

# 基于动态演化博弈的海水养殖尾水污染物排放标准采纳行为分析

翟浩杰, 田野, 韩少强, 苑辉\*

天津市生态环境监测中心, 天津

收稿日期: 2024年9月27日; 录用日期: 2024年11月25日; 发布日期: 2024年12月3日

## 摘要

采用演化博弈模型分析海水养殖尾水污染物排放标准的采纳问题, 构建了标准监管部门和海水养殖主体之间的标准采纳演化博弈模型, 分析双方对于标准采纳与监管的动态演化过程。并以天津市《海水养殖尾水污染物排放标准》的发布为例, 研究了标准发布后海水养殖尾水污染物排放标准的采纳, 受到标准监管部门的标准监督成本、标准处罚力度、养殖主体不采纳标准发生的损失以及概率的影响。

## 关键词

海水养殖尾水, 污染物排放标准, 演化博弈, 标准采纳

# Analysis of the Adoption Behavior of Effluent Pollutant Discharge Standards for Marine Aquaculture Based on Dynamic Evolutionary Game Theory

Haojie Zhai, Ye Tian, Shaoqiang Han, Hui Yuan\*

Tianjin Ecological Environment Monitoring Center, Tianjin

Received: Sep. 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 25<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2024

## Abstract

The evolutionary game model is used to analyze the adoption of the discharge standards of mariculture tail water pollutants, and the standard adoption evolutionary game model between standard

\*通讯作者。

文章引用: 翟浩杰, 田野, 韩少强, 苑辉. 基于动态演化博弈的海水养殖尾水污染物排放标准采纳行为分析[J]. 海洋科学前沿, 2024, 11(4): 153-160. DOI: 10.12677/ams.2024.114016

regulatory departments and mariculture subjects is constructed, and the dynamic evolution process of standard adoption and supervision of both sides is analyzed. Taking the release of *Discharge Standards for Mariculture Tail Water Pollutants in Tianjin* as an example, the adoption of the discharge standards after the release of the standards was studied, which was affected by the standard supervision cost of the standard supervision department, the severity of the standard punishment, the loss of the standard and the probability.

## Keywords

Mariculture Tail Water, Pollutant Discharge Standard, Evolution Game, Standard Adoption

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

根据2021生态环境部等7部门联合印发的《重点海域综合治理攻坚战行动方案》和生态环境部、农业农村部《关于加强海水养殖生态环境监管的意见》中提出“2023年底前,沿海省(市)出台地方海水养殖尾水相关排放标准”。随着各沿海省市海水养殖尾水相关排放标准的陆续出台,在实现水环境质量保护和改善的同时,对地方海水养殖业水污染的排放进行了有效规范。该标准作为一个强制执行的污染物排放标准,实施过程中采纳主体和监管单位由于不同的利益目标会面临诸多问题。标准的采纳过程是政府与企业之间关于监管行为的博弈过程,演化博弈理论广泛应用于分析研究不同的领域政府与企业之间作用机制问题[1][2],在环保领域应用较多的是对污染治理、减排策略、奖惩机制等方面的研究。初钊鹏[3]基于演化博弈理论分析了燃煤电厂、第三方企业和政府的污染治理问题;王越[4]、杨霞[5]等学者通过构建演化博弈理论模型,探讨影响碳排放策略选择的关键因素、流域跨界水污染生态补偿等减排策略;高旭阔[6]、潘峰[7]、胡敏[8]等学者基于演化博弈理论构建了多方的演化博弈模型,分析了实施惩罚、奖励、补贴等措施博弈演化路径,分析了各级政府、排污企业、监测单位等在不同奖惩措施下的行为策略,这些研究为分析政府和企业交互行为策略提供了有力的依据。

## 2. 动态博弈模型的假设与构建

根据天津市最新出台的《海水养殖尾水污染物排放标准》(DB12/1288-2023)[9]可知,该地方标准是由各级生态环境主管部门、农业农村主管部门负责组织实施,各级生态环境主管部门负责监督。然而,在标准真正的实施过程还涉及街镇、园区管委会等多级政府部门的协作,因此,以“标准监管部门”指代标准实施过程中的监管方,其主要职责就是负责标准实施过程的监督管理,评判海水养殖主体尾水排放是否符合标准的相关要求,并对超标排放行为进行处理;标准的实施主体即标准的监管对象,根据标准的相关要求主要包括了天津市海水养殖单位(户)、海水养殖尾水集中处理设施等,根据对天津地区海水养殖的调研可知,海水养殖单位(户)又涵盖了从事工厂化、池塘海水养殖企业、单位或个人,因此以“海水养殖主体”指代标准实施过程中监管对象。标准的实施主体应当尽可能地防止、减少养殖尾水的超标排放,并对其所造成环境损害依法承担责任。在标准采纳的过程中,海水养殖主体对于是否采纳污染物排放标准、标准监管部门是否对养殖主体实施监管,判断其污染排放行为是否符合标准要求是一个动态博弈过程,因此,根据上述内容本文做出如下假设:

1) 采纳行为选择的假设:标准监管部门和海水养殖主体双方的博弈是基于诸多理性条件展开的,双

方都希望自己的行为是最优的选择，但又很难确保自身的策略选择最优，因此在该标准实施的过程中，海水养殖主体需要考虑的是标准采纳可能带来的收益和采纳标准所产生的成本，同时也应考虑不采纳标准也就是超标或偷排等情况下的处罚，即不采纳标准所产生的成本，因此对养殖主体而言，包括了两种策略选择，即“采纳标准”和“不采纳标准”。标准监管部门在标准实施的过程中面临着海水养殖产业的发展与生态环境保护的利益权衡，一方面由于海水养殖主体在吸纳就业、增加税收收入等方面具有积极效应而可能降低对其的约束与管制，另一方面由于海水养殖主体超标排放等带来的环境污染和生态破坏需要对其实施强有力的监管，因此对于监管部门而言，其在标准实施过程中的行为分为“监管”和“不监管”两种。标准监管部门与海水养殖主体双方博弈的策略矩阵如表 1 所示。

**Table 1.** Game strategy matrix between standard regulatory authorities and mariculture subjects

**表 1.** 标准监管部门与海水养殖主体博弈策略矩阵

博弈双方		海水养殖主体	
		采纳标准	不采纳标准
标准监管部门	监管	(监管, 采纳标准)	(监管, 不采纳标准)
	不监管	(不监管, 采纳标准)	(不监管, 不采纳标准)

2) 海水养殖主体的假设：当海水养殖主体采纳标准后，为了满足标准限值要求，会建设尾水处理设施或对原有处理设施进行升级改造，此时，不论是否实施监管，海水养殖主体都不存在超标排放的可能，也不会被处以罚款，假设尾水处理设施正常运行所产生的成本为  $D_1$ ，此时的收益为  $B$ ，采纳标准后养殖主体的收益为  $B - D_1$ ；不采纳标准时，海水养殖主体可能会因尾水污染物超标排放造成环境污染而处以罚款，假设养殖主体因未采纳标准受到的罚款为  $P$ ，被处罚的概率为  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )，此时，养殖主体的收益为  $B - \alpha P$ ，而当标准监管部门未实施监管时，其收益为  $B$ 。

3) 标准监管部门的假设：标准监管部门对海水养殖主体的采纳行为实施监管是基本职责，因此不会产生额外收益，假设监管部门开展标准实施情况产生的成本是  $D_2$ ，则在实施监管过程所产生的实际收益为  $-D_2$ ；在海水养殖主体选择不采纳标准时，监管部门实施监管工作过程中会因执法行为规范、协调组织到位等因素受到上级嘉奖并获得对应奖励  $M$ ，概率为  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ )，此时标准监管部门的收益是  $\beta M - D_2$ 。当标准监管部门不实施监管，如果海水养殖主体采纳标准，建设尾水处理设施、升级改造水处理设备后尾水达标排放，监管部门不会产生任何监管成本，其收益为  $0$ ；如果养殖主体选择不采纳标准，尾水超标排放造成水污染事故，监管部门会因未开展监管受到上级主管部门的处罚  $F$ ，假设被处罚的概率与养殖主体的处罚概率相同，为  $\alpha$ ，此时监管部门的收益为  $-aF$ 。

4) 采纳行为概率的假设：假设海水养殖主体采取“采纳”标准策略的概率为  $x$ ，则“不采纳”标准策略的概率为  $1 - x$ ，其中  $0 \leq x \leq 1$ ；假设标准监管部门实施标准监管的概率为  $y$ ，则“不监管”标准的概率为  $1 - y$ ，其中  $0 \leq y \leq 1$ 。

根据上述假设条件和参数定义，得到海水养殖尾水污染物排放标准采纳过程中标准监管部门和海水养殖主体之间的双方收益矩阵，具体如表 2 所示。

海水养殖主体选择采纳和不采纳标准的期望收益分别为  $E_1$  和  $E_2$ ，其平均期望收益为  $\bar{E}$ ，则：

$$E_1 = y(B - D_1) + (1 - y)(B - D_1) = B - D_1 \quad (1)$$

$$E_2 = y(B - aP) + (1 - y)B = B - Pay \quad (2)$$

$$\bar{E} = xE_1 + (1 - x)E_2 = x(B - D_1) + (1 - x)(B - Pay) \quad (3)$$

**Table 2.** The revenue matrix of the adoption behavior of mariculture tail water pollutant discharge standards  
**表 2.** 海水养殖尾水污染物排放标准采纳行为的收益矩阵

收益	标准监管		标准不监管	
	养殖主体收益	标准监管部门收益	养殖主体收益	标准监管部门收益
采纳标准	$B - D_1$	$-D_2$	$B - D_1$	0
不采纳标准	$B - aP$	$\beta M - D_2$	$B$	$-\alpha F$

标准监管部门实施和不实施标准监管的期望收益分别为  $R_1$  和  $R_2$ ，其平均期望收益为  $\bar{R}$ ，则：

$$R_1 = -xD_2 + (1-x)(\beta M - D_2) = (1-x)\beta M - D_2 \tag{4}$$

$$R_2 = x \times 0 + (1-x)(-aF) = -aF(1-x) \tag{5}$$

$$\bar{R} = yR_1 + (1-y)R_2 = y[(1-x)\beta M - D_2] + (1-y)[-aF(1-x)] \tag{6}$$

根据 Malthusian 方程[10]，海水养殖主体选择“采纳”标准策略的概率  $x$  和标准监管部门选择“监管”标准策略的概率  $y$  的演化博弈复制动态方程分别为：

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_1 - \bar{E}) = x(1-x)(E_1 - E_2) = x(1-x)(Pay - D_1) \tag{7}$$

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(R_1 - \bar{R}) = y(1-y)(R_1 - R_2) = y(1-y)((1-x)\beta M - D_2 + aF(1-x)) \tag{8}$$

### 3. 模型演化策略分析

海水养殖主体和标准监管部门之间对于标准策略的动态演化博弈过程，可以通过公式(7)与公式(8)组成的系统表示，令复制动态方程  $F(x) = \frac{dx}{dt} = 0$ 、 $F(y) = \frac{dy}{dt} = 0$ ，得到系统中的 5 个策略均衡点分别为：

$A(0,0)$ ， $B(1,0)$ ， $C(0,1)$ ， $D(1,1)$ ， $E\left(\frac{aF + M\beta - D_2}{aF + M\beta}, \frac{D_1}{Pa}\right)$ 。根据 Friedman 的原理，演化稳定策略点

(Evolutionary stability strategy, ESS)可以通过雅可比矩阵进行判断，用  $J$  演化系统的雅可比矩阵：

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dF(x)}{dx} & \frac{dF(x)}{dy} \\ \frac{dF(y)}{dx} & \frac{dF(y)}{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2x-1)(D_1 - Pay) & Pax(1-x) \\ y(y-1)(M\beta + Fa) & (2y-1)((x-1)(M\beta + Fa) + D_2) \end{bmatrix} \tag{9}$$

记矩阵的行列式为  $det(J)$ ，矩阵的迹为  $tr(J)$ ，分别如下所示：

$$det(J) = (2x-1)(D_1 - Pay)(2y-1)((x-1)(M\beta + Fa) + D_2) - Pax(1-x)y(y-1)(M\beta + Fa) \tag{10}$$

$$tr(J) = (2x-1)(D_1 - Pay) - (2y-1)((x-1)(M\beta + Fa) + D_2) \tag{11}$$

通过对演化博弈复制动态模型分析，将系统中的 5 个策略均衡点带入雅可比矩阵的行列式  $det(J)$  和迹为  $tr(J)$ ，得到均衡点数值表达式如表 3 所示。

**Table 3.** Numerical expression of equilibrium point of mariculture tail water pollutant discharge standard  
**表 3.** 海水养殖尾水污染物排放标准均衡点数值表达式

均衡点	$det(J)$	$tr(J)$
$A(0,0)$	$-D_1(M\beta + Fa - D_2)$	$(M\beta + Fa) - D_1 - D_2$
$B(1,0)$	$-D_1D_2$	$D_1 - D_2$
$C(0,1)$	$(M\beta + Fa - D_2)(D_1 - Pa)$	$D_2 - (M\beta + Fa) - D_1 + Pa$
$D(1,1)$	$D_2(D_1 - Pa)$	$D_2 + D_1 - aP$
$E\left(\frac{aF + M\beta - D_2}{aF + M\beta}, \frac{D_1}{Pa}\right)$	$\frac{-D_1D_2(M\beta + Fa - D_2)(D_1 - Pa)}{(M\beta + Fa)Pa}$	0

根据假设条件,演化初始点位和空间点需要同时满足  $0 \leq x \leq 1$  且  $0 \leq y \leq 1$ ,复制动态方程式(7)表明仅当  $x = 0,1$  或  $y = \frac{D_1}{Pa}$  时,海水养殖主体对于标准的采纳的策略是局部稳定的,公式(8)表明仅当  $y = 0,1$  或  $x = \frac{aF + M\beta - D_2}{aF + M\beta}$  时,标准监管部门对于标准的监管策略是局部稳定的。当系统中的 5 个策略均衡点满足条件  $det(J) > 0$  和  $tr(J) < 0$  时,为 ESS,当  $det(J) > 0$  以及  $tr(J) = 0$  时,为鞍点。因此,根据实际情况分析均衡结果,海水养殖主体和标准监管部门演化博弈均衡点稳定性分析结果如表 4 所示。

**Table 4.** Stability analysis of the evolutionary equilibrium point between the two parties  
**表 4.** 博弈双方的演化均衡点稳定性分析

序号	条件	平衡点	(0,0)	(1,0)	(0,1)	(1,1)	$(x^*, y^*)$
1	$aF + M\beta - D_2 < 0,$ $D_1 > D_2,$ $D_1 > Pa$	$det(J)$	+	-	-	+	+
		$tr(J)$	-	+	-	+	0
		结果	ESS	不稳定	不稳定	不稳定	鞍点
2	$aF - D_2 > 0,$ $aF + M\beta - D_2 - D_1 < 0,$ $D_1 > D_2,$ $D_1 > Pa$	$det(J)$	-	-	+	+	-
		$tr(J)$	-	+	-	+	0
		结果	不稳定	不稳定	ESS	不稳定	鞍点

通过表 4 的结果可以看出,在上述 3 种条件下,公式(7)和(8)组成的系统有 2 个演化稳定策略点,即  $A(0,0)$  和即  $C(0,1)$ 。

当  $aF + M\beta - D_2 < 0, D_1 > D_2$  且  $D_1 > Pa$ ,  $A(0,0)$  是系统的 ESS。此时,标准监管部门由于受上级部门处罚和奖励力度小,不实施标准的监管,由于失去了监管,养殖企业无论改造成本高低与否,最终选择不采纳标准。

当  $aF - D_2 > 0, aF + M\beta - D_2 - D_1 < 0, D_1 > D_2$  且  $D_1 > Pa$  时,  $C(0,1)$  是系统的 ESS。此时养殖企业由于改造成本高于不采纳标准受到的处罚,养殖企业选择不采纳标准,标准监管部门如果不实施标准监管会受到上级部门较为严格的处罚,而最终选择实施标准的监管。

## 4. 标准采纳行为演化博弈分析

### 4.1. 海水养殖主体演化行为分析

当  $y = D_1/Pa$  时, 演化博弈复制动态方程(7)  $F(x) = 0$ , 此时  $x$  为任意值  $F(x) = 0$  均成立, 图 1(a); 当  $y \neq D_1/Pa$  时,  $F(x) = 0$  成立的条件为  $x_1^* = 0, x_2^* = 1$ , 即该方程的两个稳定解, 图 1(b); 根据  $F'(x^*)$ , 对养殖海水养殖主体标准采纳行为进行分析可知, 当  $0 < D_1/Pa < 1$ , 则表明海水养殖主体水养殖主体建设、升级、运营尾水处理设施所产生的成本是小于罚款的, 其标准采纳行为取决于环保标准监管部门的影响, 当标准监管的倾向较为明显时, 经过动态博弈, 海水养殖主体倾向于采纳标准, 结果如图 1(c)所示; 当  $D_1/Pa \geq 1$ , 即不采纳标准的罚款  $Pa$  小于其采纳标准所付出的成本  $D_1$ , 此时海水养殖主体标准采纳行为受到监管部门的影响较小, 海水养殖主体的标准采纳行为不会受到标准监管部门的影响较小, 且部分会选择采纳标准的策略, 结果如图 1(d)所示。

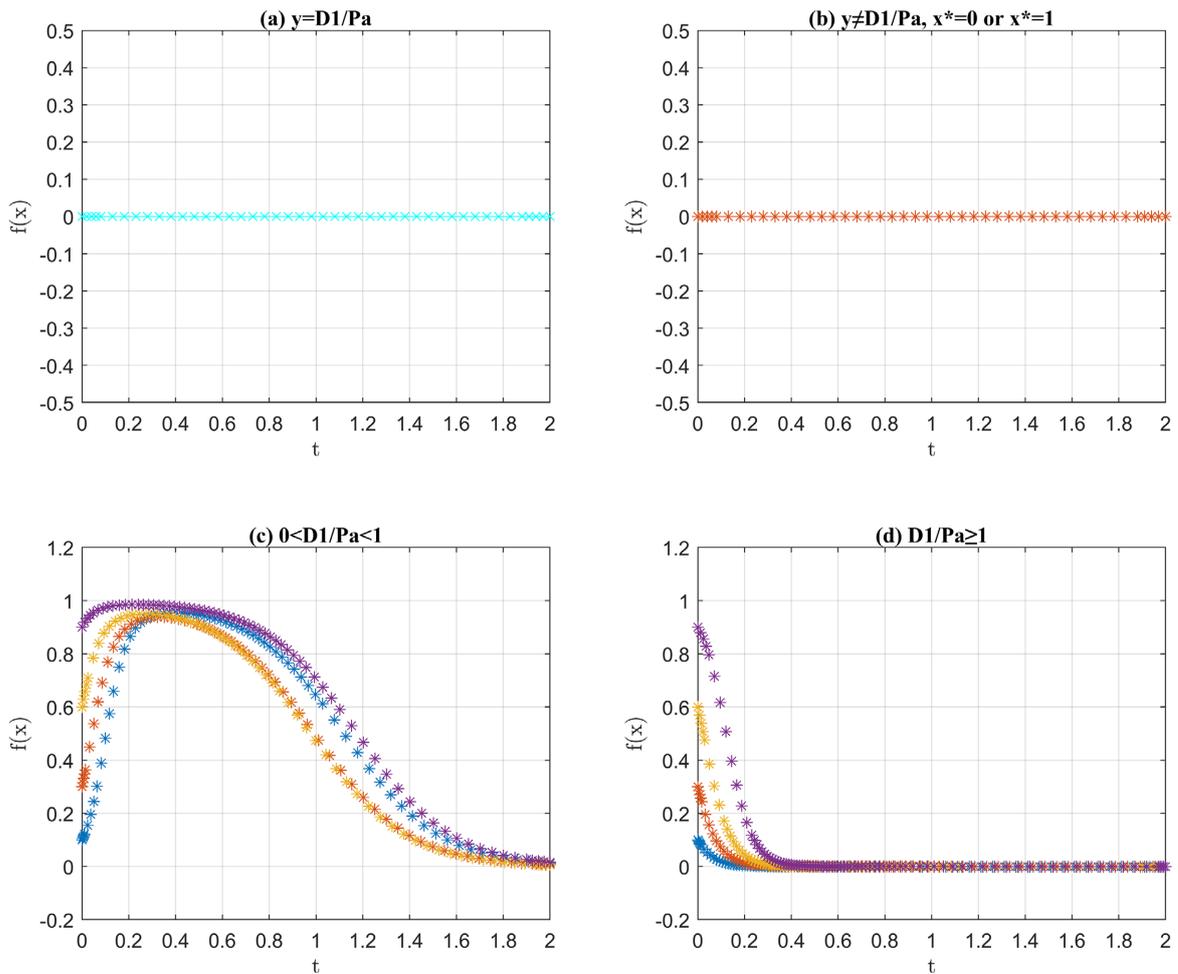


Figure 1. Analysis of the evolutionary behavior of mariculture subjects  
图 1. 海水养殖主体演化行为分析

### 4.2. 标准监管部门演化行为分析

当  $x = \frac{aF + M\beta - D_2}{aF + M\beta}$  时, 演化博弈复制动态方程(8)  $F(y) = 0$ , 此时  $y$  为任意值  $F(y) = 0$  均成立, 图

2(a): 当  $x \neq \frac{aF + M\beta - D_2}{aF + M\beta}$  时,  $F(y) = 0$  成立的条件为  $y_1^* = 0, y_2^* = 1$ , 即该方程的两个稳定解, 结果如图 2(b)所示; 根据  $F'(y^*)$ , 当  $aF + M\beta < D_2$ , 即标准监管部门处罚和奖励小于其实施监管的成本  $D_2$  时,  $(\beta M + aF) - D_2 - x(\beta M + aF) < 0, F'(y_1^*) < 0, y_1^*$  是最终演化稳定的均衡状态, 此时, 标准监管部门的策略选择与海水养殖主体是否采纳标准无关, 图 2(c); 当  $aF + M\beta > D_2$  时,  $(\beta M + aF) - D_2 - x(\beta M + aF) > 0, F'(x_1^*)$  和  $F'(x_2^*)$  均  $< 0, y_2^*$  是最终演化稳定的均衡解, 此时标准监管部门和海水养殖主体之间经过动态演化, 监管部门在有最终选择实施标准的监管, 结果如图 2(d)。

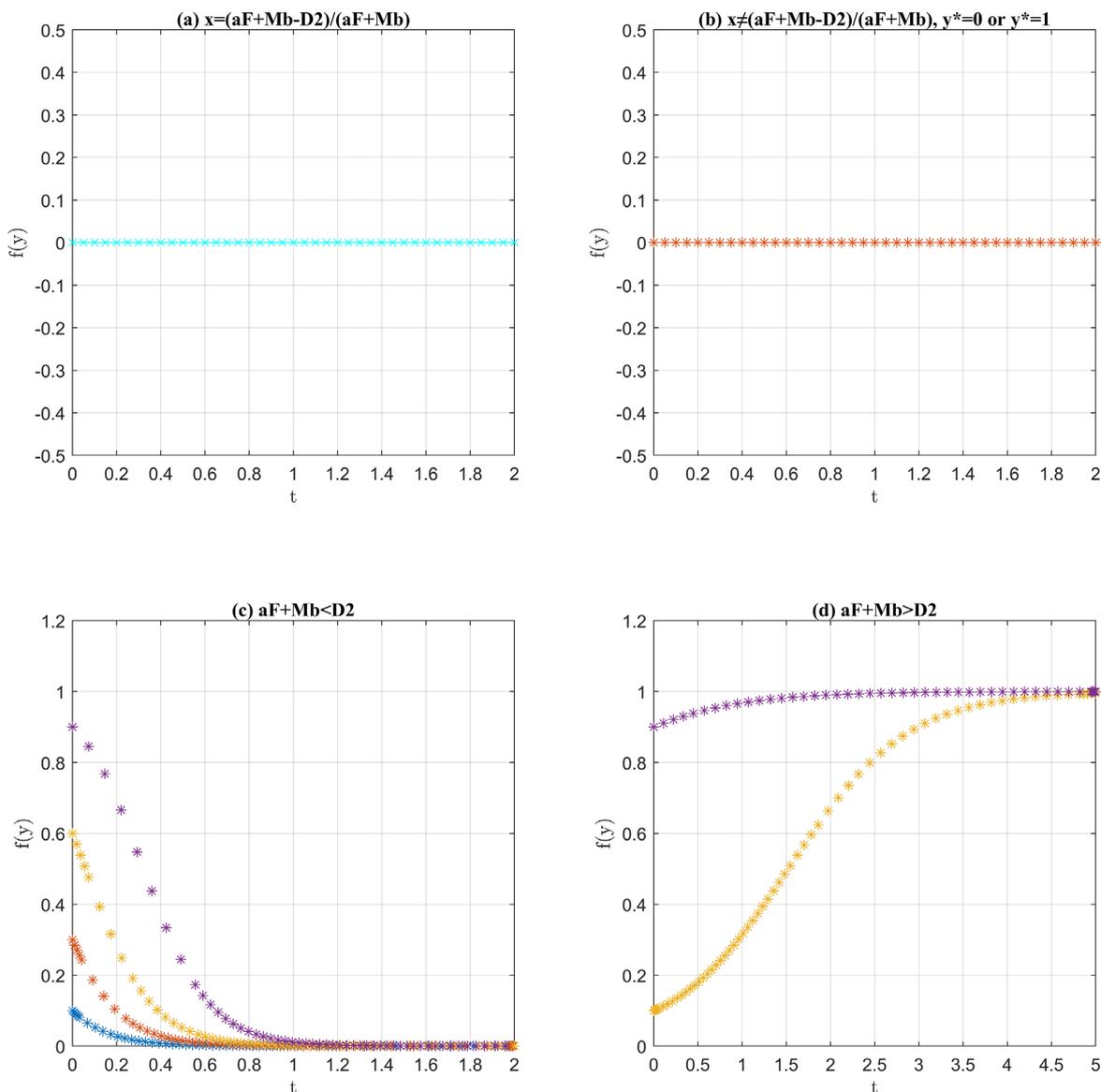


Figure 2. Analysis of the evolutionary behavior of the standard regulatory authorities  
图 2. 标准监管部门演化行为分析

### 5. 结论与建议

本研究以天津市《海水养殖尾水污染物排放标准》的发布实施为依据, 构建了标准发布实施后的海

水养殖主体和标准监管部门关于标准实施后的执行和监管演化博弈模型，并基于演化博弈的视角，探讨在标准发布背景下海水养殖主体和标准监管部门决策行为的演化特征和主要影响因素进行分析，主要结论如下：

海水养殖主体标准的采纳策略和标准监管部门监管策略的选择受多种因素的影响。海水养殖主体选择标准的采纳策略与标准监管部门对海水养殖主体不采纳标准行为的惩罚概率、惩罚金额、海水养殖主体建设尾水处理设施或对原有处理设施进行升级改造成本等有关。处罚概率是协同影响博弈双方演化行为的重要因素。随着处罚概率的增大，海水养殖主体会越来越快地趋向于“采纳标准”，但在较高的处罚概率的条件下，养殖主体最终仍会选择“不采纳标准”，同时监管部门对企业实施监管的行为，会随着处罚概率的增加而加强。海水养殖主体受到的处罚额度与水处理成本的变化均对其标准采纳的演化博弈行为产生影响。当养殖主体建设、升级、运营尾水处理设施所产生的成本小于罚款时，随着水处理成本的增加，养殖主体也更加趋近于标准采纳行为，反之，水处理成本的变换不会对其标准采纳行为产生影响。这也说明，当监管主体不实施标准的监管行为，较低的处罚额度，会最终导致养殖主体不采纳标准，此时，无论水处理设施成本高低，养殖主体不会因此而进行水处理设施的投资。

天津市《海水养殖尾水污染物排放标准》是实现水环境保护和规范海水养殖业水污染排放的基础。因此，保证《海水养殖尾水污染物排放标准》的有效实施，应该从以下几个方面着手：标准监管部门应该在一定程度上加强对标准实施采纳的基本监管工作，对于不采纳标准的企业实施查处。对于标准的监管成本，应从内部进行调整，在保证标准监管的效率的同时降低标准监管成本。海水养殖主体对标准采纳应该采取科学端正的态度，认识到标准采纳对于海水养殖主所产生的利益，在控制标准采纳成本的同时，积极采纳标准，降低尾水超标排放造成的污染事故，提高企业竞争力。

## 参考文献

- [1] 罗明, 范如国, 张应青, 等. 环境税制下政府与企业环境治理协同行为演化博弈及仿真研究[J]. 技术经济, 2019, 38(11): 83-92.
- [2] 宋美慧, 王维才. 能源安全背景下企业与政府间双方演化博弈行为研究[J]. 中国软科学, 2022(9): 152-160.
- [3] 初钊鹏, 张晓杰, 张慧, 等. 企业环境污染第三方治理研究——以燃煤电厂为例[J]. 生态经济, 2023, 39(8): 187-194, 218.
- [4] 王越, 曾先. 基于演化博弈视角的环境正义下重工业区工业碳排放治理机制[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3195-3204.
- [5] 杨霞, 何刚, 吴传良, 等. 生态补偿视角下流域跨界水污染协同治理机制设计及演化博弈分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 2033-2042.
- [6] 高旭阔, 席子云. 组合措施下政府与企业排污行为演化博弈[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5484-5492.
- [7] 潘峰, 李英杰, 王琳. 垂直管理体制下地方环境治理相关主体策略行为优化研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(4): 86-92.
- [8] 胡敏, 王周鸿. 中央环保督察下的企业污染监管三方演化博弈与仿真分析[J]. 管理现代化, 2023, 43(3): 134-144.
- [9] 天津市生态环境局. DB12/1288-2023 天津市海水养殖尾水污染物排放标准[S]. 天津: 天津市市场监管委, 2024.
- [10] Friedman, D. (1991) Evolutionary Games in Economics. *Econometrica*, 59, 637-666. <https://doi.org/10.2307/2938222>