附录 1：恢复策略的具体分析过程

政策作用将影响合作博弈的收益，当合作收益大于背叛收益时，节点倾向于选择持续合作。本文采用节点收益择优机制（曹霞和刘国巍，2015），选择与合作收益大于背叛收益的节点建立合作关系，表示如式（1）：

$$e_{ij}=\begin{cases}1, & U_{合作}>U_{背叛}\\ 0, & 其他节点\end{cases} \tag{1}$$

其中，e_{ij}为 1 表明节点i与节点j选择持续合作，e_{ij}为 0 表明节点i与节点j选择不合作。

同时，构建如附表 1-1 所示的博弈模型。企业和学研机构如果选择“合作”策略，则两类机构参与合作创新，如果两者选择“背叛”策略，则两类机构独立完成创新研发；如果选择{合作，背叛}，则表明在合作的基础上，一方背叛合作契约，在中途退出合作。企业和学研机构在独立研发时获得的收入分别是S_E和S_O，合作将带来超额收益ΔS，其中越重要的节点获得的超额收益越多，因此用两个节点的点度中心度的占比来表示超额收益的分配比：

$$\alpha_i=\frac{C_D(V_i)}{C_D(V_i)+C_D(V_j)};\alpha_j+\alpha_i=1 \tag{2}$$

其中α_i表示节点i参与博弈时的超额收益分配比；$C_D(V_i)$表示节点i的点度中心度；$C_D(V_j)$表示节点j的点度中心度。

附表 1-1 合作创新博弈模型的收益矩阵

		学研机构 0	
		合作C（b）	背叛N（$1-b$）
企业 E	合作C（a）	$S_E+\alpha\Delta S+G$, $S_O+(1-\alpha)\Delta S+G$	S_E+F, S_O+S_N-F
	背叛N（$1-a$）	S_E+S_N-F，S_O+F	S_E, S_O

资料来源：作者整理。

如若在合作过程中有一方退出合作，选择背叛契约，表明该选择将带来背叛收益S_N，且$S_N>S+\alpha\Delta S$，同时背叛契约的一方要承担相应的违约金F（$S>F$）。在此基础上，链长制的制定，不断强调加速科研机构、高校与链主企业的合作创新，并给予联合研发企业财政补贴G，以鼓励其能持续参与合作。

假设企业与学研机构选择合作策略的概率分别是a和b，则选择背叛的概率分别是（$1-a$）和（$1-b$），那么企业与学研机构选择合作策略与背叛策略的收益如下：

企业选择合作与背叛的收益分别见式（3）和式（4）：

$$U_{EC}=b(S_E+\alpha\Delta S+G)+(1-b)(S_E+F) \tag{3}$$

$$U_{EN}=b(S_E+S_N-F)+(1-b)S_E \tag{4}$$

学研机构选择合作与背叛的收益分别见式（5）和式（6）：

$$U_{OC}=a(S_o+\alpha\Delta S+G)+(1-a)(S_o+F) \tag{5}$$

$$U_{ON}=a(S_o+S_N-F)+(1-a)S_o \tag{6}$$

当同时满足企业合作的收益与学研机构合作的收益大于各自背叛的收益时，即当$U_{EC}>U_{EN}$且$U_{OC}>U_{ON}$时，企业和学研机构会选择坚持合作策略，联合参与创新研发。在持续博

弈的过程中，个体在每次博弈后会进行一次博弈策略的调整，模仿收益更高的个体的策略并以概率 P（Szabó 和 Hauert，2002）参与下次博弈（周国华等，2020）（见式（9））。双方的混合收益见式（7）和式（8）：

$$\pi_E(t_n) = aU_{EC} + (1-a)U_{EN} \tag{7}$$

$$\pi_O(t_n) = bU_{OC} + (1-b)U_{ON} \tag{8}$$

$$P(S_j \rightarrow S_i) = \frac{1}{1+exp\left[\frac{\pi_j(t_n)-\pi_i(t_n)}{K}\right]} \tag{9}$$

当$\pi_i > \pi_j$时，节点j（企业或学研机构）的策略（S_j）以概率P更换为节点i（企业或学研机构）的策略（S_i）。K表示环境与个体理性对策略选择的影响，当K趋向于 0 时，表示个体能够坚持原策略而不被环境干扰，个体相对理性；当K趋近于无穷时，表明拥有有限理性的个体容易受环境影响而改变策略。

恢复策略流程如下：第一步，计算合作创新网络初始的网络效率和最大联通子图比率；第二步，随机抓取两个节点进行博弈，在合作收益大于背叛收益时建立连边，并根据节点收益的变化进行个体策略的调整，同时以新的策略参与下一次博弈，再次计算网络效率和最大联通子图比率，循环该过程直至达到设置的博弈次数；第三步，输出随博弈次数变化的网络效率图和最大联通子图比率图，结束程序。

附录 2：链长制提升产业链韧性的效用：多时点双重差分模型构建

1、指标选取

采用多时点双重差分方法，验证链长制提升产业链韧性的效用。核心解释变量DID_{it}为 2018—2021 年间省级层面链长制的实施与否。由于链长制政策的实施时间不同，因此为保持实验组的动态调整状态，本文将处于实验组中的省份在实施之前的DID_{it}设置为 0，实施当年及实施后的DID_{it}设置为 1；在时间跨度内没有实施的省份的DID_{it}统一设置为 0，即本文的对照组。被解释变量为产业链韧性（Industrial Chain Resilience，ICR），本文依据韧性的演化周期构建产业链韧性的测度指标体系，并利用 2018—2021 年上市企业的数据对人工智能产业链韧性进行测评，以此作为本研究的被解释变量。控制变量为企业层面的企业规模（Yysr）、资本密集度（Capital）和城市层面的人口密度（Density）。指标描述与计算方法见附表 2-1。

附表 2-1 变量描述与计算方法

变量类型	变量名称	符号	计算方法
被解释变量	产业链韧性	*ICR*	构建指标体系计算得来
解释变量	链长制	*DID*	耦合协调度计算得来
控制变量	企业规模	*Yysr*	企业营业收入的自然对数
	企业资本密集度	*Capital*	企业总资产与营业收入的比值
	人口密度	*Density*	每平方公里人口数的自然对数

资料来源：作者整理

2、模型构建

采用多时点双重差分模型，加入虚拟变量DID_{it}来区分实验组和对照组，设计如下面板双向固定效应模型估计链长制政策对产业链韧性的效应。模型设置如式（1）：

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 DID_{it} + \beta X_{it} + \delta_i + \omega_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中，下标i、t分别表示省份和时间，Y_{it}指代表示产业链韧性的指标；DID_{it}是本文的核心解释变量，其系数β_1是本文关注的核心参数，即若链长制政策这一外生制度安排能够促进产业链韧性提升，则其符号应显著为正；X_{it}代表本文的控制变量组；δ_i为地区固定效应，ω_t为时间固定效应，ε_{it}为随机扰动项。

3、数据来源与预处理

在多时点双重差分的实证分析中，其一，企业层面的数据：来自 wind 数据库的人工智能产业链专栏以及国泰安数据库（CSMAR）上市企业栏目，将查找的数据与计算人工智能产业链韧性的指数数据进行匹配，对于缺失数据查找企业年报进行填补，或者根据会计准则对原始数据进行处理并根据差值法进行补齐。其二，省级层面的数据：省级层面关于链长制政策的数据，根据各省政府的公开文件、新闻媒体报到中公开的链长制实施的年份，确定链长制实施与否（见附表 2-2）。其三，数据预处理：第一，对所有连续变量的上下 10%分位按年进行 Winsorize 处理，再对处理后的数据求取对数，最大程度避免数据中出现异常值并增加数据的可比性。第二，将省级数据匹配到企业数据中，形成包含 1096 个样本的平衡面板数据。

附表 2-2 链长制实施省份的时间分布情况

年份	省份
2017 年	湖南
2019 年	广西、浙江、辽宁、内蒙古
2020 年	河北、黑龙江、安徽、江西、山东、河南、广东、福建、北京、江苏
2021 年	天津、山西、吉林、云南、陕西、甘肃、新疆、甘肃、宁夏、贵州、青海、海南、重庆、四川

资料来源：刘刚,殷建瓴,唐寅.战略产业管理中的“有效市场，有为政府”：链长制的实践与优化对策[J].中国行政管理,2022,(12):66-72.

附录 3：合作网络的网络特征值分析

如附表 3-1 和附表 3-2 所示：

首先，在整体网络中，连边数在 2018—2021 年期间呈现先增后降的趋势，但前三个年度基本持平，且整体网络的点度中心度和网络密度也呈现相同的变化趋势。这说明在产业链中出现频次最多的前 30 名专利权人的合作次数和密度基本保持不变，即人工智能产业链专利技术的头部创新主体已经基本占据了网络的核心地位且形成了较为稳定的强契约关系。从接近中心度来看，2018—2021 年期间经历了“持平-下降-攀升”的演变轨迹，表明在网络

密度不变的情况下，合作网络的连通性呈现增大的趋势，即网络中创新主体的独立性降低，创新主体的合作不再局限于两两联合创新，而是更倾向于多方主体的联合创新。同时，中介中心度趋近于零可以理解为该联合创新模式通常不以某个创新主体为中介，而是多方创新主体形成的合作闭环。一方面表示创新主体可以自由获得与其他主体合作交流的机会，合作渠道和路径较为多元；另一方面表明各环节的合作网络中并未出现处于“中介地位”的创新主体，现阶段的创新环境较为松散和自由。另外，外部冲击的作用致使部分受环境影响较大的企业不得不放弃合作创新，而仅剩为数不多的强势创新主体可以继续维持联合研发，该优胜劣汰的现象表现为接近中心度的快速攀升。例如，国家电网有限公司在协同创新、资源获取、市场机会等方面占据有利位置，其能更迅速地与其他节点进行共享信息、技术交流，带动部分企业提升风险应对能力。

其次，在子网络中，上游子网络 2018—2021 年的点度中心度和网络密度呈现下降趋势。表明上游子网络的集聚度有所放缓，网络呈现较为分散的状态且核心创新主体的控制度有所下降；部分非优势企业也逐步参与到合作创新网络中来，该现象在中游和下游子网络中也有所体现。前三年度的中游和下游子网络的点度中心度呈现先升后降的趋势且基本保持稳定状态，但二者的网络密度分别呈现为先升后降和先减后增的相反趋势。表明中游和下游子网络中创新主体的影响力和控制度基本不变，但中游子网络更加集聚，即合作创新网络复杂程度加深；而下游子网络愈加分散，即网络结构表现为“去繁增简”的态势。

最后，在二分网络中，二者的点度中心度呈现先升后降的基本持平趋势，接近中心度呈现持续下降的趋势，而网络密度呈现先增后减的总体增长趋势。表明上-中游和中-下游网络的集聚程度越来越高，合作网络的复杂度也在持续加强，单个子网络的边界逐渐模糊表现为创新主体之间的连接跨度增大以及多方主体共同参与联合研发的频次增多。

附表 3-1 合作创新网络结构特征值（1）

变量		网络规模								网络特征			
		节点数				连边数				点度中心度			
年份		2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
整体网络		30	30	30	30	88	98	88	30	0.10	0.11	0.10	0.03
子网络	上游	4	5	8	5	20	13	21	3	0.17	0.09	0.09	0.02
	中游	20	16	15	15	51	57	48	17	0.09	0.12	0.11	0.04
	下游	6	9	7	10	17	28	19	10	0.10	0.11	0.09	0.03
二分网络	上-中游	24	21	23	20	71	70	69	20	0.10	0.11	0.10	0.03
	中-下游	26	25	22	25	68	85	67	27	0.09	0.12	0.10	0.04

注：因专利申请到专利公开约需要 18 个月的时间，加之疫情冲击导致 2021 年的专利数量和参与研发的专利权人数较少，在表格中呈现为 2021 年的部分数值偏小。依据 2018—2020 年的数值不影响对本文研究问题的分析。下同。

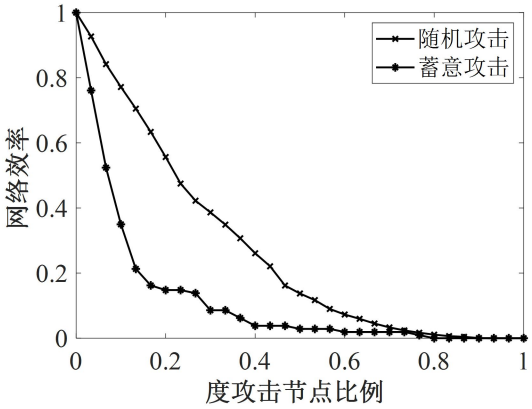
附表 3-2 合作创新网络结构特征值（2）

变量	网络特征											
	接近中心度				中介中心度				网络密度			
年份	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021

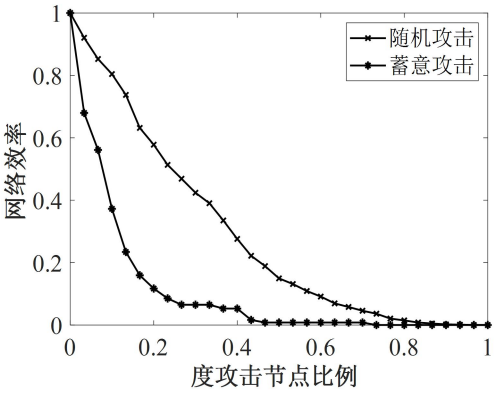
整体网络		2.33	2.39	0.41	9.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.11	0.10	0.03
子网络	上游	6.27	0.35	0.35	6.53	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	0.65	0.38	0.15
	中游	0.73	0.51	0.41	9.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.24	0.23	0.08
	下游	9.09	6.87	0.46	12.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.39	0.45	0.11
二分网络	上-中游	0.53	0.47	0.39	8.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.17	0.15	0.05
	中-下游	7.70	2.80	0.42	10.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.14	0.13	0.05

综上，2021 年的产业链合作创新网络的发展环境较为严峻，加之自身还存在抵抗力低和敏感性高的特点，造成其抵御冲击的能力相对于 2018 与 2019 年来说较弱。上游子网络相对于中游和下游子网络来说，存在节点影响力不强及网络集聚度不高的特点，不利于发挥头部带动、规模经济等效应，这将削弱上游子网络的稳定性，为产业链韧性埋下隐患。上-中游二分网络相较于中-下游二分网络而言，前者的网络集聚度高于后者，但节点独立性较弱，表明前者在受到冲击后更易出现连锁反应，进而威胁整个产业链韧性。

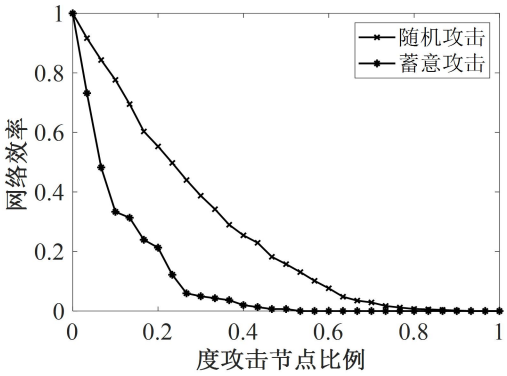
附图 1：攻击下的网络效率图



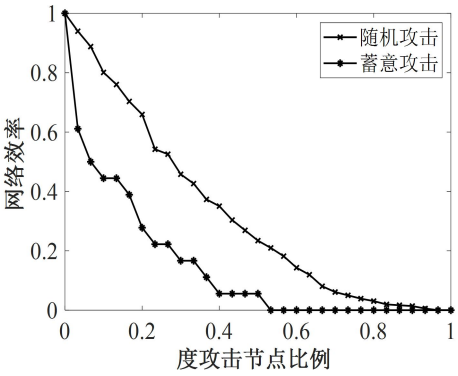
2018 年



2019 年

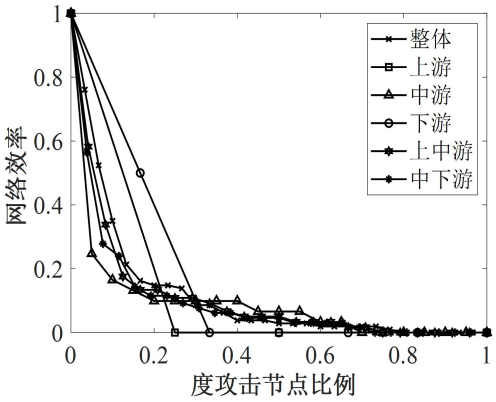


2020 年

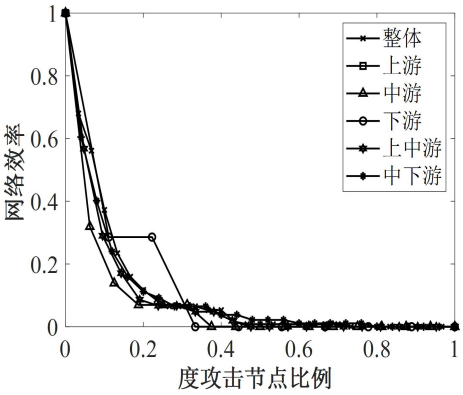


2021 年

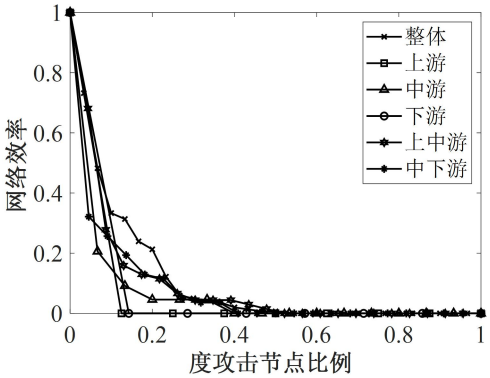
附图 1-A　对节点随机及蓄意攻击下的网络效率



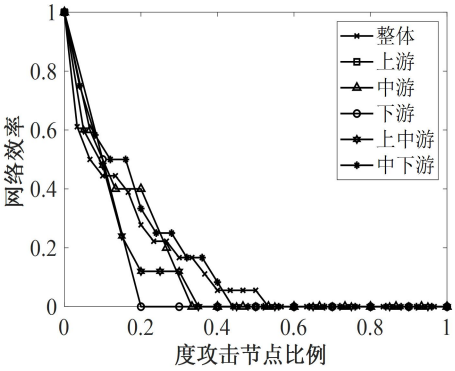
2018 年



2019 年

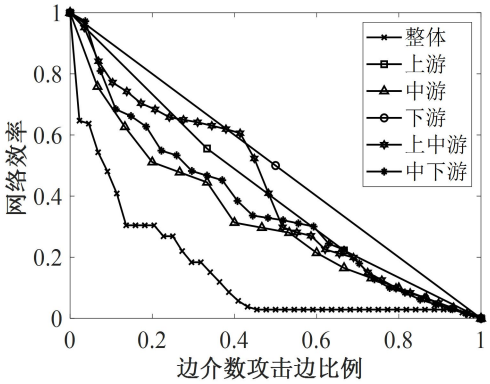


2020 年

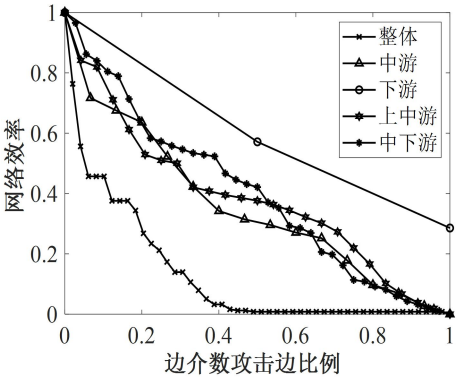


2021 年

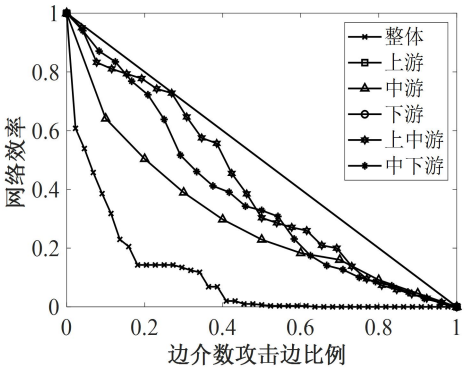
附图 1-B　对节点蓄意攻击下的网络效率



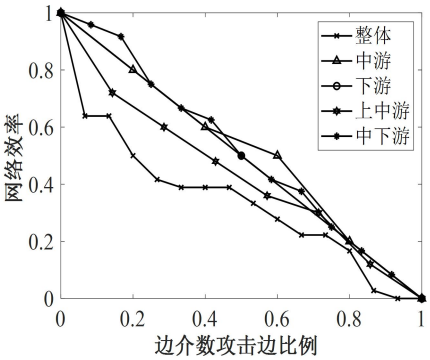
2018 年



2019 年

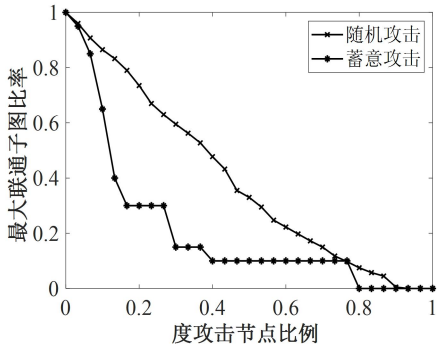


2020 年

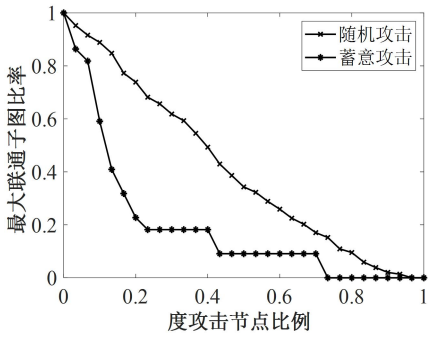


2021 年

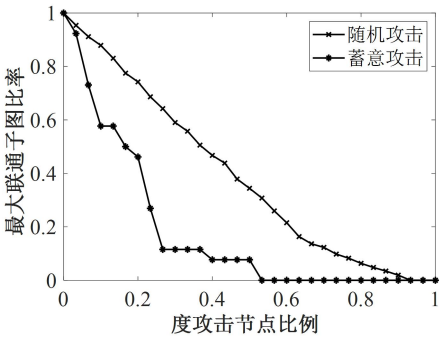
附图 1-C　对连边蓄意攻击下的网络效率



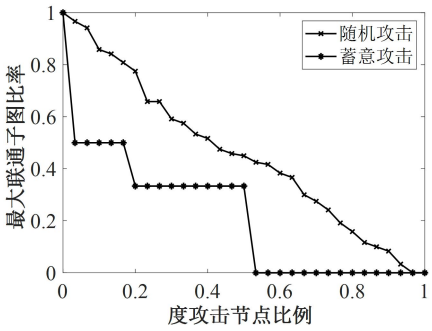
2018 年



2019 年



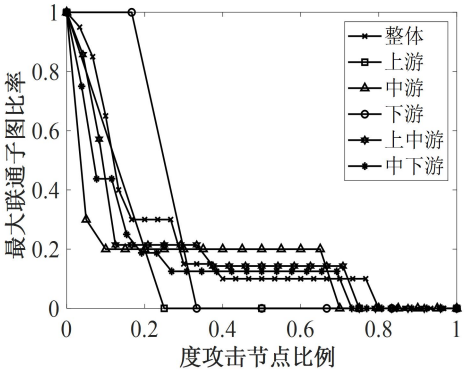
2020 年



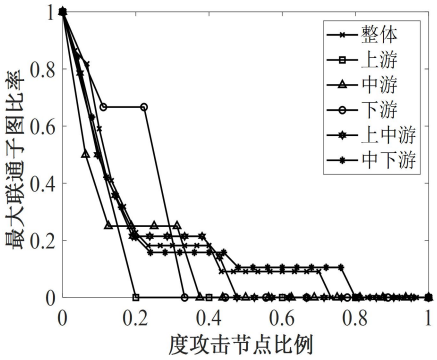
2021 年

附图 2：攻击下的最大联通子图比率图

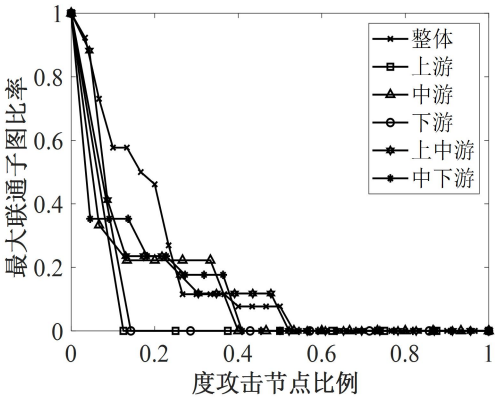
附图 2-A　对节点随机及蓄意攻击下的最大联通子图比率



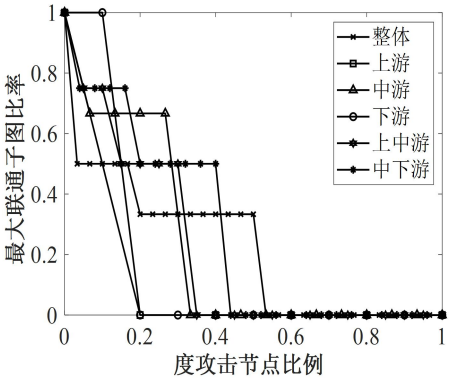
2018 年



2019 年

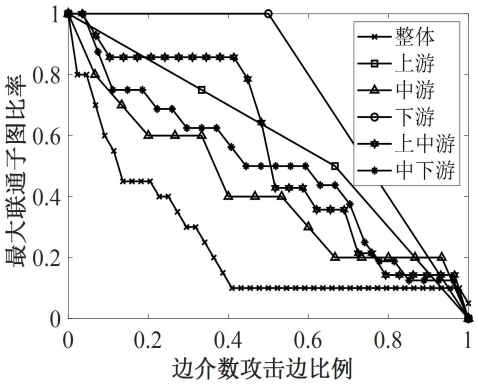


2020 年

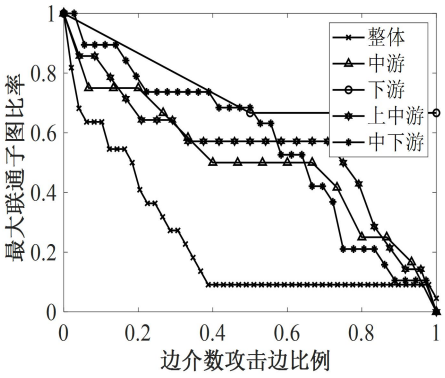


2021 年

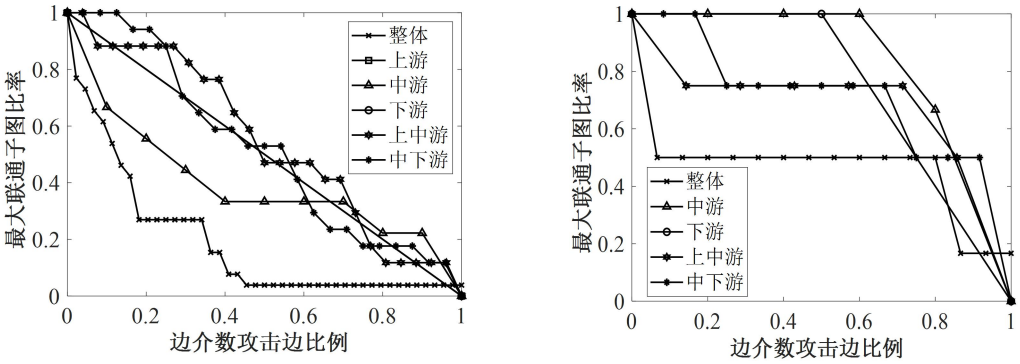
附图 2-B　对节点蓄意攻击下的最大联通子图比率



2018 年



2019 年



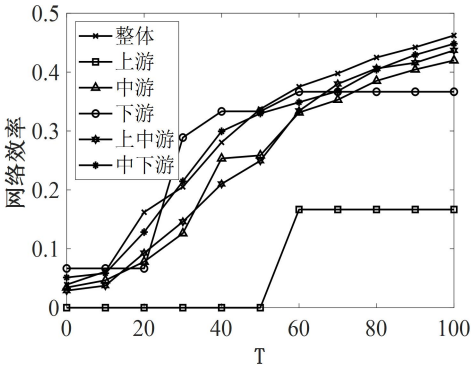
2020 年　　2021 年

附图 2-C　对连边蓄意攻击下的最大联通子图比率

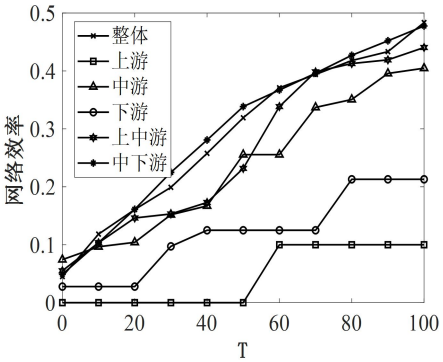
附录 4：恢复策略参数设置

基于附录 1 中的恢复策略，在仿真模拟实践中，假设$a = b = [0.5, 1]$；$K = 0.1$（周国华等，2020）；为展示局部恢复效果，将博弈次数设置为 100 次（$T = 100$）；$S_E = S_o = \Delta S = 5$；$S_N = 4$；$F = 0.6$；$G = 2$；$\alpha_i = \frac{C_D(V_i)}{C_D(V_i)+C_D(V_j)}$；$\alpha_j + \alpha_i = 1$。基于此，分别对冲击后和冲击前的网络进行恢复和优化，以对比显示链长制对于恢复期和常态化的产业链韧性的恢复能力及优化能力。

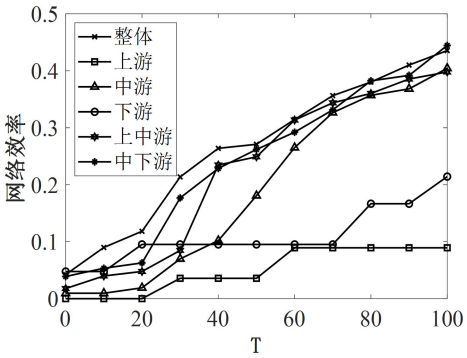
附图 3：恢复和优化下的网络效率图



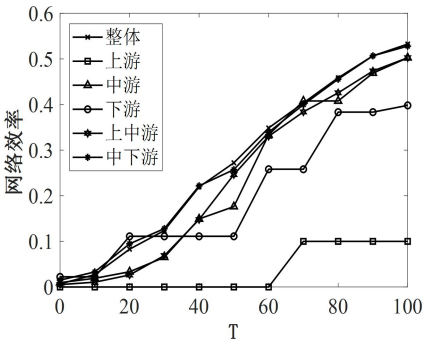
2018 年



2019 年

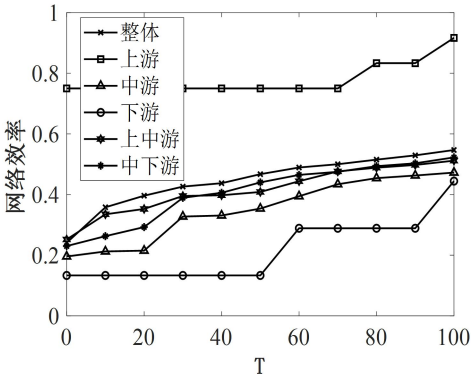


2020 年

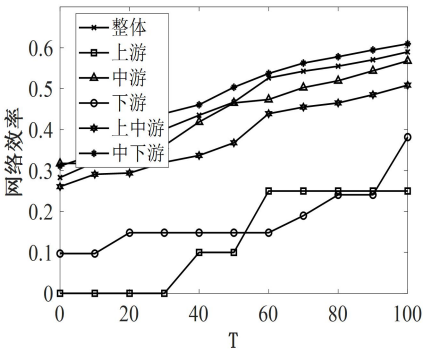


2021 年

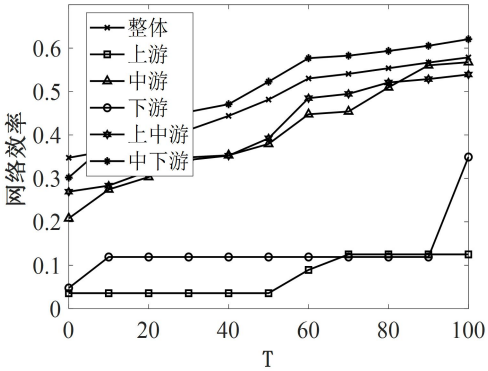
附图 3-A　链长制作用下的网络恢复效果（网络效率）



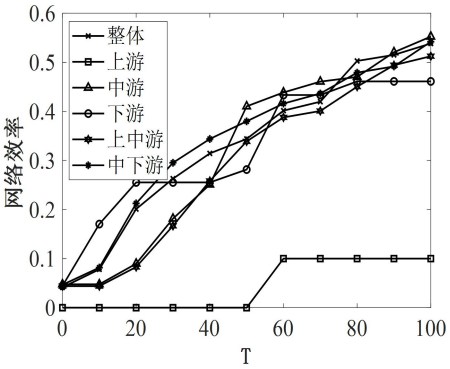
2018 年



2019 年



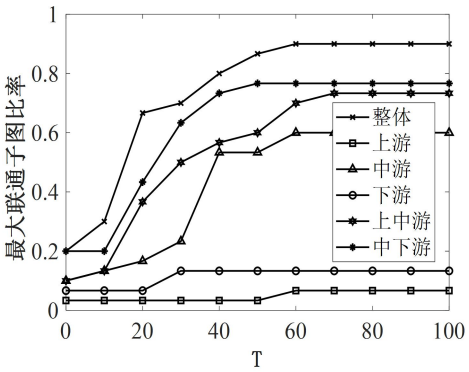
2020 年



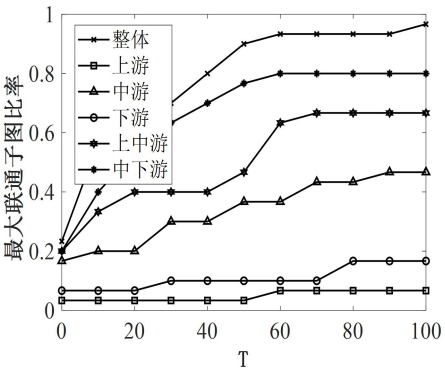
2021 年

附图 3-B　链长制作用下的网络优化效果（网络效率）

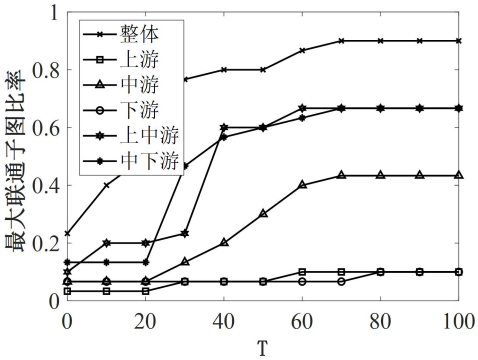
附图 4：恢复和优化下的最大联通子图比率图

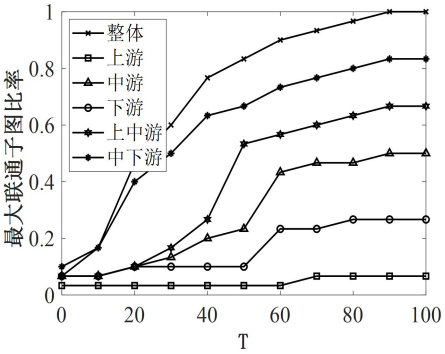


2018 年



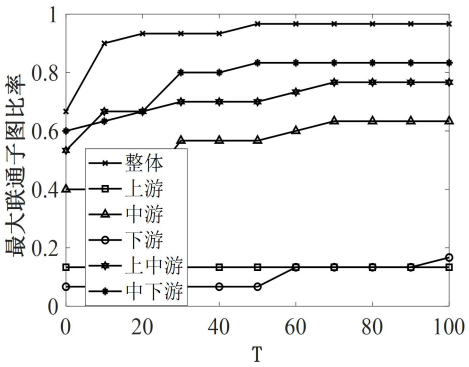
2019 年

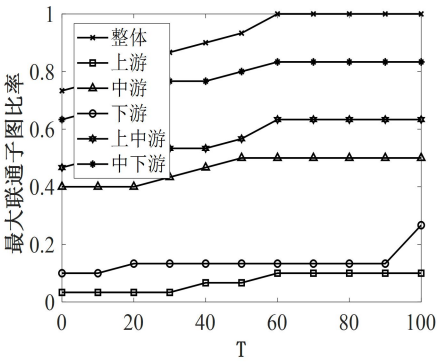




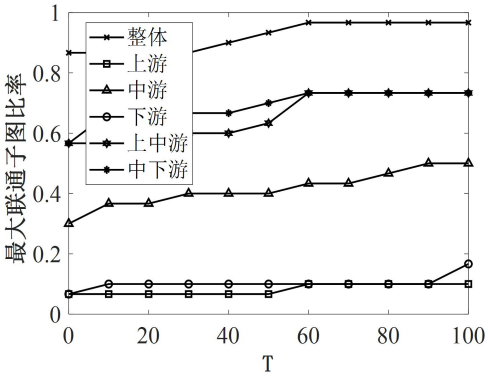
2020 年　　2021 年

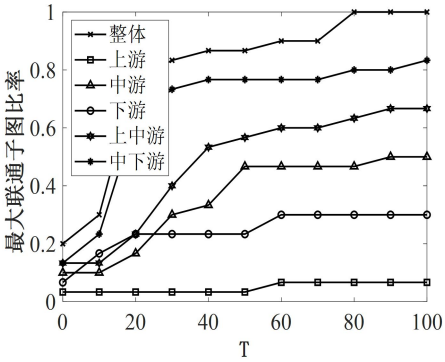
附图 4-A　链长制作用下的网络恢复效果（最大联通子图比率）





2018 年　　2019 年





2020 年　　2021 年

附图 4-B　链长制作用下的网络优化效果（最大联通子图比率）

附录 5：链长制提升产业链韧性的效用：多时点双重差分模型的基准

回归结果、平行趋势检验与稳健性检验

1、回归结果分析

回归结果见附表 5-1，无论加入控制变量与否，核心解释变量DID_{it}的系数都显著为正，表明链长制的实施能够有效提升人工智能产业链韧性。再次论证了假设 H1 的合理性，同时也佐证了仿真模拟的分析结果。

附表 5-1 基准回归结果

变量	产业链韧性（ICR） （1）	产业链韧性（ICR） （2）
DID	0.012***	0.013***
	（4.030）	（3.790）
Yysr		0.002
		（0.370）
Capital		0.013**
		（2.010）
Density		-0.057
		（-0.880）
_cons	0.420***	0.7520
	（211.790）	（1.640）
个体效应	控制	控制
时间效应	控制	控制
N	1096.000	1096.000
F	16.242***	5.429***
R^2	0.019	0.026

注：圆括号中为 t 值；*、＊＊、＊＊＊分别表示显著性水平为 10%、5%和 1%。

2、稳健性检验

采用反事实检验方法。将实施链长制的时间提前 1 期进行回归。检验结果均显示核心解释变量DID_{it}的估计系数显著为正，表明链长制政策能够显著提升产业链韧性的结论具有稳健性。

附表 5-2 反事实检验

变量	产业链韧性（ICR） （1）
_D_F1	0.017***
	（4.250）
Yysr	0.005
	（0.650）
Capital	0.008
	（1.010）
Density	-0.028
	（-0.310）
_cons	0.487

	（0.760）
个体效应	控制
时间效应	控制
N	822.000
F	5.933***
R^2	0.042

注：圆括号中为 t 值；*、＊＊、＊＊＊分别表示显著性水平为 10%、5%和 1%。

6、平行趋势检验

平行趋势检验结果为通过。

附表 5-3　　平行趋势检验

F(1,267)=0.07
Prob> F=0.7917
RESULT: 'Parallel-trend' passed