

DOI: 10.16750/j.adge.2021.11.002

# 博士生教育的链式反应规律

董 渊 王任模 钟晓征 刘丽霞 章 燕

**摘要:** 基于连续函数近似, 给出博士生教育动力学模型, 发现其主要规模数据可以用链式反应类似的数学方程描述, 符合指数变化规律。定义博士生教育成长指数并根据其取值划分为爆炸式增长、指数衰减和临界振荡三种发展模式。对美国 160 年来博士学位授予数据、中国 40 年来在学博士生规模等数据进行分析, 并对当前全球四大经济体美国、中国、日本和德国 60 年来博士学位授予数据进行对比分析。结果显示链式反应模型具有良好的描述能力, 指数函数可以很好地近似主要规模数据的变化规律, 揭示了博士生教育不断延续发展并包含创新知识、创新能力传播传承的基本特征。根据历史数据和本文模型, 初步给出四大经济体未来 20~30 年间博士生教育规模“不容乐观”的预测, 美国可能进入“新冠”“衰减-恢复”周期, 德国可能维持临界振荡甚至进入衰减, 日本可能持续衰减, 中国有望保持增长。

**关键词:** 博士生教育; 动力学模型; 链式反应; 指数规律; 成长指数; 规模预测

**作者简介:** 董渊, 清华大学研究生院副院长, 副研究员, 北京 100084; 王任模, 清华大学研究生院综合办公室主任, 六级职员, 北京 100084; 钟晓征, 清华大学学位办公室副主任, 六级职员, 北京 100084; 刘丽霞, 清华大学研究生院培养办公室副主任, 六级职员, 北京 100084; 章燕, 清华大学研究生招生办公室副主任, 六级职员, 北京 100084。

博士生教育肩负着最高层次创新人才培养任务, 具有不可替代的重要作用。在国家层面, “研究生教育是一国竞争力和创新力的基础”<sup>[1]</sup>, 博士生教育则是最为关键的基础, 已经成为一国竞争力、创新力和可持续发展能力的关键指标。在学校层面, “一流博士生教育体现一流大学人才培养的高度”<sup>[2]</sup>, 博士生教育也是一流大学和一流学科建设的重要内涵和指标。

## 一、博士生教育规律探索

研究生教育规律是大家长期关注的重要研究话题<sup>[3]</sup>。杨卫采用连续介质力学方法论, 在学科空间和历史维度组成的时空构架下讨论研究生教育, 给出一种定量分析方法和思路<sup>[4]</sup>, 预测了若干研究生教育定性特征<sup>[5]</sup>, 并建立中国研究生教育规模 40 年演化模型<sup>[6]</sup>。针对博士生教育规模, 学界发展了一系列基于统计方法的定量模型, 如用于中国博士生教育规模增长预测分析的自回归滑动平均模型<sup>[7]</sup>、基于完成率与流失率测算美国在学博士生规模的时间序列

模型<sup>[8]</sup>, 以及美国国家教育统计中心 (National Center for Education Statistics, NCES) 用于博士学位授予规模预测的多元线性回归模型<sup>[9]</sup>等。

在这些工作的基础上, 本文尝试探讨更为普适的时间序列模型, 以定量描述和分析世界主要经济体的博士生教育规模发展历史和现状, 进而预测未来发展趋势。

## 二、链式反应: 博士生教育动力学模型

### 1. 离散迭代模型

某一国家或地区在相同经济、科技和教育政策影响范围内, 博士生在学规模可作为一个以年度为单位的时间序列, 由上年在学规模、当年招生规模、当年退出规模、当年获得学位规模决定<sup>[8]</sup>。

记  $t+1$  年博士生在学规模 (Enrollment) 为  $E(t+1)$ , 则有:

$$E(t+1)=E(t)+A(t+1)-Q(t+1)-C(t+1) \quad (1)$$

其中:  $E(t)$  为  $t$  年在学规模,  $A(t+1)$ 、 $Q(t+1)$  和

基金项目: 中国学位与研究生教育学会 2020 年研究课题“新时代直博招生方式的模式创新与策略研究”(编号: 2020ZAA10)

$C(t+1)$ 分别为  $t+1$  年招生规模 (Admission)、退出规模 (Quitted) 和获得学位规模 (Conferred)。

指导教师通常由博士学位获得者担任,在博士生培养过程中具有重要的作用,对招生规模和培养质量有重要影响。通常每位指导教师每年只招收少量博士生,并保持一定师生比。考虑博士生招生跨年实施,定义  $t$  年指导教师规模 (Supervisor) 为  $S(t)$ 、招生比为  $\alpha(t)$ ,则  $t+1$  年招生规模  $A(t+1)$  为:

$$A(t+1)=\alpha(t)S(t) \quad (2)$$

定义  $t$  年师生比  $\rho(t)$ 、退出率  $\varepsilon(t)$ 、学位获得率  $\beta(t)$ ,得到指导教师规模  $S(t)$ 、退出规模  $Q(t+1)$  和获得博士学位规模  $C(t+1)$  分别为:

$$S(t)=\frac{1}{\rho(t)}E(t) \quad (3)$$

$$Q(t+1)=\varepsilon(t)E(t) \quad (4)$$

$$C(t+1)=\beta(t)E(t) \quad (5)$$

由式(1)—(5)可逐年计算博士生教育规模数据。

定义博士生教育成长指数  $\mu(t)$  为:

$$\mu(t)=\frac{\alpha(t)}{\rho(t)}-\varepsilon(t)-\beta(t) \quad (6)$$

将等式(2)—(6)代入等式(1),则得到在学规模逐年迭代表达式为

$$E(t+1)=E(t)+\mu(t)E(t) \quad (7)$$

## 2. 连续时间模型

考虑用以时间  $t$  为自变量的连续函数分别近似上述迭代模型中指导教师规模、在学规模、招生规模、退出规模、获得学位规模,以及招生比、退出率、学位获得率和师生比等参数的离散时间序列,由式(7)可知时段  $\Delta t$  前后在学规模满足:

$$E(t+\Delta t)-E(t)=\mu(t)E(t)\Delta t \quad (8)$$

两边同除以  $\Delta t$ ,当  $\Delta t \rightarrow 0$ ,则得到在学规模的动力学方程为:

$$E'(t)=\mu(t)E(t) \quad (9)$$

成长指数常数近似。 $\mu(t)$ 由招生比  $\alpha(t)$ 、退出率  $\varepsilon(t)$ 、学位获得率  $\beta(t)$ 、师生比  $\rho(t)$ 等参数确定,而这些参数应当与社会经济、科技发展阶段相适应,受社会发展、教育投入、科技政策和教育政策影响。考虑到经济、科技和教育发展具有相对稳定的特征,

这些参数将表现出一定的局部性特征,也就是说相关参数是时间的函数,且在一定时段内保持相对稳定,具有较为明显的阶段性特征。

为此,假设成长指数  $\mu(t)$ 在十余年甚至更长的时段内大致保持不变,在探讨规模数据年度变化规律时,取某时刻  $t_0$ 处幂级数展开式的常数项  $\mu(t_0)$ 作为近似,记为  $\mu$ ,得到式(9)的近似方程:

$$E'(t)=\mu E(t) \quad (10)$$

求解上述常微分方程得到在学规模  $E(t)$ 的解析解为:

$$E(t)=E_0 e^{\mu t} \quad (11)$$

其中初始值  $E_0$ 为起始年份第0年的在学规模。同样考虑阶段性特征,取招生比、退出率、学位获得率和师生比等参数的常数项近似,记为  $\alpha$ 、 $\varepsilon$ 、 $\beta$ 和  $\rho$ ,根据参数定义,可得:

$$S(t)=\frac{1}{\rho}E_0 e^{\mu t} \quad (12)$$

$$A(t+1)=\frac{\alpha}{\rho}E_0 e^{\mu t} \quad (13)$$

$$Q(t+1)=\varepsilon E_0 e^{\mu t} \quad (14)$$

$$C(t+1)=\beta E_0 e^{\mu t} \quad (15)$$

积分求得历年累计获得学位规模如下,其中  $T_{C0}$ 为与第0年累计授予规模有关的常数:

$$T_C(t+1)=\int_0^{t+1} C(\tau)d\tau=\frac{\beta}{\mu}E_0 e^{\mu t}+T_{C0} \quad (16)$$

式(11)—(16)构成博士生教育动力学模型,给出博士生教育主要规模数据变化规律。已知  $T_{C0}$ 、初始值  $E_0$ 和  $\alpha$ 、 $\varepsilon$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 等参数,就可以计算各年规模数据,而通过对历年数据拟合进行参数估计,可以用此模型进行规模预测。

## 3. 链式反应特性分析

(1)链式反应。指数函数的导数仍是指数函数。因此博士生教育动力学模型表明在学博士生规模等数据的速度(一阶导数)、加速度(二阶导数)均遵循指数变化规律且与其自身成正比。模型揭示了“博士生教育的结果中包含有博士生教育发生的条件,具有启动新的博士生教育过程的作用”的特征,符合链式反应(Chain Reaction)<sup>①</sup>的定义<sup>[10]</sup>。同时,

①也称连锁反应或链反应,本用于描述物理与化学过程,也被用来描述一切迅速发展过程。

博士生教育动力学模型表明,指导教师规模、在学规模、招生规模、退出规模、获得学位规模和累计获得学位规模等主要数据都遵循指数变化规律,可以使用与化学过程的支链反应<sup>[11]</sup>、原子物理的自持链式裂变反应<sup>[12]</sup>类似的数学方程描述<sup>[13]</sup>。

本文采用博士生教育链式反应(The Doctoral Education Chain Reaction, DECR)来描述和分析博士生教育,这可以更为深入地重新理解博士生教育不断延续发展并包含创新知识、创新能力传播传承的基本特征,其中指导教师与博士生之间、博士生相互之间的交流互动是传播的重要组成部分。

成长指数  $\mu$  是博士生教育动力学模型的关键控制参数。参照原子物理链式反应模型<sup>[13]</sup>,可以依据成长指数取值给出博士生教育的三种发展模式:当成长指数  $\mu > 0$  时,相关规模数据依照指数规律增长,不论初值  $E_0$  如何,其规模都将不断增加,类似于原子弹的爆炸式增长模式(Explosion Mode, E Mode)。当成长指数  $\mu < 0$  时,相关规模数据依照指数规律递减,为指数衰减模式(Attenuation Mode, A Mode)。而满足上述两种情况之间的条件,即当成长指数  $\mu = 0$  时,则当年新增和减少(获得学位及退出)的博士生数量大致相当,相关规模数据将大致维持在一定的数量,处于临界状态,为临界振荡模式(Critical Mode, C Mode)。

(2) 指数传播。从博士生教育动力学模型可知,总体上相关规模数据都遵循指数变化规律。考虑到博士生教育涉及的群体在整个人类群体中的占比很小,其规模增长规律与链式反应早期传播阶段的规律相类似。为此,定义博士生教育年度再生数  $R_0$  (Multiplication Factor) 为:

$$R_0 = \frac{E(t+1)}{E(t)} = e^\mu \quad (17)$$

$e^\mu$  在  $\mu = 0$  附近的幂级数展开表达式为:

$$e^\mu = 1 + \mu + \mu^2/2 + O(\mu^2) \quad (18)$$

根据  $R_0$  和  $\mu$  的取值,可以将增长速度简单分为低、中、高三种类型。其中,低速增长,当  $1.01 \geq R_0 > 0.0$ , 大约对应  $0.01 \geq \mu > 0$  时,式(18)的一阶近似  $e^\mu = 1 + \mu$  成立,即在学规模接近线性增长;中速增长,当  $1.1 \geq R_0 > 1.01$ , 大约对应  $0.1 \geq \mu > 0.01$  时,式(18)

的二阶近似  $e^\mu = 1 + \mu + \mu^2/2$  成立,即在学规模接近二次函数方式增长;高速增长,当  $R_0 > 1.1$ , 大约对应  $\mu > 0.1$  时,在学规模以高于二次函数的方式增长。类似地,  $\mu$  取负值可以定义低、中、高速衰减。

据此,当招生比、退出率和学位获得率大致保持不变时,考虑指导教师通常由博士学位获得者担任的实际情况,如果更高比例博士学位获得者作为指导教师持续投入博士生教育再生产,则成长指数  $\mu$  的数值将更大,后续几年间博士学位授予数量将增长更快。而如果博士学位获得者从事教职之外工作的比例持续上升,则成长指数  $\mu$  的数值将变小,后续博士学位授予数量将受到影响。更进一步,如果更多博士学位获得者扩散到教育行业之外、年度招生人数减少以及更多在学博士生退出,成长指数  $\mu$  的数值将进一步变小,为 0 甚至为负数,博士生教育将进入临界甚至衰减模式。

(3) 分段特征。考虑研究生教育相关参数的阶段特征,可以采用分段滚动模型来进行分析和预测。以在学规模为例,假设分为  $n$  段,其中  $i = 0, 1, \dots, n-1$ ,  $t_i$  为各段的起始年份,则可以分段表示为:

$$E_i(t) = E_{0i} e^{\mu_i(t-t_i)} \quad (19)$$

#### 4. 自然对数坐标模型

考虑到博士生教育动力学模型中主要规模数据都遵循指数变化规律,为方便数据分析,对模型等式(11) — (16) 两边取自然对数。例如博士生在学规模为:

$$\ln E(t) = \mu t + \ln E_0 \quad (20)$$

指导教师规模、招生规模、退出规模、获得学位规模和历年累计获得学位规模均有类似表达。取自然对数之后的规模数据均遵循线性变化规律,保持相同的斜率  $\mu$ , 但具有不同的截距。

同样地,参照式(20)可以得到类似  $\ln E_i(t) = \mu_i(t-t_i) + \ln E_{0i}$  的分段表达式。此时,在以时间为 X 轴、求取自然对数后的规模数据为 Y 轴的单自然对数坐标系中,各规模参数的图形展现为一组相互平行的线段,可以通过分段线性拟合来估计成长指数  $\mu$ , 或者通过对博士生教育年度再生数  $R_0$  取自然对数之后分段平均的方式快速估算  $\mu$ , 而根据截距及截距间的关系,可分段估计  $\alpha$ 、 $\varepsilon$ 、 $\beta$ 、 $\rho$  等参数。

### 三、世界四大经济体博士生教育规模发展分析

1861年耶鲁大学授予三位年轻人博士学位<sup>[14]</sup>，拉开了美国博士生教育的帷幕。进入21世纪后各国博士生教育规模增长势头依然不减<sup>[15]</sup>，目前已经成爲高层次创新人才的主要培养途径，越来越多地被当作一种战略资源<sup>[16]</sup>。文中收集当前世界四大经济体美国、中国、日本和德国博士生教育历史数据，求取自然对数后，采用最小二乘法进行分段线性拟合，综合考虑全局残差确定分段点，根据各国发展情况，以及当时对各国社会、经济和教育具有重要影响的事件分别命名。运用上节给出的分段线性模型进行初步分析，以检验其描述能力。

#### 1. 曲折发展：160年美国博士生教育

采用文中的动力学模型，对美国近160年的博士学位授予数据<sup>①</sup>进行分析。单自然对数坐标下美国历年学术类博士、实践类博士、合计博士学位授予数据见图1，图中同时绘出部分分段线性拟合得到的线段，其斜率给出各阶段成长指数 $\mu$ 的数值，可以看到学术类博士生教育大致经历三个发展阶段。

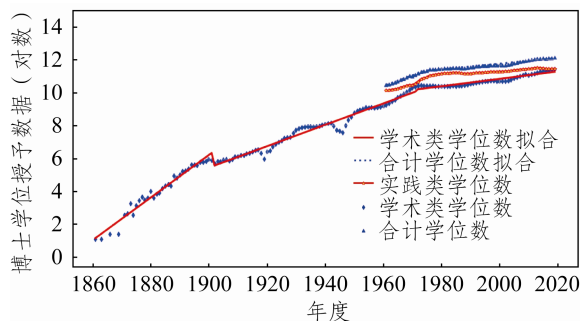


图1 美国1961—2019年博士学位授予情况  
(单自然对数坐标)

(1) 美国学术类博士生教育发展三阶段。第一个阶段为“形成阶段”，自1861年起，经历40余年逐步完成了美国博士生教育体系构建，这个阶段博士学位授予数量增长并不明显，但考虑到基数很低，实际是成长指数为0.13的高速增长阶段，期间博士

学位获得者以学术精英为主。其中1861—1870年10年处于早期起步发展，博士生主要由耶鲁大学培养，每年授予数量非常有限，不具备连续稳定产出，某些年份授予数甚至为零。自进步时代(Progressive Era)美国博士生教育进入“工业化时代”发展阶段，70多年间按照大约0.065的成长指数持续发展，这个阶段的博士学位获得者以白人男士为主。20世纪70年代以来进入“信息化时代”发展阶段，以0.023的成长指数发展，这个阶段博士学位获得者来源更为多元，女性、少数族裔、国际学者所占比例逐步增大<sup>[17]</sup>。可以看到，随着学位授予规模的不断扩大、学位获得者来源多样性的不断增加，特别是随着博士学位获得者职业发展更为多样，进入教职之外就业比例的不断加大，三个阶段的成长指数逐步降低。分段线性拟合给出模型相关参数：

$$\ln C_i(t) = \mu_i(t - t_i) + \ln C_{0i} \quad (21)$$

其中 $i=0,1,2$ ，表1给出三个阶段的主要参数。需要说明的是，此模型只是给出各阶段的大致发展趋势，更精细的建模和预测，需要在更短的时间段内进行拟合计算。

表1 美国学术类博士生教育160年发展分段拟合参数

阶段名称	$C_{0i}$	$\mu_i$	$t_i$	起止时间
形成阶段	3	0.13	1861	1861—1901
工业化时代 发展阶段	261	0.065	1902	1902—1971
信息化时代 发展阶段	27166	0.023	1972	1972—2019

(2) 美国学术类博士生教育发展的拟周期变化。从图1可以看到，美国一百多年来学术类博士生教育发展呈现明显的“衰减-恢复”周期性起伏变化。从时间上看，其变化周期不完全一致，约在20到30年之间，可认为是拟周期(准周期, Quasi-periodic)变化。

其中，“工业化时代”发展阶段包含三个“衰减-恢复”周期，各周期衰减“谷底”分别为1919年、1946年和1960年。根据当时具有重要影响的事件

①来源：1861—1958年学术类博士学位授予数据来自 American Universities and Colleges (8th Ed.), 1960年。1959年学术类博士学位授予数据来自 Academic Degrees: Earned and Honorary Degrees Conferred by Institutions of Higher Education in the United States, 1960年。1960—2019年数据来自 NCES 官方网站，其中2010—2019年学术类博士(含哲学博士和教育博士等专业博士)数据参照文献[8]的方案由博士学位授予总数和实践类博士(主要是原第一职业学位 FPD)数据推算得到。跨年度统计数据计入截止年份。

分别命名为“一战”周期、“二战”周期、“冷战前期”周期。可以看到，第一、第二次世界大战期间出现了非常明显的博士学位授予规模短期强烈衰减，随后有较为强劲的恢复，而人们所熟知1958年《国防教育法案》<sup>[18]</sup>签署通过之后10多年的博士学位授予规模爆炸性增长，在图1中可以看作为“冷战前期”周期小幅衰减之后的强劲恢复阶段。

“信息化时代”发展阶段，到目前为止含两个“衰减-恢复”周期，其衰减“谷底”为1987年和2002年，分别命名为“冷战后期”周期和“后冷战”周期。其中“冷战后期”20多年间，美国学术类博士生教育处于临界模式甚至低速衰减模式中，出现了博士学位获得者“稳定地远离教育和基础科研之外的趋势，某些领域的研究生在毕业后长时期内面临着两位数的失业率”的情况<sup>[19]</sup>。从世纪之交起，美国学术类博士生教育处于“后冷战”周期，经过短暂小幅衰减之后，保持连续10多年的增长态势。

图1中还可以看到，每一个周期中的衰减时期，成长指数甚至为负数，即博士学位授予数出现指数衰减，而在衰减一段时间之后，以高于所在阶段成长指数进行增长恢复，博士学位获得者规模迅速扩张，但同一周期内总体保持着与该阶段较为一致的成长指数趋势。当然，每个周期衰减和恢复的时长、幅度都与当时经济和社会发展情况相适应，具有各自的鲜明特点。

美国合计博士学位授予数据。美国NCES博士学位授予统计口径经历过两次大调整<sup>[20]</sup>，1960年起将之前计入学士学位(Bachelor's Degree)的第一专业学位(First Professional Degrees, FPD)数据单独归类，2008—2009年度起，将FPD的大部分数据计入博士学位(Doctor's Degree)。从图1中1960年以来美国实践类博士学位授予数据和合计博士学位授予数据，以及合计授予数据的线性拟合结果，可以看到，20世纪70年代初，学术类博士学位授予数据进入“冷战后期”周期衰减通道时，实践类博士学位

授予数据成长指数经历了由降低到升高的变化，其授予数据持续增长一段时间，使得合计数据增长趋势一直持续到20世纪70年代中期。2019年美国博士学位授予总数18.76万个，其中实践类博士学位9.57万个，据此推算学术类博士学位约9.19万个。

### 2.快速扩散：40年中国博士生教育

中国40年来博士生教育取得长足进步，形成独立自主且极具竞争力的高层次创新人才培养体系。1978年恢复研究生招生、培养，部分高校当年起招收少量四年制研究生，1981年学位条例实施，1982年首批授予博士学位13人，到目前累计授予博士学位约100万人，有力地支持了国家创新发展<sup>①</sup>。

采用本文动力学模型，对中国40年来博士生教育数据<sup>②</sup>进行分析。单自然对数坐标下中国历年博士生导师数据、招生数据、在学数据和学位授予数据如图2，图中同时绘出分段线性拟合得到的线段。可以看出，自然对数坐标下中国博士生教育规模的发展同样具有明显的线性分段特征，大致经历了具有不同成长指数 $\mu$ 的三个发展阶段，图中拟合线段的斜率分别给出各阶段成长指数 $\mu$ 的数值。

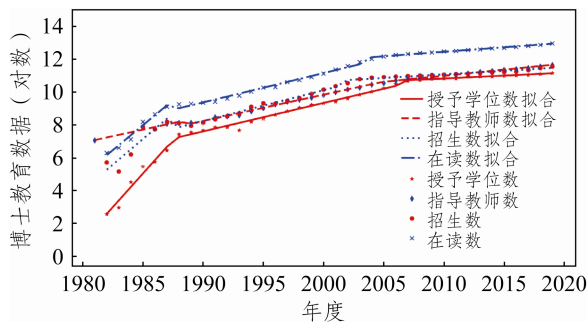


图2 中国1981—2019年博士生教育发展数据  
(单自然对数坐标)

除20世纪80年代起步阶段之外，几组数据展现为近似平行的线段，其中成长指数、招生比、退出率、学位获得率、生师比等参数在10余年甚至更长时段内大致保持不变，满足常数近似假设。其中，指导教师数据在世纪之交增速明显趋缓，之后招生

①来源：中华人民共和国国务院学位委员会办公室《1981—2021中国学位四十年》。

②1981年学位条例实施以来数据，不含港澳台。数据来源：1981年指导教师数据来自国务院学位委员会办公室公开信息，1987—2019年指导教师数据来自《中国教育统计年鉴》；其余数据来自中国学位与研究生教育发展年度报告课题组《中国学位与研究生教育发展年度报告2019》，北京：社会科学文献出版社2021年版。

规模增速于 2003 年后出现下降,进而导致在学数、学位授予数增速相继下降。而招生数据、学位授予数据增速下降出现时间点大约有 4~5 年的间隔。

以博士学位授予数据为例,1982—1987 年为第一个发展阶段,中国博士生教育从零起步,具有明显的爆炸式增长特点,其成长指数接近 0.82,称之为“高速起步”阶段。1988—2006 年为第二个发展阶段,成长指数约为 0.17,增长速度放缓,我们称之为“稳步增长”阶段。2007—2019 年为第三个发展阶段,成长指数下降到约为 0.036,增长速度进一步放缓,称之为“全球化发展”阶段。总体来看,40 年来成长指数逐步变小,表明博士学位获得者在社会上的扩散逐步增强,职业发展更为多样,越来越多的博士学位获得者选择在高校之外就业。

### 3. 全球同步变化: 四大经济体规模发展对比

近年来欧洲博士生培养模式、目标和取向呈现多样化的发展态势<sup>[21]</sup>。德国是其代表,被看作是重新定义博士生教育以实现高层次人才非学术就业的成功典范<sup>[15]</sup>。

日本博士生教育在二战后正式起步,参照美国方式并部分保留欧洲传统色彩,以师资培养为主<sup>[22]</sup>。20 世纪 70 年代开始推行一系列改革,80 年代末期实施扩招政策<sup>[23]</sup>,博士生培养规模不断扩大,21 世纪初达到峰值后,近年来甚至出现以博士就业率严重下滑为标志的系统性危机<sup>[15]</sup>。

采用本文动力学模型,对 1960 年以来德国、日本博士学位授予总数<sup>①</sup>和同期美国、中国的博士学位授予总数进行对比分析。单自然对数坐标下各国历年数据如图 3,图中同时绘出分段线性拟合得到的线段。可以看到,图 3 中各国博士生教育发展均具有明显的线性分段特征,拟合线段的斜率给出各阶段成长指数  $\mu$  的数值,各国线段均随着时间推移逐步趋于平缓,表明博士学位获得者逐步向教育部门之外扩散是全球四大经济体共同的发展趋势。

(1) 规模比较。从规模上看,美国合计博士学位授予数 60 年间一直保持全球领先地位,每年学术类、实践类博士学位获得者的合计授予总数,超过

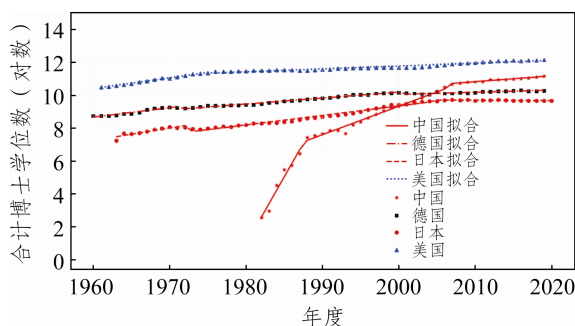


图 3 四大经济体 1960 年以来博士学位授予数据对比  
(单自然对数坐标)

中、日、德三国的总和。20 世纪,德国、日本的博士学位授予数高于中国。21 世纪开始的 5 年间,中国的博士学位授予总数先后超越日本和德国。2019 年中国博士学位授予总数为 6.94 万个,约为美国当年各类博士学位授予总数 (18.76 万个) 的三分之一,仍远少于当年美国学术类博士学位授予数 (9.19 万个)。

(2) 全球同步变化。博士生教育通常基于研究实践来培养创新人才,参与人员交流频繁,成果发表遵循全球通行的流程,因而在研究问题选择、研究工具使用和创新成果评价方面,具有明显的全球化特征。与此同时,全球化加剧世界性的不平等,使得学术权力掌握在发达国家实力雄厚的大学手中<sup>[24]</sup>。对比图 3 数据可以看到,60 年间各国的成长指数同步地发生了两次明显的变化。第一次变化发生在 20 世纪 70 年代,对应美国学术类博士“冷战后期”周期之初,美国、德国和日本的成长指数先后出现了明显的降低,可以认为是全球信息化时代来临,各国的博士生教育相互影响造成的变化,当时中国博士生教育尚未起步。第二次变化发生 21 世纪初期,对应美国学术博士“后冷战”周期开始阶段,中国、德国和日本的成长指数均发生了显著下降。其中:中国的成长指数于 2007 年首次降低到 0.1 之下,中速增长运行至今;德国的成长指数于 2000 年开始趋近于 0,处于临界振荡模式边缘,而近几年数据表现出明显的振荡特征;日本的成长指数于 2005 年开始变为负数,进入低速指数衰减模式,一直持续至今。这种全球同步变化的一种可能

①来源:美国、中国博士学位授予数据来源同前。德国博士学位授予数据来自 Federal Statistical Office, Fachserie 11 Reihe 4.2, Federal Ministry of Education and Research, 2021 年。日本博士学位授予数据来自 Portal Site for Japanese Government Statistics, 2021 年。

原因是,博士学位获得者可以更容易地在全球范围内更为广泛的行业间流动,而这一时期美国培养的博士学位获得者更具有竞争力,流动到其他国家后对当地的博士生教育造成一定抑制。在20世纪末加入全球贸易体系之后,中国也受到这种趋势的影响。

(3) 发展模式。从图3可以看到,从1960年至今的60年间,前文提到的三种发展模式都已经出现。总体来看,20世纪60年代到世纪之交,各国博士生教育均属于爆炸式增长模式。“中国速度”是60年间最大的亮点,中国博士生教育从零起步、高速发展、成就巨大,迅速形成独立自主的高层次创新人才培养体系,学位授予总数在发展20年后超过日本、发展25年后超过德国。其中1988—2006年间,连续18年保持高速增长,0.17的成长指数是目前研究中所看到的最高连续稳定增长数值,甚至高于美国1861—1901年最初形成阶段0.13的数值,有学者认为政府宏观计划的生长是中国这个阶段博士生教育规模扩张的直接动因<sup>[25]</sup>。根据本文的动力学模型,中国博士生教育的高速发展,关键在于大量博士学位获得者持续投身博士生教育事业,同时博士学位获得者也逐步扩散到教育系统之外,有力地支撑了中国的创新发展。21世纪初,这四个国家的成长指数同步下降,其中美国、中国仍然处于增长模式。日本的博士生教育进入指数衰减模式已经超过10年,目前没有看到任何转变的迹象。而德国10年来博士授予数据起伏波动变化剧烈,可以认为是处于临界振荡发展模式。

#### 四、趋势预测:增长、振荡还是衰减?

模型的价值在于趋势预测。综合动力学模型和60年历史数据展示出博士生教育具有全球同步变化的特点,初步判断全球四大经济体的博士生教育将进入新的发展时期。

##### 1. 衰减已经开始

从图1美国博士学位授予数据来看,近4~5年间,学术类博士生教育仍处于增长态势,而实践类博士生教育已处于衰减下降态势,合计数据出现增速放缓的趋势。相关走势类似于20世纪70年代初期的情况,此外,“后冷战”周期自21世纪初至今

经历了20余年的时间。根据历史数据和本文模型,初步预测美国学术类博士生教育极有可能进入新的“衰减-恢复”周期,考虑到目前全球新型冠状病毒流行以及由此造成人员交流受限和逆全球化趋势,这里将其命名为“新冠”周期。另外,《无尽前沿法案》<sup>[26]</sup>的进展可能对美国的创新体系和博士生教育产生重要影响,参照历史上的拟周期变化特点,预计美国学术类博士的“新冠”周期可能自近年开始并持续20~30年,情况类似“冷战后期”周期或者“二战”周期。如果美国整体经济和科学研究的形势不发生大的变化,那么博士学位获得者在社会各行业间扩散的特性应该不会有根本性变化,“新冠”周期大概率仍属于“信息化时代”发展阶段,将围绕这个阶段的成长指数线进行摆动,而其恢复时间点、经历时长和变化幅度则取决于疫情流行之后的经济和社会发展情况,特别是全球化发展形势。

同样,根据历史数据走势和本文模型,结合博士生教育全球同步变化的特点,进一步预测德国将维持临界振荡模式甚至有可能进入指数衰减模式,日本将继续其指数衰减模式。

##### 2. 未来不容乐观

考虑到新冠疫情应对得当、整体经济向好、科技创新需求增加,如果不发生新的形势变化和大的教育政策调整,中国博士生教育未来有望保持增长模式,而中美博士学位授予规模差距有望进一步缩小。综上,当前世界四大经济体博士生教育发展“不容乐观”。特别地,如果美国这个目前全球最大的博士学位生产国和输出国的博士生教育规模出现长期、大幅衰减,将对全球创新体系造成不可避免的冲击,将对全球创新能力提升和可持续发展带来不容小视的深远影响,需要深入研究并妥善应对。

#### 五、链式反应模型:一种定量分析探索

本研究基于动力学方程得到博士生教育链式反应模型,给出博士生教育定量分析的一种初步探索。

链式反应模型具有良好的描述能力。指数函数可以很好地近似博士生教育主要规模数据的变化规律,结果显示,单自然对数坐标下各国博士生教育发展均具有明显的分段线性特性,其成长指数能在10余年甚

至更长时段内大致保持不变,满足常数近似假设。

链式反应模型提供适用全球四大主要经济体、具有超过百年历史跨度的宏大分析视角。根据历史数据和本文模型,对美、中、日、德四国博士生教育规模发展趋势进行初步预测,相关结论有待更多的理论探讨,特别是基于人口结构、资源投入和发展模式的深入分析,更有待时间检验。

链式反应模型揭示了博士生教育主要规模数据的变化速度与自身成正比的特性,而支撑规模发展需要经费<sup>[6]</sup>等资源投入和政策支持,哪些具体因素、这些因素如何影响博士生教育的发展,以及这些因素与成长指数的关系,需要更为深入的探索。更进一步,针对“要更加重视人才自主培养”的要求<sup>[27]</sup>,基于模型的定量分析、提出合理的政策建议,以推动我国博士生教育长期健康发展,则是未来更为迫切、更为重要的方向。

**致谢:** 本文研究设想受到中国学位与研究生教育学会前任会长赵沁平院士关于开展研究生教育规律研究的激励,受到学会现任会长杨卫院士研究生教育动力学研究进展的启发。本文工作得到清华大学杨斌、陈皓明、王传毅、杨帆、赵忠升、李京京、孙春柳、赵思佳等老师的支持和帮助。美国博士生教育数据收集得到北京航空航天大学赵世奎、美国马里兰大学李腾两位教授的帮助。在此一并感谢。

#### 参考文献

- [1] Council of Graduate Schools and Educational Testing Service. The path forward: the future of graduate education in the United States[R]. Princeton, NJ: Educational Testing Service, 2010.
- [2] 邱勇. 一流博士生教育体现一流大学人才培养的高度[N]. 光明日报, 2017-12-05.
- [3] 赵沁平. 关于我国研究生教育的二十个问题[J]. 研究生教育研究, 2015(6): 1-2.
- [4] 杨卫. 研究生教育动力学——理论框架初探[J]. 学位与研究生教育, 2006(2): 1-9.
- [5] 杨卫. 研究生教育动力学——定性讨论与案例构想[J]. 学位与研究生教育, 2006(4): 8-14.
- [6] 杨卫. 研究生教育动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 189-195.
- [7] 杜帆, 李立国. 中国博士生教育规模增长预测分析[J]. 学位与研究生教育, 2020(6): 56-63.
- [8] 王传毅, 杨佳乐, 李伊明. 美国在学博士规模究竟有多大: 测算模型及其应用[J]. 研究生教育研究, 2019(1): 87-91.
- [9] HUSSAR W J, BAILEY T M. Projections of education statistics to 2028(47th Ed.) [EB/OL]. [2021-06-06]. <https://nces.ed.gov/programs/pes/index.asp>
- [10] Encyclopaedia Britannica. Chain reaction[EB/OL]. [2021-06-06]. <https://www.britannica.com/science/chain-reaction>.
- [11] 赵学庄. 化学反应动力学原理(上)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 198-254.
- [12] 杨福家, 陆福全, 等. 应用核物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018: 252-270.
- [13] 卓里奇. 数学分析(第一卷)(第4版)[M]. 蒋铎, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006: 264-266.
- [14] EELLS W C, HASWELL H A. Academic degrees: earned and honorary degrees conferred by institutions of higher education in the United States[J]. Bulletin, 1960: 28.
- [15] CYRANOSKI D, GILBERT N, et al. The PHD factory[J]. Nature, 2011(4): 276-279.
- [16] 科姆. 通向博士的路径: 在精英选拔与规模扩张之间[J]. 北京大学教育评论, 2009(2): 2-12.
- [17] 张炜. 中美博士研究生教育发展趋势比较分析[J]. 国家教育行政学院学报, 2008(5): 9-16.
- [18] The American Council on Education. American universities and colleges (8th Ed.)[M]. The American Council on Education, 1960: 63-67.
- [19] 科学、工程与公共政策委员会, 等. 重塑科学家与工程师的研究生教育[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1999: 43.
- [20] NCES. Degrees conferred by degree-granting institutions, by level of degree and sex of student: selected years, 1869-1870 through 2020-2021[EB/OL]. [2021-06-06]. [https://nces.ed.gov/programs/digest/d11/tables/dt11\\_283.asp](https://nces.ed.gov/programs/digest/d11/tables/dt11_283.asp).
- [21] KEHM B M. Reforms of doctoral education in Europe and diversification of types[G]//CARDOSO S, et al. Structural and institutional transformations in doctoral education. Springer, 2020: 85-103.
- [22] 熊庆年. 日本研究生教育改革十五年[J]. 学位与研究生教育, 2004(1): 56-59.
- [23] 吉田文. 日本研究生院扩招政策的影响[C]//2019 高等教育国际论坛年会论文集. 兰州, 2019.
- [24] 内拉德, 崔泽纳. 全球化与博士生教育——走向研究议程[G]//内拉德, 赫格兰德. 博士生教育全球化: 动力与模式. 李毅, 张国栋, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 207-215.
- [25] 赵世奎, 沈文钦. 中美博士生教育规模扩张的比较研究[J]. 教育研究, 2014(1): 138-149.
- [26] Congress of the United States. The endless frontier act[EB/OL]. [2021-06-06]. <https://www.congress.gov/117/bills/s/1260/BILLS-117s1260is.pdf>.
- [27] 新华社. 两院院士大会中国科协第十次全国代表大会在京召开 习近平发表重要讲话[EB/OL]. [2021-06-06]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/28/content\\_5613702.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/28/content_5613702.htm).

(责任编辑 刘俊起)