科学基金项目(242300420344)

**作者简介**:王友芝(1993—),女,高级工程师,博士,主要从事水资源优化配置研究,E-mail:2587804769@qq.com

## 0 引言

河套灌区是我国重要的粮食生产基地,也是北方防沙带的重要组成部分,在保障我国粮食和生态安全方面具有重要意义[1-2]。灌区水资源禀赋不足,粮食和生态用水矛盾突出,水资源成为遏制灌区粮食和生态协调可持续发展的主要因素之一[3-4]。灌区耕地与北方防沙带存在部分重叠面积,粮食和生态用地存在矛盾,加之两者水量冲突使得粮食和生态用地矛盾更为突出[5]。厘清灌区水-地-粮食-生态的竞争、发展和协调规律对于灌区粮食-生态协调可持续发展和水土资源优化配置具有重要意义。

灌区水-地-粮食-生态系统协调发展是灌区可持续发展的重要目标之一,系统内部及之间要素处于不断调整变化状态,发展度和协调度具有动态演化特征[6-7]。耦合协调度模型能反映具有耦合作用的多个系统的良性耦合协调程度,目前已广泛应用在水资源、能源、粮食及生态等领域[8-10]。然而其较难定位耦合系统的不协调因素,以及与协调度相对应的发展度。协调度与发展度是衡量系统均衡发展的重要指标,由于水-粮食-生态系统产出与投入不匹配往往导致高发展-低协调等状态。为识别耦合系统的协调和发展状态,相关学者构建了基于信息熵的可持续发展模型,通过信息熵和生产可能性曲线量化输入资源与输出系统间的函数关系,进而确定耦合系统协调度和发展度[11-12]。水资源是干旱灌区粮食和生态系统的重要输入资源,粮食和生态大多存在用水竞争,极可能存在水-粮食、水-生态系统发展度与协调度不均衡状态,然而水-粮食、水-生态系统发展度和协调度的均衡关系尚不完全清晰,而且较难处理两个输出系统间(粮食、生态系统)的竞争或协同关系。河套灌区粮食与生态用水用地均存在矛盾,随着时间推移,粮食与生态用水和用地协同或竞争关系以及演化过程尚没有成熟定论[13-14]。水-能源-粮食纽带协同与竞争评估方法已初步建立,其通过 Lotka - Volterra 模型,结合水足迹量化了能源和粮食的用水竞争/协同关系[15-16]。上述方法仅量化系统间用水竞争,却未涉及用地竞争量化。生态足迹是量化各类资源用地关系的一种表征方法[17-20],因此,可将水足迹、生态足迹以及 Lotka - Volterra 模型结合用于判定灌区粮食-生态用水和用地协同/竞争关系。另外,灌区渠系水量下渗、秋浇、春灌等对生态用水具有补充作用,能在一定程度上缓解粮食-生态用水矛盾,进而影响粮食-生态用水竞争/协同状态;农田耕地虽占据一部分防护林面积,但作物生长期内具有一定的生态服务价值,能缓解粮食-生态用地矛盾[21-25]。但上述影响因素对粮食-生态用水/用地协同/竞争关系的影响尚不清晰。

因此,本文通过构建基于信息熵的可持续发展模型,评估水-粮食系统、水-生态系统发展度和协调度以及发展和协调的均衡状态,构建 Lotka - Volterra 模型、水足迹和生态足迹识别粮食-生态系统用水、用地协同或竞争关系,对比基于信息熵的可持续发展模型与耦合协调度模型,研究粮食灌溉及生态价值对粮食-生态用水、用地竞争的驱动作用。

## 1 研究方法

### 1.1 基于信息熵的可持续发展模型

采用信息熵计算水资源-粮食-生态系统中输入变量与输出变量间发展度和协调度。

#### 1.1.1 信息熵

信息熵能衡量系统复杂度,系统越有序,信息熵越低,系统越无序,信息熵越高。由于指标体系中指标量纲不同,首先对指标进行归一化处理,针对正向指标和负向指标归一化处理方法为

$$q_{ij}=\begin{cases}x_{ij}/\max(x_{ij}) & \text{(正向指标)}\\ \min(x_{ij})/x_{ij} & \text{(负向指标)}\end{cases} \tag{1}$$

式中 $x_{ij}$——水资源-粮食-生态系统指标 $i$ 在年份 $j$ 取值

$q_{ij}$——指标 $i$ 在年份 $j$ 归一化值

信息熵计算公式为

$$S_i=-\frac{1}{\ln n}\sum_{s=1}^{s}u_{si}\ln u_{si} \tag{2}$$

其中

$$u_{si}=q_{si}/q_i \tag{3}$$

式中 $n$——指标数量

$q_i$——指标和值

$u_{si}$——子系统 $s$ 指标 $i$ 占该指标比重

$q_{si}$——子系统 $s$ 指标 $i$ 归一化值

水-粮食系统和水-生态系统指标体系如表 1 所示。

#### 1.1.2 发展度

信息熵仅能反映系统进化方向,不能反映系统可持续发展水平。因此,采用基于信息熵的评分方法确定系统发展度。发展度能衡量输入系统和输出系统间的发展程度。输入-输出系统发展度计算式为

$$y_1=a-x_1^3 \tag{4}$$

式中 $x_1$——水资源输入系统评分,取 0 ~ 1,值越大,说明水资源投入越多

$y_1$——粮食或生态输出系统评分,取 0 ~ 1,值越大,说明系统输出越多

$a$——发展度,取 0 ~ 1,值越大,说明水-粮食或水-生态系统发展度越高

**表 1　水-粮食、水-生态系统评价指标体系**

**Tab. 1　Indicators of water - food system and water - ecology system**

| 系统 | | 指标 | 指标计算方法或来源 | 属性 |
|---|---|---|---|---|
| 水-粮食系统 | 水资源子系统 | 灌区总耗水量($m^3$) | 引水量与排水量差值 | 正 |
| | | 地下水用水量($m^3$) | 统计数据 | 正 |
| | | 净引黄水量($m^3$) | 统计数据 | 正 |
| | | 降水量($m^3$) | 统计数据 | 正 |
| | | 下渗水量($m^3$) | 灌溉水量×(1-灌溉水利用系数) | 负 |
| | 粮食子系统 | 灌溉定额($m^3/hm^2$) | 统计数据 | 正 |
| | | 粮食总产量(kg) | 统计数据 | 正 |
| | | 有效灌溉面积($hm^2$) | 统计数据 | 正 |
| | | 粮食单方水产量($kg/m^3$) | 产量与水量比值 | 正 |
| 水-生态系统 | 水资源子系统 | 下渗水量($m^{3)}$) | 灌溉水量×(1-灌溉水利用系数) | 正 |
| | | 降水量($m^3$) | 统计数据 | 正 |
| | | 乌梁素海生态补水量($m^3$) | 统计数据 | 正 |
| | | 地下水用量($m^3$) | 统计数据 | 负 |
| | 生态子系统 | 乌梁素海水矿化度(g/L) | 统计数据 | 负 |
| | | 地下水矿化度(g/L) | 统计数据 | 负 |
| | | 林草面积($hm^2$) | 统计数据 | 正 |
| | | 乌梁素海面积($hm^2$) | 遥感数据 | 正 |

### 1.1.3　协调度

协调度表示水资源输入系统与粮食或生态输出系统的协调程度，系统协调度计算式为

$$b=\begin{cases}\dfrac{1}{\eta} & (\eta>1)\\ \eta & (\eta\leqslant 1)\end{cases} \tag{5}$$

式中　$\eta$——中间变量

$b$——协调度，取 0 ~ 1，值越大，说明水-粮食系统或水-生态系统协调度越高，水资源输入和粮食/生态产出越趋近于均衡

图 1 为发展度和协调度区域划分。图 1b 中正方形区域被 3 条曲线划分为 4 部分等量区域，曲线分别为 $y_1=1/2-x_1^3$，$y_1=3/4-x_1^3$ 和 $y_1=1-x_1^3$，其中，$y_1$ 可反映耗水系统对水资源子系统的相对压力，$x_1$ 可反映水资源子系统支撑耗水系统压力的能力。基于 3 条曲线和 4 个等分区域，将发展度划分为 4 种水平，分别为勉强发展(Ⅳ)、基本发展(Ⅲ)、良好发展(Ⅱ)、非常好发展(Ⅰ)。曲线 $A$、$B$、$C$ 是发展函数在 $x-y$ 平面上的投影。图 1c 中正方形区域被 3 条曲线划分为 4 个区域，3 条曲线分别为 $y_2=x_2$，$y_2=x_2^3$ 和 $y_2=x_2^{1/3}$，其能反映粮食子系统和生态系统分别与水资源子系统协调度，划分等级分别为强烈粮食生产压力(Ⅱ)、适度粮食生产压力(Ⅰ)、适度水资源压力(Ⅰ′)、强烈水资源压力(Ⅱ′)。

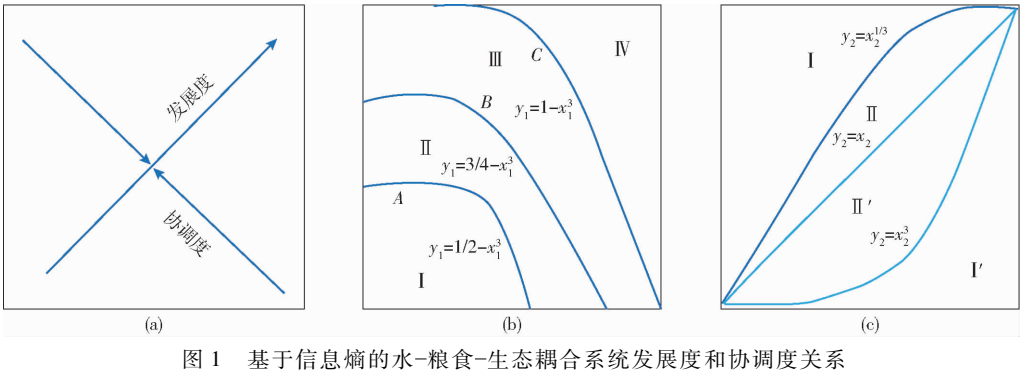



图 1　基于信息熵的水-粮食-生态耦合系统发展度和协调度关系

Fig. 1　Development degree and coordinated degree of coupled water - food - ecology system based on information entropy

计算两系统间发展度与协调度步骤如下：①收集输入水资源子系统得分 $x_2$ 和粮食子系统或生态子系统得分 $y_2$。②基于式(4)，计算水资源子系统与粮食子系统或生态子系统发展度 $a$。③基于 $y_2=x_2^{\eta}$ 计算中间变量 $\eta$，然后根据式(5)计算水资源子系统与粮食子系统或生态子系统协调度 $b$。

根据发展度和协调度，共划分 16 等级，结果如图 2 所示。

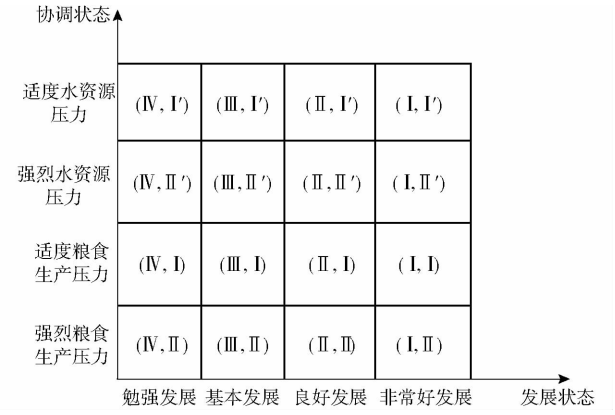



图 2 发展度和协调度等级划分结果

Fig. 2 Division results of development degree and coordinated degree

图 2 表明发展度-协调度组合包含 16 种结果，根据水资源输入与粮食或生态系统输出不匹配程度，划分为适度与强烈的输入压力和输出压力；根据输入系统和输出系统组合，划分为勉强、基本、良好和非常好发展。

### 1.2 协同竞争评估方法构建

采用生态 Lotka - Volterra 模型评估粮食和生态水量以及土地的协同竞争关系，用于描述一个生态系统中粮食和生态用水和用地随时间的演化，进而基于进化理论，构建协同竞争评估方法。采用水足迹表征粮食和生态用水，生态足迹表征粮食和生态用地。粮食蓝水足迹为灌溉耗水，生态蓝水足迹包括下渗蓝水和生态补水蓝水，原因在于河套灌区是生态型灌区，粮食灌溉引水过程中渠系水量下渗会补给地下水，进而补充生态需水。粮食生态足迹为灌区作物种植面积，生态系统生态足迹主要为林草、乌梁素海面积，以及作物生态效益部分的相应作物种植面积。Lotka - Volterra 模型计算公式为

$$\frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t}=r_1F(t)\left(1-\frac{F(t)}{K_1(t)}-\frac{\alpha E(t)}{K_1(t)}\right) \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t}=r_2E(t)\left(1-\frac{E(t)}{K_2(t)}-\frac{\beta F(t)}{K_2(t)}\right) \tag{7}$$

式中 $r_1$、$r_2$ 分别表示粮食和生态子系统的用水量或面积年增长速率；在计算粮食和生态系统的用水冲突时，$F(t)$、$E(t)$ 分别表示粮食和生态子系统年用水量，粮食用水为灌溉水量，生态用水为灌溉下渗量和生态补水量($m^3$)；在计算粮食和生态系统用地冲突时，$F(t)$、$E(t)$ 分别表示粮食和生态子系统占地面积，粮食用地为农田面积，生态用地为林草、农田和乌梁素海面积($hm^2$)；$t$ 为时间尺度，此处为年尺度；$K_1$、$K_2$ 分别表示粮食和生态子系统最大的可利用水资源量($m^3$)或者土地资源量($hm^2$)。$\alpha$、$\beta$ 分别表示竞争系数，表征一个子系统对另一个子系统的影响。通过求解 Lotka - Volterra 模型，可得到参数 $\alpha$、$\beta$，其取值正负及表示粮食-生态用水和用地竞争和协同关系意义如表 2 和图 3 所示。

**表 2 $\alpha$ 和 $\beta$ 表示系统竞争和共生关系类型**

**Tab. 2 Competition and symbiosis types of systems represented by $\alpha$ and $\beta$**

| $\alpha$ | $\beta$ | 类型 | 意义 |
|---|---|---|---|
| + | + | 竞争关系 | 两个系统均受到对方负向影响 |
| + | - | 阻碍关系 | 一个系统发展以牺牲另一个系统为代价 |
| - | - | 共生关系 | 两个系统处于共生或双赢状态 |

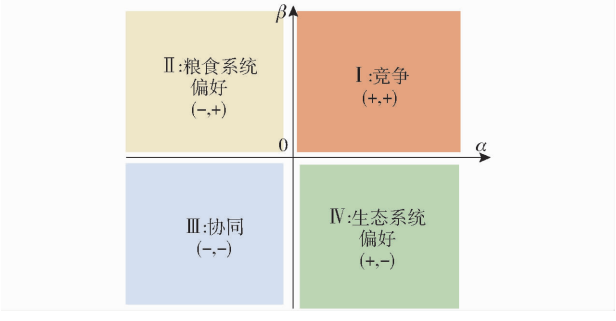



图 3 粮食-生态耦合系统用水和用地协同和竞争类型

Fig. 3 Cooperation and competition of water and land usages of food - ecology system

在通过 $\alpha$ 和 $\beta$ 判定农业与生态竞争或协同关系的基础上，通过竞争与协同指数(CSI)进一步量化竞争与协同程度，计算公式为[15]

$$CSI=\frac{\alpha+\beta}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}} \tag{8}$$

CSI 取值范围为$[-\sqrt{2},\sqrt{2}]$，值越小，说明两个系统共生程度越高，值越大，说明系统竞争越激烈。$CSI\in[-\sqrt{2},-1]$表示互惠互利，$CSI\in(-1,1]$表示不和谐发展；$CSI\in(1,\sqrt{2}]$表示恶性循环[16]。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区域

河套灌区多年平均降水量为 160 mm，多年平均蒸散发量为 2 400 mm，蒸散发量远大于降水量，灌区粮食生产主要依靠于引黄灌溉。随着社会经济发展，粮食生产需求增加以及引黄水量逐年递减，粮食用水不断挤占生态用水，两者间的水量冲突关系逐渐加剧。同时，粮食生产过程中水利工程特性以及土壤特征等导致粮食用水的水量渗漏在一定程度上能够补给地下水，进而补给植被、湖泊等生态系统耗水。河套灌区水土资源、粮食和生态存在耦合互馈作用。河套灌区粮食-生态用水和用地存在竞争、发展与协调不匹配等问题，因此，亟需开展河套灌区水资源-粮食-生态纽带竞争-发展-协调演变规律。研

究区域如图 4 所示。

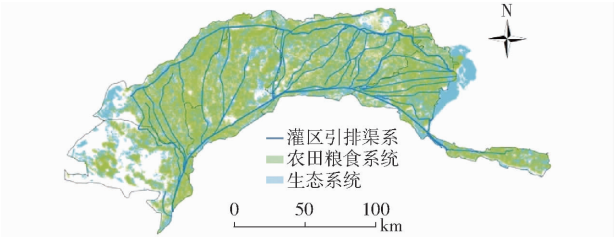



图 4　研究区域

Fig. 4　Study area

### 2.2　研究数据

河套灌区水-粮食系统、水-生态系统发展度和协调度计算需选定评价指标，指标选取准则为与粮食产能/生态价值密切相关的粮食系统指标，以及支撑粮食/生态系统的水资源指标，构建差异化水-粮食系统、水-生态系统指标选择体系。

水-粮食中输入系统为水资源子系统，表示影响粮食生产的水资源变量，输出系统为粮食子系统，表示作物生长、粮食生产的最终表现结果。根据水资源与粮食系统的关联性可知，粮食系统水资源补给来源包括降水、地表水和地下水，损失包括渠系渗漏和耗水量等。粮食子系统指标为粮食系统灌溉面积、灌溉定额、单产和总产量等。

水-生态中输入变量表示生态子系统水量输入，输出变量表示生态系统反馈的最终结果。根据水资源与生态系统关联性可知，生态系统水资源补给包括降水、渠系渗漏、生态补水，生态系统指标包括乌梁素海水矿化度、林草面积、地下水矿化度和乌梁素海面积等。

上述关键数据来源主要包括统计数据、遥感监测和公式计算。数据时间序列为 2009—2018 年，空间尺度为灌区面尺度，引水量、耗水量、作物产量和林草面积等统计数据来自巴彦淖尔水资源公报和统计年鉴；乌梁素海遥感影像来自中国科学院资源环境科学数据中心（https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx）土地利用/土地覆盖遥感监测产品，空间分辨率为 30 m，数据准确可靠。数据无缺失，所选指标体系根据水资源与粮食、水-生态系统因果关系构建，能有效表示水资源、粮食和生态多维度特征，数据完整性较好。

## 3　结果分析

### 3.1　水-粮食系统、水-生态系统发展度和协调度

基于信息熵的可持续发展模型计算河套灌区 2009—2018 年水-粮食系统和水-生态系统发展度和协调度，结果如图 5 所示。

图 5 表明，2009—2018 年河套灌区水-粮食系统发展度为 0.17～0.57，处于良好和非常好发展状态，占比分别为 0.3 和 0.7。2009—2018 水-粮食系统发展度变化趋势为由良好发展到非常好发展，原因在于粮食产量、单方水产量处于增长趋势，灌溉定额处于下降变化。水-粮食系统协调度为 0.34～0.97，处于强烈水资源压力和强烈粮食生产压力，占比为 0.9 和 0.1，表现为水资源压力为主，粮食生产压力和水资源压力交替，无明显周期变化，主要表现在 2013 年处于粮食生产压力。水-粮食系统协调度趋势为水资源压力逐渐减小，说明粮食生产与水资源投入不匹配，原因在于随着粮食生产压力增加，作物种植面积增大，进而导致灌区耗水量、用水量总量和地下水量等增加，水资源压力增大，而随着粮食节水技术、种植结构调整等，水资源压力减小，但仍处于强烈的水资源压力状态。2009—2018 年河套灌区水-生态系统发展度为 0.28～0.82，处于良好和非常好发展状态，占比分别为 0.5 和 0.5，整体发展趋势为由良好发展到非常好发展，原因在于乌梁素海面积和林草面积呈增加趋势，地下水矿化度呈减少趋势。水-生态系统协调度为 0.29～0.98，处于强烈生态压力和强烈水资源压力交替出现，占比分别为 0.4 和 0.6，2009 年、2013—2014 年、2018 年处于生态压力，表明生态功能较弱，需进一步增强生态系统的产出效能，其他时段为水资源压力，表明用于生态的水量较低。

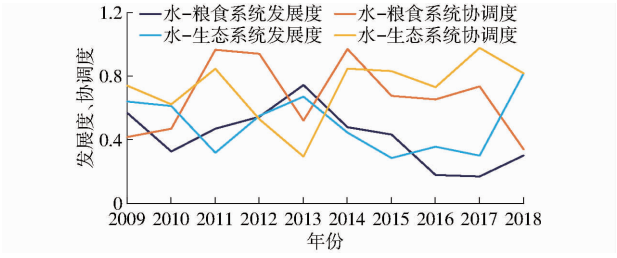



图 5　2009—2018 年水-粮食系统、水-生态系统发展度和协调度

Fig. 5　Development and coordinated degree of water－food, water－ecology system from 2009 to 2018

纵向比较水-粮食系统协调度和发展度，发展度和协调度呈互补变化趋势，当发展度高时，协调度低。粮食生产过程中，产量不断扩增，但水量也在相应增长，水与粮食的不匹配不协调发展仍存在，需进一步提高节水技术。进一步分析 2009—2018 年灌区水-粮食系统、水-生态系统发展度与协调度的匹配程度，结果如图 6（图中数字表示年份）所示。

图 6 表明，2009—2018 年河套灌区水-粮食系统大多处于良好发展-强烈水资源压力状态，且水资源压力呈减少趋势，处于高发展-低协调状态，原因主要为水资源利用效率低、种植结构不合理等。目

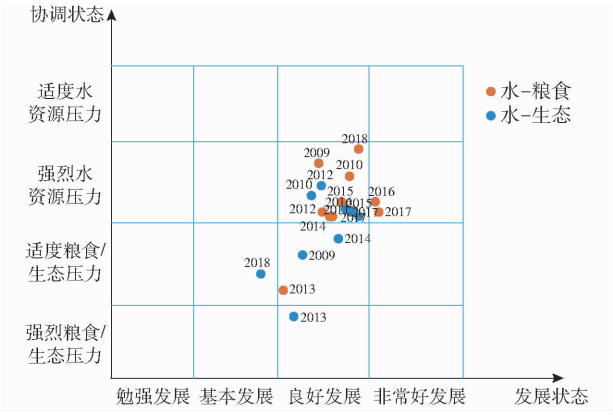



图 6 2009—2018 年河套灌区水-粮食系统、水-生态系统协调度和发展度关系

Fig. 6 Development and coordinated relationships of water - food, water - ecology system from 2009 to 2018

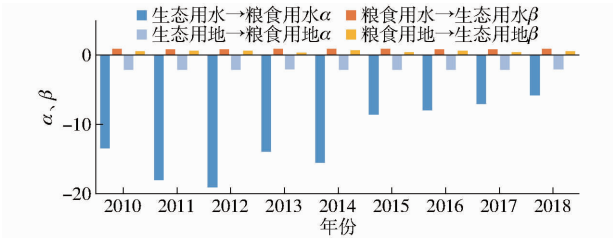



图 7 河套灌区粮食-生态用水和用地竞争系数

Fig. 7 Competition coefficient of water and land usages of food and ecology of Hetao Irrigation District

前河套灌区渠系水利用系数为 0.52,灌溉水利用系数为 0.485,渠系和田间渗漏量较大,造成一部分水量损耗。另外,灌区多采用大水漫灌等方法进行作物灌溉,造成水资源浪费。灌区主要种植作物为玉米、小麦等高耗水作物,面积为农作物总播种面积的 45%,进而导致耗水量增加。2009—2018 年河套灌区水-生态系统大多处于良好发展-强烈水资源压力和适度生态压力,处于高发展-低协调状态,原因为生态用水不足,尚不足以支撑生态功能维持。

### 3.2 灌区粮食-生态用水竞争和用地竞争关系

为揭示河套灌区粮食和生态的用水竞争和用地竞争关系,采用 Lotka - Volterra 模型,结合水足迹方法,评估竞争指数,结果如图 7 所示。

图 7 表明,2010—2018 年粮食水足迹和生态水足迹参数 $\alpha$ 均小于 0,为 -19.09 ~ -5.75,$\beta$ 均大于 0,为 0.84 ~ 0.88,表明粮食生产用水以牺牲生态用水为代价。原因为随着粮食水足迹以粮食耗水表征,粮食生产水足迹为 $2.806 \times 10^9 \sim 3.898 \times 10^9$ m$^3$,呈降低趋势。生态系统包括渠系下渗和生态补水组成的蓝水足迹,生态系统水足迹为 $2.00 \times 10^8 \sim 5.39 \times 10^8$ m$^3$,呈升高趋势。2010—2018 年粮食生态足迹和生态足迹参数 $\alpha$ 均小于 0,为 -2.13 ~ -2.02,$\beta$ 均大于 0,为 0.22 ~ 0.66,表明粮食生产用地主要以牺牲生态用地为代价。粮食生态足迹包括粮食灌溉面积组成的生态足迹,粮食生态足迹为 $7.871 \times 10^5 \sim 8.105 \times 10^5$ hm$^2$,呈微弱降低变化趋势。生态系统生态足迹由林草面积、乌梁素海面积和粮食折算面积组成,为 $8.427 \times 10^5 \sim 8.665 \times 10^5$ hm$^2$,呈减少趋势。乌梁素海面积扩大,林草面积缩减,粮食面积减小,整体生态足迹减小。

通过比较粮食-生态用水和用地 CSI,进而比较用水竞争和用地竞争差异,结果如表 3 所示。粮食-生态用水和生态用地 CSI 为 -1.10 ~ -0.71,表现为趋近于协同,协同程度逐渐降低,粮食和生态用地竞争更为激烈。比较用水竞争和用地竞争,用水竞争比用地竞争更为激烈。通过比较粮食用水和生态用水 CSI 绝对值和生态用地 CSI 绝对值,两者绝对值差值为 0.21 ~ 0.29,表明用水竞争比用地竞争更为激烈,2016 年粮食与生态用地竞争 CSI 绝对值小于粮食和生态用水 CSI 绝对值,原因为 2016 年乌梁素海面积降低,使得生态系统总体面积降低。

**表 3 灌区粮食-生态用水和用地 CSI**

**Tab. 3 CSI of water and land usages of food - ecology system**

| 参数 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CSI(粮食-生态用水) | -0.93 | -0.95 | -0.95 | -0.93 | -0.94 | -0.89 | -0.89 | -0.87 | -0.84 |
| CSI(粮食-生态用地) | -0.71 | -0.87 | -0.84 | -0.81 | -0.65 | -0.81 | -1.10 | -0.78 | -0.72 |

## 4 讨论

### 4.1 与耦合协调度模型比较

目前学者多采用耦合协调度模型量化水资源-粮食系统、水资源-生态系统的协调状态和耦合程度[8-10]。信息熵模型在耦合协调度模型的基础上,不仅量化两系统耦合协调状态,进一步分析了两系统不协调的内在原因,此外,进一步采用发展度衡量系统的相对发展程度,将系统划分为勉强、基本、良好和非常好发展状态。通过 2009—2018 年水-粮食系统、水-生态系统协调度和发展度关系可知,两子系统处于良好/高发展-低协调状态。在衡量粮食与水资源、生态与水资源的协调和发展不平衡关系的基础上,进一步引入 Lotka - Volterra 模型识别并表征粮食-生态用水/用地竞争关系,与信息熵模型量化的水-粮食系统、水-生态系统协调形成一个完成

的整体。通过比较耦合协调度模型和基于信息熵的可持续发展模型，比较本文构建模型的优势，结果表明采用基于信息熵的可持续发展模型与耦合协调度模型的水-粮食系统协调度和水-生态系统协调度存在差异，前者计算值大于后者，而基于信息熵的可持续发展模型未划分协调性等级，仅以 1 作为最优协调度，重点量化粮食与水资源间的亏缺与盈余状态，进而判定粮食和水资源压力等级，当两系统中任一系统与另一系统不匹配时即发生压力。信息熵发展模型更趋近于水资源与粮食的均衡，两者越均衡，越趋近于 1，协调度越大，与耦合协调度模型原理一致，差异在于耦合协调度模型考虑了水资源与粮食子系统的综合指数权重，基于信息熵的协调度模型能识别水资源和粮食状态，当水资源投入多，而粮食生产少时，则会存在粮食生产压力，结合生产可行性曲线，根据粮食与水资源的比值差异等级，划分出强烈和适度粮食生产压力；反之，当水资源投入少，而粮食生产多时，则提示水资源承载力不足，划分为强烈和适度水资源压力。相较于耦合协调度模型，基于信息熵的可持续发展模型除能反映协调度外，还能量化系统发展度，进而衡量协调度和发展度的均衡关系，具有更大优势。然而，基于信息熵的可持续发展模型假设系统间关系为线性和静态统计关系，采用静态指标从统计意义上量化水-粮食、水-生态系统的关联关系，较少反映系统间动态耦合，需进一步研究与刻画水-粮食、水-生态系统的物理关联。另外，指标对水-粮食、水-生态系统协调度和发展度结果影响较大，而指标随着气候变化和人类活动影响具有不确定性，需进一步识别表征参数不确定性特征，分析不确定性对系统发展度和协调度的影响。结合输入参数变化特征，采用区间数表征水-粮食、水-生态系统输入参数不确定性，量化对系统发展度和协调度结果的影响。以 2018 年水-粮食系统发展度和协调度为例，其值分别为 0.30 和 0.34，如果系统输入参数为区间数，例如用水总量为$[4.8\times10^9, 5.4\times10^9]$ $m^3$，则发展度和协调度分别为[0.30,0.36]和[0.34,0.41]，相较于确定的输入参数，以区间数表征的输入参数和相应的输出结果能涵盖更多信息，减少数据不确定性对结果带来的影响。

### 4.2　渠系下渗和农田生态价值下粮食-生态协同竞争关系

针对粮食-生态用水关系量化，目前采用生态水文模型、多目标优化方法、灰色系统模型、水足迹等建立粮食生产用水与生态用水间关联和转换关系[26-28]，但却难以刻画粮食和生态用水协调或竞争程度。采用土地利用变化矩阵、生态服务价值、弹性系数、多目标优化等分析耕地与生态转换关系、农业扩张对生态系统的敏感性、优化粮食与生态系统功能的平衡等[29-30]，但较少刻画粮食和生态用地竞争水平。本文采用 Lotka - Volterra 模型，通过分析粮食和生态系统偏好、竞争与协同关系，进一步量化两者用水/用地竞争与协同程度。此外，该模型还能分析灌溉过程中渠系下渗或肥料使用对粮食-生态用水竞争关系的影响程度，以及粮食作物生态价值抵消的生态面积。

为揭示灌溉过程中渠系下渗或肥料使用对粮食-生态用水竞争关系的影响程度，以及粮食作物生态价值抵消的生态面积，分别增设 3 种情景（情景 2（S2）为仅考虑生态补水不考虑下渗水量，粮食和生态用水竞争关系；情景 3（S3）为考虑下渗水量，肥料产生的灰水足迹和生态补水，粮食和生态用水竞争关系；情景 4（S4）为不考虑粮食生态价值，仅考虑林草、乌梁素海生态价值，粮食和生态用地竞争关系），并与初始情景（情景 1（S1），考虑渠系下渗和生态补水，粮食生态价值）进行比较。4 种情景下粮食-生态用水、用地竞争关系如表 4 和图 8 所示。

**表 4　2010—2018 年 4 种情景下粮食-生态用水竞争和用地竞争**

**Tab. 4　Water and land usages of food - ecology system under four scenarios from 2010 to 2018**

| 情景 | 参数 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | α（用水竞争） | -13.45 | -17.98 | -19.09 | -13.88 | -15.54 | -8.53 | -7.97 | -7.06 | -5.75 |
| S1 | β（用水竞争） | 0.87 | 0.84 | 0.85 | 0.88 | 0.86 | 0.88 | 0.85 | 0.85 | 0.88 |
| S1 | α（用地竞争） | -2.07 | -2.07 | -2.09 | -2.02 | -2.08 | -2.13 | -2.10 | -2.09 | -2.03 |
| S1 | β（用地竞争） | 0.54 | 0.26 | 0.31 | 0.37 | 0.66 | 0.38 | -0.22 | 0.43 | 0.52 |
| S2 | α（用水竞争） | -45 | -507 | -38147 | -60 | -46 | -15.91 | -14.22 | -13.41 | -8.16 |
| S2 | β（用地竞争） | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 |
| S3 | α（用水竞争） | -13.43 | -17.96 | -19.06 | -13.86 | -15.52 | -8.53 | -7.96 | -7.06 | -5.75 |
| S3 | β（用地竞争） | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.91 | 0.90 | 0.91 | 0.89 | 0.90 | 0.91 |
| S4 | α（用水竞争） | -13.84 | -13.97 | -13.92 | -13.43 | -14.44 | -15.04 | -14.09 | -14.19 | -11.91 |
| S4 | β（用地竞争） | 0.95 | 1.55 | 2.50 | 0.01 | 1.01 | 0.45 | 1.16 | 0.77 | 0.93 |

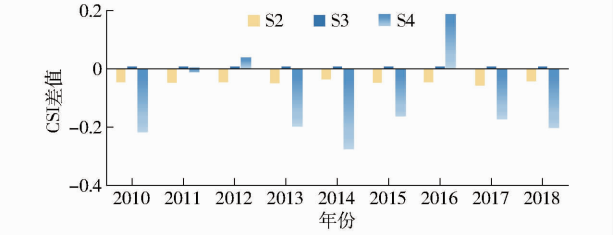



图 8 3 种情景下粮食-生态 CSI 差值

Fig. 8 CSI differences of food - ecology system under three scenarios

表 4 表明,相较于 S1 情景,S2 情景不考虑下渗水量时,$\alpha$ 为负值,且越来越小,$\beta$ 为正值,且越来越大,CSI 绝对值呈增加趋势,2010—2018 年竞争关系逐渐减小。CSI 减小幅度为 0.04 ~ 0.05,下渗对 CSI 的贡献率为 4% ~6%,即粮食灌溉过程中渠系下渗能减少竞争程度 4% ~6%。S3 情景下,考虑化肥使用产生的灰水足迹,相当于在现有生态用水的基础上进一步减少生态用水量,$\alpha$ 为负值,且越来越小,$\beta$ 为正值,在 0.9 附近变化,相较于 S1 情景,CSI 绝对值呈微弱增加趋势,用水竞争更为激烈,2010—2018 年竞争关系逐渐减小,化肥使用仅在很小程度上增加粮食和生态的用水竞争关系,化肥使用对粮食和生态的用水竞争可忽略不计。S4 情景下,不考虑粮食生态价值,$\alpha$ 为负值,且越来越小,$\beta$ 为正值,呈现先增后减后增趋势,相较于 S1 情景,CSI 绝对值增加 0.01 ~ 0.28,说明粮食生态用水对粮食-生态用地的贡献率达 2% ~42%,粮食生态价值在粮食-生态协同方面发挥重要作用。

Lotka - Volterra 模型中假定环境承载力固定,而水资源受到气候变化和人类活动影响呈动态变化,且假定模型为确定性模型,难以反映环境参数等不确定性对模型结果的影响。因此,需进一步反映参数不确定性以及水资源承载力变化对模型结果的影响。结合黄河流域天然径流量衰减趋势,且随着灌区节水改造推进,河套灌区引黄水量减少,设置不同的引黄水量指标,分析粮食和生态用水竞争。经计算不同引黄水量减少情景下 CSI 指数为 -0.89 ~ -0.81,相较于 2010—2018 年的 CSI 取值(-0.95 ~ -0.84),粮食和生态用水竞争更为激烈。粮食和生态竞争压力主要通过提高水资源利用效率和合理配置农业、生态面积规模。一方面从渠系-田间环节提升农业水资源利用效率,农业水资源利用效率提升可通过提高渠系水利用系数、节水灌溉(滴灌、喷灌)、降低作物灌溉定额等措施进行水量灌溉,调整种植结构,降低高耗水作物比例。另一方面农业和生态面积规模调整可从粮食和生态安全保障角度,优化调整农业种植结构和生态空间结构与布局。

## 5 结束语

构建了基于信息熵的可持续发展模型用于衡量水-粮食系统、水-生态系统发展度与协调度;利用 Lotka - Volterra 模型、水足迹和生态足迹定量揭示粮食-生态系统的用水/用地竞争关系;探究粮食灌溉以及作物生态价值对于粮食-生态用水/用地竞争的驱动作用。结果表明:河套灌区水-粮食系统和水-生态系统处于良好发展状态和水资源承载力不足,即高发展-低协调状态,且水-生态不协调发展趋势相较于水-粮食更为明显;粮食用水以牺牲生态用水为代价,同样,粮食用地以牺牲生态用地为代价;粮食灌溉渠系水量渗漏能缓解粮食-生态用水矛盾 4% ~6%,粮食作物生态价值能缓解粮食-生态用地矛盾 2% ~42%。构建的模型优势主要表现在能判定耦合系统协调度与发展度的关系,以及粮食-生态用水/用地协同竞争关系,识别粮食灌溉和作物耕作对生态以及生态-生态用水/用地的驱动作用,可为灌区水土资源协同调控与粮食-生态可持续发展提供理论依据。

## 参 考 文 献

[1] KANG Shaozhong, HAO Xinmei, DU Taisheng, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice[J]. Agricultural Water Management, 2017,179:5 - 17.

[2] 景明,张会敏,杨健,等. 宁蒙典型灌区深度节水控水措施研究[J]. 人民黄河, 2020,42(9):155 - 160.
JING Ming, ZHANG Huimin, YANG Jian, et al. Study of deep water saving and control in Ning - Meng irrigation area[J]. Yellow River, 2020,42(9):155 - 160. (in Chinese)

[3] 康绍忠,霍再林,李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金, 2016,30(3):208 - 212.
KANG Shaozhong, HUO Zailin, LI Wanhong. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: advance and future strategies[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2016,30(3):208 - 212. (in Chinese)

[4] 王军涛,梵玉苗,景明,等. 黄河流域灌区深度节水控水模式与成效[J]. 中国水利, 2022(12):12 - 17,22.
WANG Juntao, FAN Yumiao, JING Ming, et al. Exploitation of future-up water saving and control of water use in irrigation district of the Yellow River Basin[J]. China Water Resources, 2022(12):12 - 17,22. (in Chinese)

[5] 蒋钱正,罗彪,郭萍,等. 基于粮食生产安全调控的河套灌区农业水土资源管理[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(12): 42 - 58.
JIANG Qianzheng, LUO Biao, GUO Ping, et al. Agricultural water and land resources management in Hetao irrigation district

based on the regulation of food production safety[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(12):42 - 58. (in Chinese)
[6] 刘焱序,傅伯杰,王帅,等.旱区人地耦合系统水-粮食-生态关联研究述评[J]. 地理研究, 2021,40(2):541 - 555.
LIU Yanxu, FU Bojie, WANG Shuai, et al. Review and prospect of the water - food - ecosystem nexus in dryland's coupled human-earth system[J]. Geographical Research, 2021,40(2):541 - 555. (in Chinese)
[7] 王奕佳,刘焱序,宋爽.水-粮食-能源-生态系统关联研究进展[J]. 地球科学进展, 2021,36(7):684 - 693.
WANG Yijia, LIU Yanxu, SONG Shuang. Research progress of the water - food - energy - ecosystem nexus[J]. Advances in Earth Science, 2021,36(7):684 - 693. (in Chinese)
[8] 王玉宝,蒲傲婷,闫星,等.新疆水-能源-粮食系统安全综合评价[J]. 农业机械学报, 2020,51(6):264 - 272.
WANG Yubao, PU Aoting, YAN Xing, et al. Comprehensive evaluation of water - energy - food nexus safety in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):264 - 272. (in Chinese)
[9] 奉婷,余筱东,董仁玲,等.耦合视角下广西北部湾经济区"三生"功能协调度的时空演变与影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2024,29(12):303 - 316.
FENG Ting, YU Xiaodong, DONG Renling, et al. Spatial-temporal evolution and influencing factors of the coordination degree of "production - living - ecological" functions in Guangxi Beibu Gulf Economic Zone from the coupling perspective[J]. Journal of China Agricultural University, 2024,29(12):303 - 316. (in Chinese)
[10] 张子晴,张道军,陈亮,等.黄河流域城镇化与耕地利用生态效率的耦合协调度评价、时空特征及驱动因素[J]. 农业工程学报, 2024,40(16):240 - 250.
ZHANG Ziqing, ZHANG Daojun, CHEN Liang, et al. Coupling coordination evaluation, spatiotemporal characteristics and driving factors between urbanization and cultivated land use ecological efficiency in the Yellow River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(16):240 - 250. (in Chinese)
[11] ZHANG Yan, YANG Zhifeng, LI Wei. Analyses of urban ecosystem based on information entropy[J]. Ecological Modelling, 2006,197(1 - 2):1 - 12.
[12] 宁波市统计局. 宁波统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997—2004.
[13] 李强坤,韩金旭,王友芝,等.黄河流域水资源管理与节水实践[J]. 中国水利, 2022(13):11 - 14.
LI Qiangkun, HAN Jinxu, WANG Youzhi, et al. Water resources management and water saving practice in the Yellow River Basin[J]. China Water Resources, 2022(13):11 - 14. (in Chinese)
[14] 史海滨,杨树青,李瑞平.内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020,39(11):1 - 12.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping. Water-saving irrigation and utilization efficiency of water and fertilizer in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia: prospect for future research[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 1 - 12. (in Chinese)
[15] HAN Xinxueqi, HUA En, GUAN Jiajie, et al. Development of a method to assess synergy and competition for water use among water-energy-food nexus in the Yellow River Basin: water quantity-quality dimensions[J]. Journal of Hydrology, 2024,639:131607.
[16] YANG Chunyu, HUANG Jue, LIN Zhibin et al. Evaluating the symbiosis status of tourist towns: the case of Guizhou Province, China[J]. Annals of Tourism Research, 2018,72:109 - 125.
[17] WANG Shengyuan, CHEN Wanming, WU Xiaolan. Competition analysis on industry populations based on a three-dimensional Lotka - Volterra model[J/OL]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021. DOI: 10.1155/2021/9935127.
[18] WANG Qiang, LI Siqi, HE Gang, et al. Evaluating sustainability of water-energy-food (WEF) nexus using an improved matter-element extension model: a case study of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,202,1097 - 1106.
[19] YIN Jieling, WU Nan, ENGEL B A, et al. Multi-dimensional evaluation of water footprint and implication for crop production: a case study in Hetao Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management, 2022,267:107630.
[20] XIE Pengxuan, ZHUO La, YANG Xi, et al. Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: a case for the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2020,590:125222.
[21] WANG Youzhi, GUO Xinwei, YIN Huijuan, et al. Spatially distributed footprint families-based simulation-optimization approach for agricultural-ecological resources management under uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2022,613:128319.
[22] GUAN Yang, XIAO Yang, NIU Ren, et al. Characterizing the water resource-environment-ecology system harmony in Chinese cities using integrated datasets: a beautiful China perspective assessment[J]. Science of the Total Environment, 2024,921:171094.
[23] CHANG Huanyu, CAO Yongqiang, ZHAO Yong, et al. Competitive and synergic evolution of the water-food-ecology system: a case study of the Beijing - Tianjin - Hebei region, China[J]. Science of the Total Environment, 2024,923:171509.
[24] LI Yue, XU Xu, CHEN Zhijun, et al. A process simulation-based framework for resource, food, and ecology trade-off by optimizing irrigation and N management[J]. Journal of Hydrology, 2023,617:129035.
[25] SHI Haiyang, LUO Geping, ZHENG Hongwei, et al. Coupling the water-energy-food-ecology nexus into a Bayesian network for water resources analysis and management in the Syr Darya River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2019,581:124387.
[26] DING K J, GILLIGAN J M, HORNBERBER G M. Assessing food-energy-water resources management strategies at city scale: an agent-based modeling approach for Cape Town, South Africa[J]. Resources, Conservation & Recycling,2021,170:105573.
[27] 王圣云,林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素-水足迹与灰水足迹视角[J]. 地理科学,2021,41(2):290 - 301.
WANG Shengyun, LIN Yujuan. Spatial evolution and its drivers of regional agro-ecological efficiency in China's from the perspective of water footprint and gray water footprint[J]. Geographical Science, 2021,41(2):290 - 301. (in Chinese)
[28] WANG Youzhi, GUO Ping. Irrigation water resources optimization with consideration of the regional agro-hydrological process of crop growth and multiple uncertainties[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245(28): 106630.