



第三章 能源转换

刘江华

liu.jianghua@shufe.edu.cn



能源转型——背景



Table 1

Evaluation of global energy consumption in the 11th century (Mtoe)

一、11

• 能

• 消

• 主

Energy source	Agriculture	Domestic	Transport	Industry	Total (%)
Human	0.07	0.24	0.02	0.05	0.38
Man	0.05	0.07	0.01	0.05	0.18
Woman	0.02	0.13	0.01	0.00	0.16
Child	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04
Bullock	0.08	0.00	0.16	0.00	0.24
Fuelwood	0.00	4.42	0.00	0.19	4.61
Wind and water	0.04	0.00	0.02	0.02	0.08
Total	0.19	4.66	0.20	0.26	5.31
(%)	3.6	87.8	3.8	4.9	100.0

%) 。

10%至

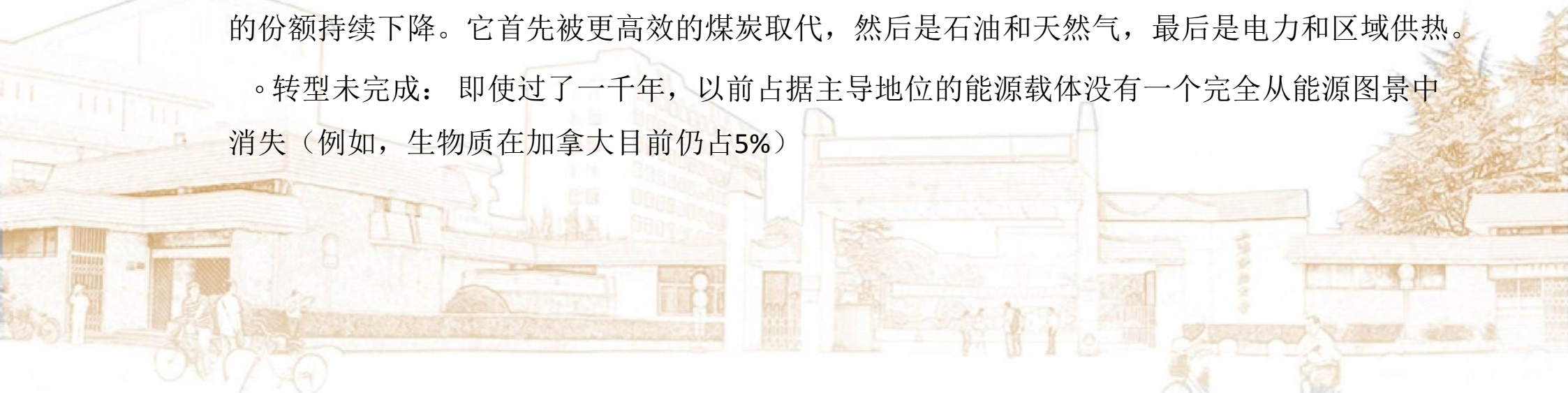
Calculated based on: Batliwala (1995); Melentiev (1997); and OECD (1998).

能源转型——背景



二、千年间的宏观变化 (11世纪到21世纪)

- 消费规模剧增：全球能源消费增长了约 2000倍（年均增长约0.8%）。
- 人均消费缓慢增长：人均能源消费增长了 6倍（年均仅增长0.1%）。
- 市场体系的建立：人类首先建立了全国范围、然后是区域性乃至全球性的能源市场。
- 能源来源的结构性转变：
 - 全球三分之二的人口已停止依赖非商业能源。
 - 能源质量持续提高（燃料替代）：生物质（空间供暖和烹饪效率为5%到30%）在能源平衡中的份额持续下降。它首先被更高效的煤炭取代，然后是石油和天然气，最后是电力和区域供热。
 - 转型未完成：即使过了一千年，以前占据主导地位的能源载体没有一个完全从能源图景中消失（例如，生物质在加拿大目前仍占5%）



能源转型——背景

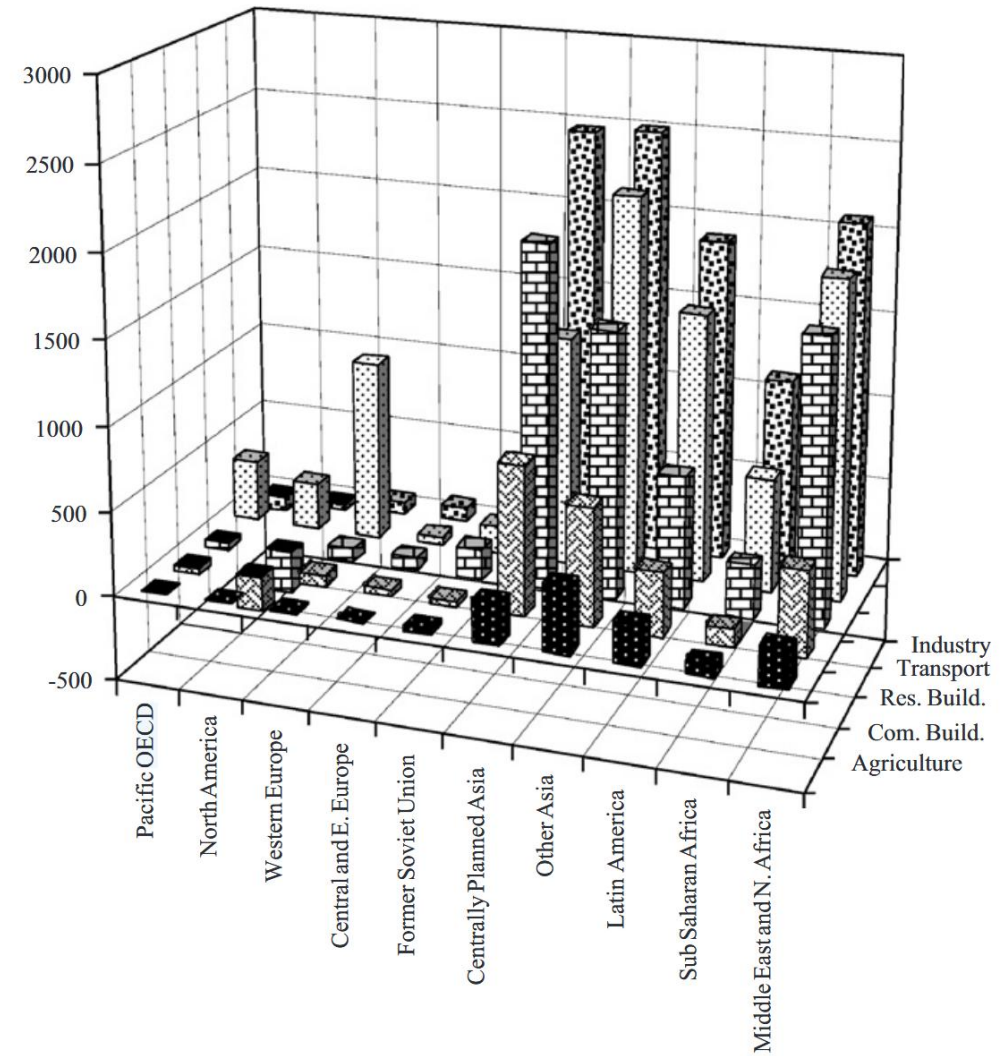
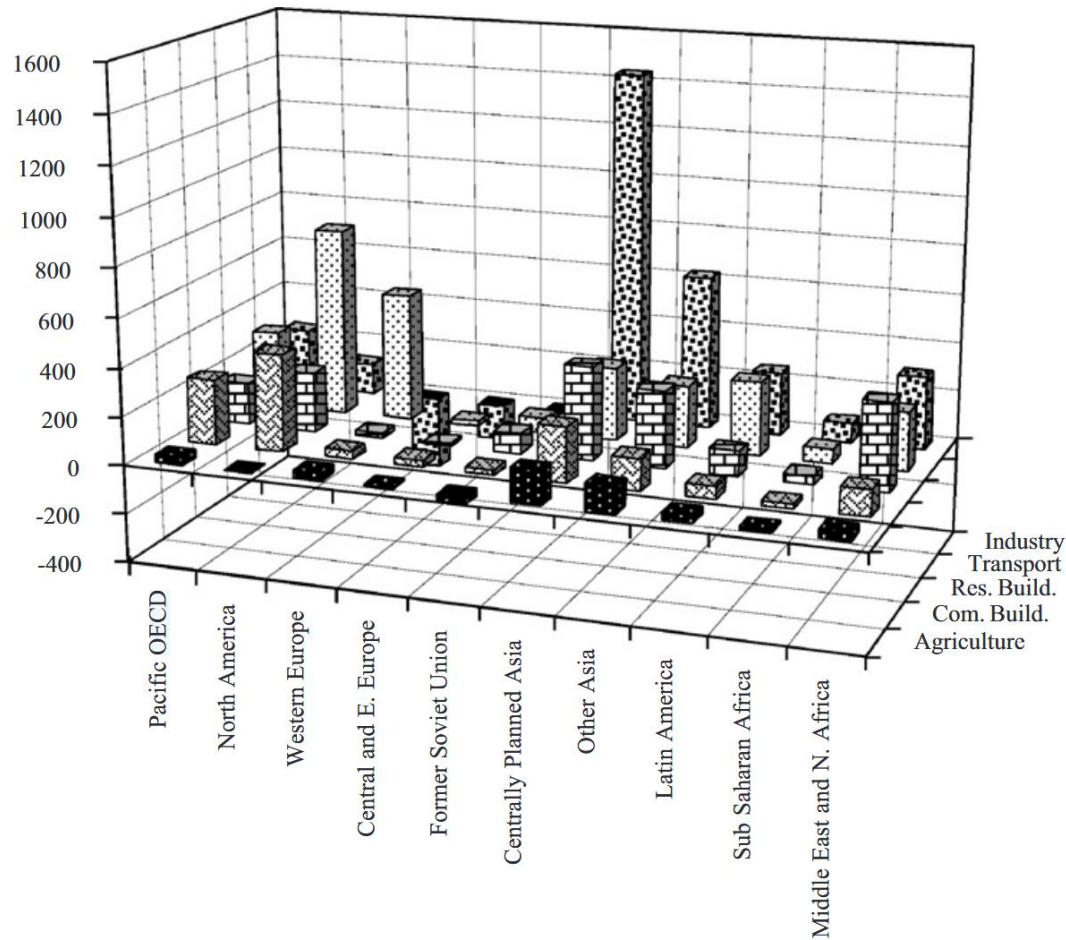


Fig. 1. Geographic (North to South) shift of carbon dioxide emissions increases “downtown”. Historical and projected carbon dioxide increases by sector and by region (MtCO₂, built on data borrowed from Price et al., 2005)

能源转型——背景



● 碳锁定（carbon lock-in）

- 自20世纪中期以来，对能源未来的预测已成为全球经济可持续发展的关键。在克服“增长限制”的同时，人们也面临着“变化的限制”：决策和行为模式演变中的社会和经济惯性，以及技术和物质基础设施的替换。

● 识别能源转换规律

- 识别能量转换的规律或规律使它能够平衡保守性(同时将一些过去转移到未来)和无限的想象力，这可能会通过回溯方法初步塑造未来。

能源转型的三大定律



- 第一定律：长期能源成本与收入比稳定律 (The law of stable long-term energy costs to income ratio)
- 第二定律：能源质量提高律 (The law of improving energy quality)
- 第三定律：能源生产率增长律 (The law of growing energy productivity)



能源转型——第一定律



第一定律：长期能源成本与收入比稳定律（The law of long-term **energy costs to income stability**）

其核心表述如下：

- 长期稳定性：在长期来看，能源成本占收入的比率相对稳定，仅在非常有限的可持续波动范围内浮动。
- 普适性：这种比率在几十年来（如果不是几百年来）都相对稳定，并且在不同地区和大型国家之间也非常相似。
- 具体衡量比例：这些比例包括最终能源成本占 **GDP**（或总产出）的比率；住宅能源成本占个人收入的比率；以及个人交通能源成本占个人收入的比率。

能源转型——第一定律

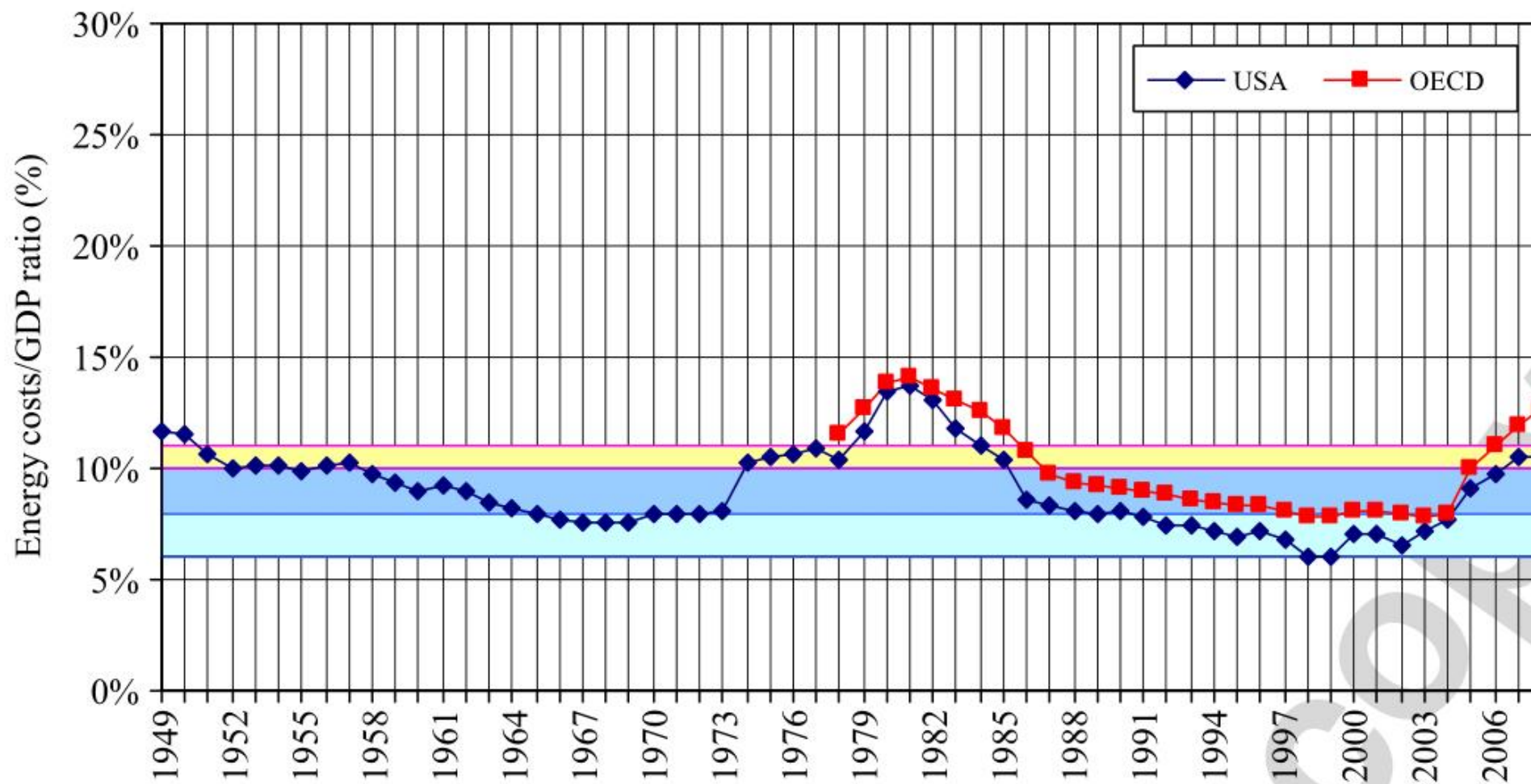


Fig. 2. Energy costs to GDP ratio evolution in OECD and the USA.

能源转型——第一定律



2. 微观层面的经验证据（家庭和交通成本）

- **住宅能源成本占比：** 住宅能源成本占个人收入（税前）的比率在几十年内非常稳定，并且在各国（尽管发展模式和阶段截然不同）之间也非常相似。例如：日本在 56 年中约为 3.2%；美国在 45 年中约为 2.6%；印度在 43 年中约为 3.5%；欧盟-15 在 1999 年为 3.2%；中国在 2000 年为 2.3%；俄罗斯在 2006 年上升到 3.4%。这一比率在半个多世纪以来的可持续波动范围非常有限（ $\pm 0.5\%$ ）。
- **交通能源成本占比：** 个人交通服务成本占美国个人收入的比率在半个世纪以来也相对稳定。在日本，该比例在 1980 年代中期达到美国水平后，已经稳定了 20 年。燃料成本占个人机动车燃料费用的比率在美国半个世纪的平均值约为 2.5%。

能源转型——第一定律

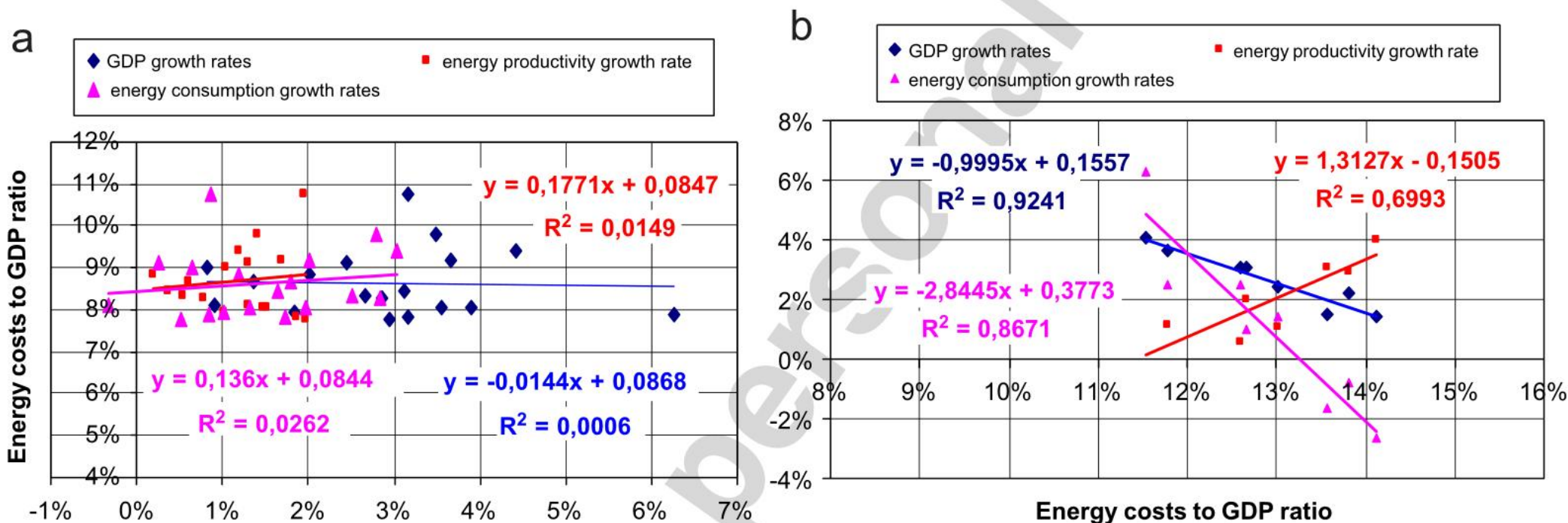


Fig. 3. Relationships between energy costs to GDP ratio and GDP growth rates (blue), energy productivity (red), and energy demand (lilac) for OECD, (a) energy costs to GDP ratio stays below 11%, (b) energy costs to GDP ratio exceeds 11%.



能源转型——第一定律



• 能

源

-

-

-

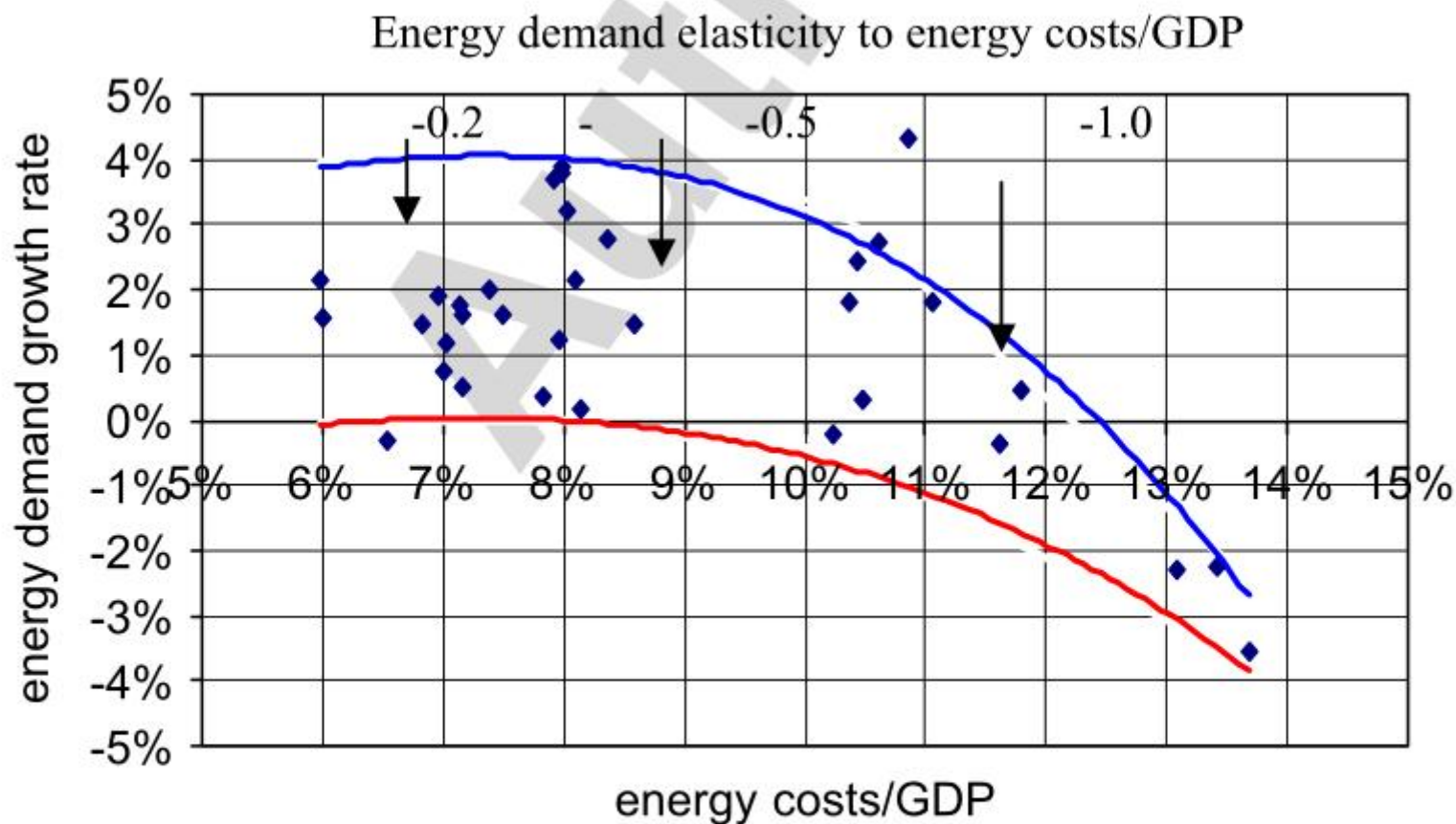


Fig. 4. Energy costs to GDP “wing” function (based on three years’ moving averages for the USA for 1970–2004).

1磅”

增长

齐增

需求

能源转型——第一定律



“翅膀”函数的核心机制在于，能源购买力的有限性设定了阈值（？），导致能源需求对价格的弹性具有非对称性（asymmetric）。

- 价格反应显著增强：当相对能源成本保持在较高水平（超过阈值）时，能源需求对价格的反应会显著增强。
- 动态弹性：能源需求和石油需求函数不再具有固定的弹性系数，而是具有动态弹性因子。当能源成本占 **GDP** 比率达到并超过上限时，能源价格的增长伴随着价格弹性（**ep**）的增长。
- 最终结果：一旦达到购买力极限，价格每增长 1%，就会导致能源需求减少超过 1%，这是通过降低经济活动、竞争性供应和提高能效来实现的。任何进一步的能源价格上涨都会导致能源供应商的收入减少，从而阻止价格进一步上涨。

能源转型——第一定律



导致能源购买力极限能够限制能源需求和经济增长的三个原因：

1. 能源消耗的下限定理（购买力上限的推论）

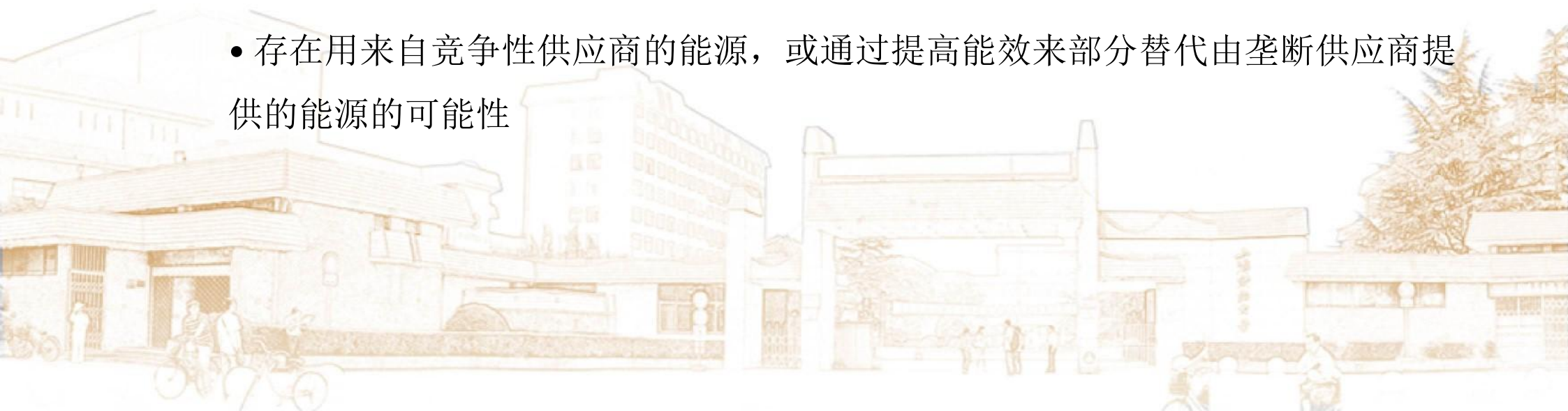
- 任何时期都存在能源消耗的下限，这阻碍了潜在经济增长的实现

2. 能源购买力的有限性

- 能源购买力，尽管规模庞大且相对具有弹性，但是有限的

3. 替代能源和能效提高的可能性

- 存在用来自竞争性供应商的能源，或通过提高能效来部分替代由垄断供应商提供的能源的可能性



能源转型——第一定律



第一定律的微观层面的经验证据之一：

- 在:
- 能:

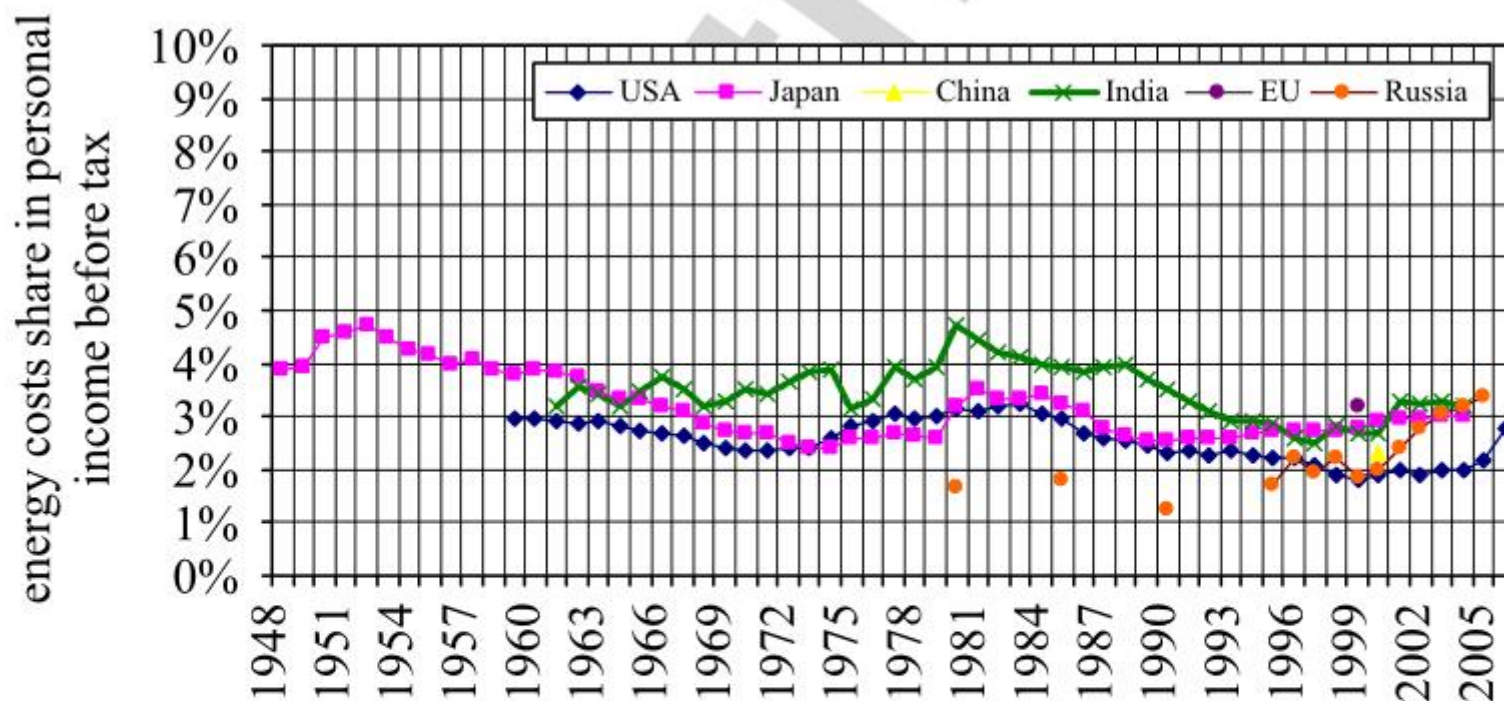


Fig. 5. The share of housing energy costs in personal income before tax for several countries and EU. (Calculated based on China Statistical Yearbook, 2004; Council of Economic Advisers, 2006; Eurostat, 2001; Government of India, 2001, 2006; Japan, 2006; Russian Statistical

0%。

至几十

非常相
度在

能源转型——第一定律



第一定

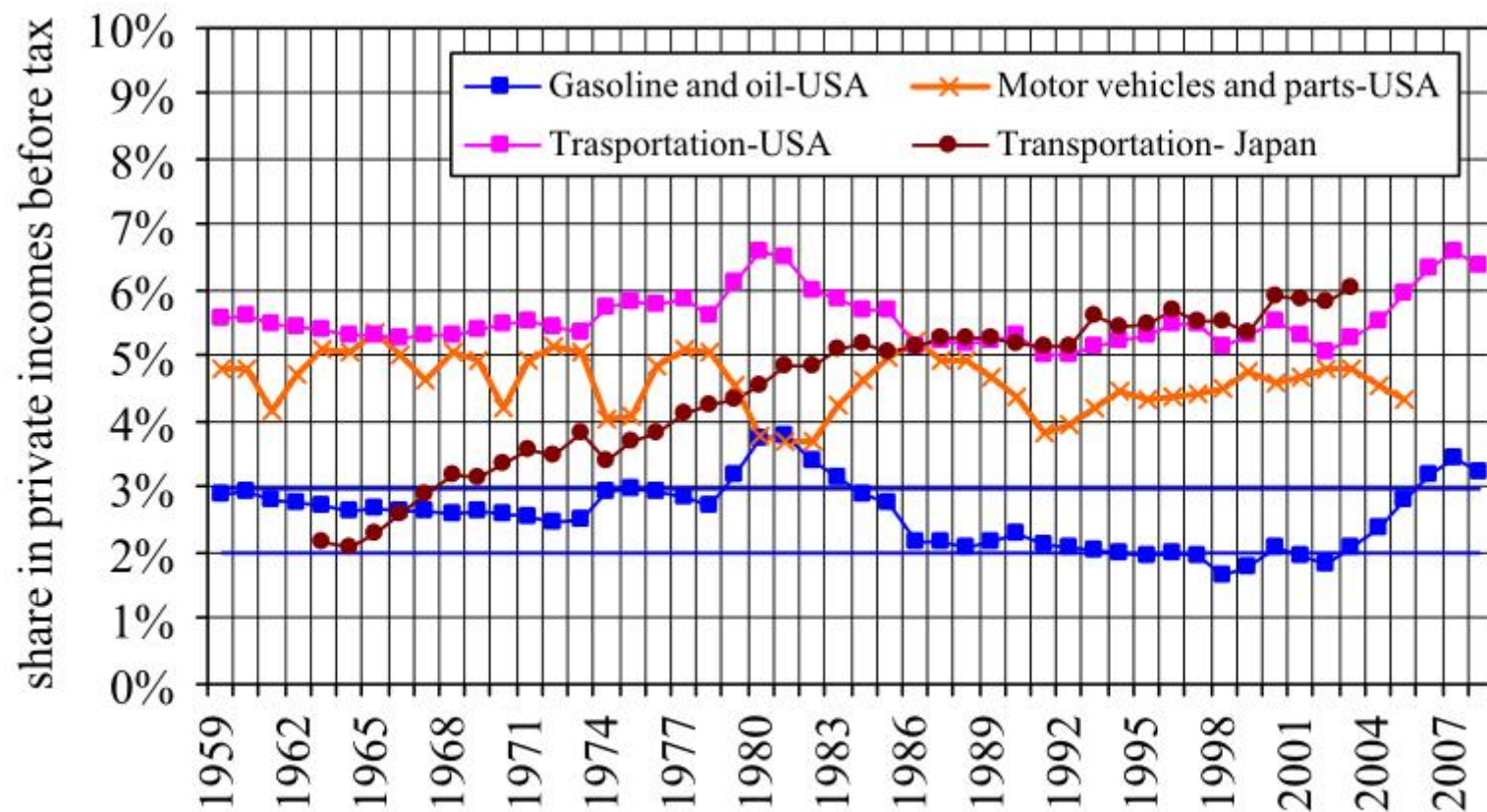


Fig. 6. The share of H&U costs in personal income before tax for several countries and EU.

急定。

通（商

将收入分
改善

能源转型——第一定律



第一定律的工业部门层面的证据：

观点：工业部门的能源成本占总成本的份额在长期也是稳定的。

稳定范围：根据工业部门的结构，能源成本占工业部门总成本的比例稳定在 10-13% 的范围内。

- 德国的统计发现（Welsch 和 Ochsen）：Welsch 和 Ochsen（2005）基于德国所谓的“生产部门”的统计数据得出结论，从长期来看，能源成本在总成本中的份额是稳定的。
- 要素替代的净抵消：所有由生产要素替代引起的变化，最终都会相互抵消。这支持了能源成本占比作为一个稳定的宏观经济常数存在的假设。

能源转型——第一定律



- 能源可购买力方法允许一些更多的发现：
 - 所有最终能源消费者群体的能源负担能力的限制使得能源成本与收入波动的可持续通道非常有限；
 - 碳和能源税收政策的缓解措施带来了不同的结果，这取决于能源成本与GDP的关系或收入比与阈值的关系。如果税率灵活，碳和能源税政策可能会更有效：
 - 当能源成本占GDP的比例较高时，税率需要降低，以避免经济增长放缓；
 - 当价格较低时，税率可以提高，以保持更有效和更低碳强度的能源使用的动力。

能源转型——第二定律



一、第二定律的表述

定律名称： 能源质量提高律 (The law of improving energy quality)。

核心表述：

- 不断增长的整体经济生产率要求更高质量的能源服务。
- 从经济角度来看，为了提高整体经济的全要素生产率（TFP）人均 GDP，“能源质量”必须得到提高，而这反过来又反映在能源平均价格的稳步增长上（以热值聚合的总能源成本除以总能源）。



能源转型——第二定律



二、第二定律的理论基础和机制

第二定律并非独立存在，而是与第一定律（长期能源成本与收入比稳定律）和第三定律（能源生产率增长律）紧密相连，共同构成了能源经济系统相互作用的“刚性三角形”。

1. 对传统生产函数理论的修正

- 作者认为，传统生产函数理论中关于生产要素之间可以进行大量替代的理论假设可能是不正确的。
- 创新驱动的替代：实际上，创新主要导致低质量的生产要素被相同但质量更好的要素所替代。
- 资本回报率与要素替代：在资本回报率下降的情况下，技术改进的动机不是用资本替代劳动力，而是用质量更好的生产要素替代低质量的生产要素。

2. 能源质量的经济学体现

- 价格反映经济效用：能源质量在经济学上通过其对整体经济增长和全要素生产率（TFP）的贡献来体现。
- 消费者意愿：消费者愿意支付的价格反映了能源载体的“相对经济效用”，即单位热值当量带来的更高的生产率或更高的消费者效用。
- 服务成本稳定：最终用户从低质量能源（如煤炭）转向更高质量能源（如石油产品、天然气、电力）时，他们为单位消耗的能源支付了更高的价格，但单位能源服务成本并未提高。
- 生命周期成本：从集成能源服务系统的生命周期成本来看，更高质量的能源载体显得更便宜。这是因为高质量能源更清洁、更易于处理，并且总体上占用的生产要素更少。



三、支撑第二能源质量的提高

1. 宏观经济指标

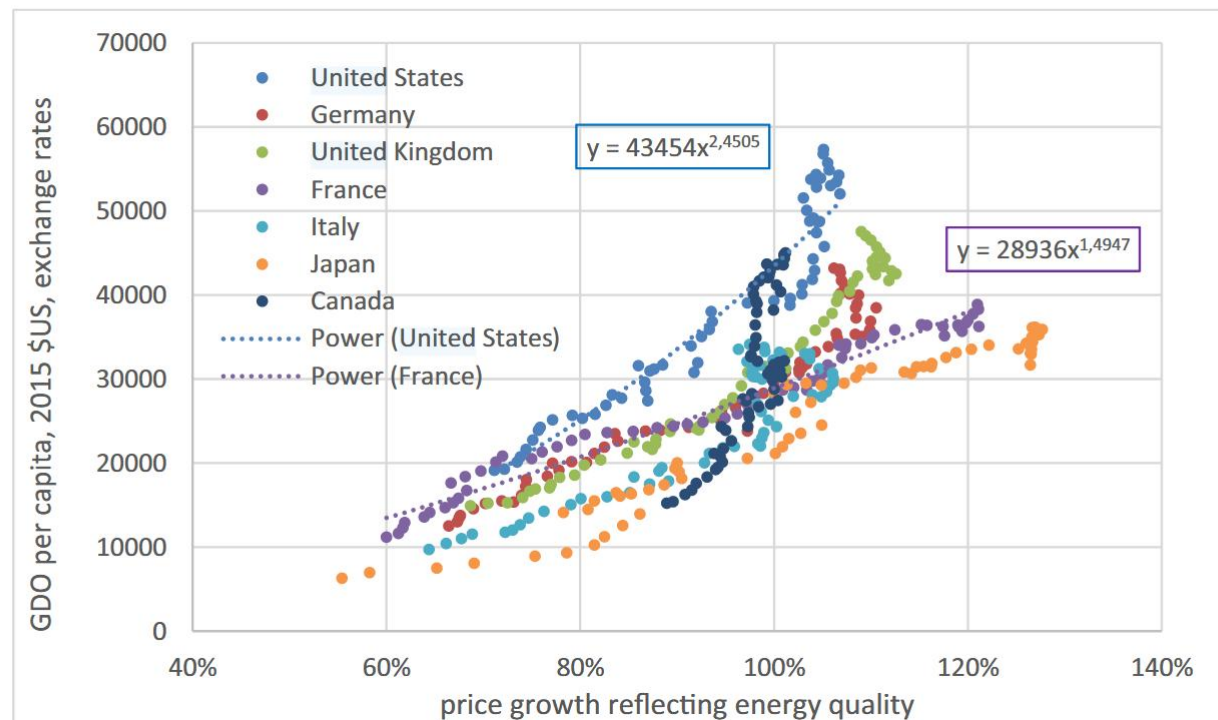
- 人均 GDP
- TFP 与能源
- 增长速度
- “搭便车”
- GDP 需要进

2. 能源质量提高

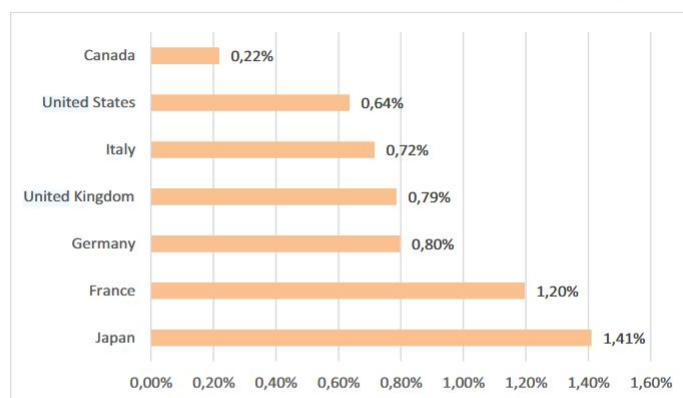
- 长期平均
- 具体时间

3. 能源质量的物

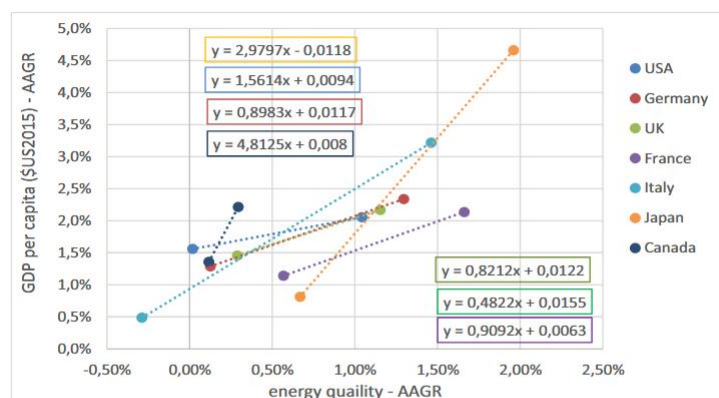
- 能源质量的
- 电力在最
- 一次能源
- 能源载体



a. GDP per capita as a function of “energy quality”



b. AAGR for “energy quality” in 1960-2019



c. relationship between GDP per capita AAGRs and “energy quality” AAGRs for 1960-1994 (higher values) and for 1994-2019 (lower values)

..2%以内。如果

格上涨约 1%。

到或超过 50%。

Fig. 5 GDP per capita as a function of “energy quality”. Source: Calculated by the author based on data from (IEA, 2022; WDI, 2023). 1990 was selected as the base year for energy prices. Energy taxes are excluded

能源转型——第二定律



四、第二定律与价格的关系

- 刺激增长，而非阻碍：仅由更高质量能源资源份额增加所驱动的能源价格上涨，不会阻碍，反而会刺激经济增长。这是对传统观点的挑战，传统观点通常将能源价格上涨视为经济增长的障碍。
- 解释非对称弹性：能源质量的提高为能源需求对价格弹性较低且不对称提供了额外的解释。只有超过“能源质量”改进贡献的过度价格上涨（对于 G7 国家，平均每年约 0.9% 至 1.1%）才会带来额外的成本压力，并将能源成本/GDP 比率推向或超过阈值，从而阻碍经济增长并激发结构性转变。



能源转型——第三定律



一、第三定律的表述

定律名称： 能源生产率增长律 (The law of growing energy productivity)。

核心表述：

- 随着能源质量的提高，同时保持能源成本占收入的比率相对稳定，能源生产率就会增长，或者说能源强度会下降。
- 渗透更高价格、更高质量的能源载体，必须伴随着能源生产率的提高——即每单位最终使用能源所产生的 **GDP** 不断增长。

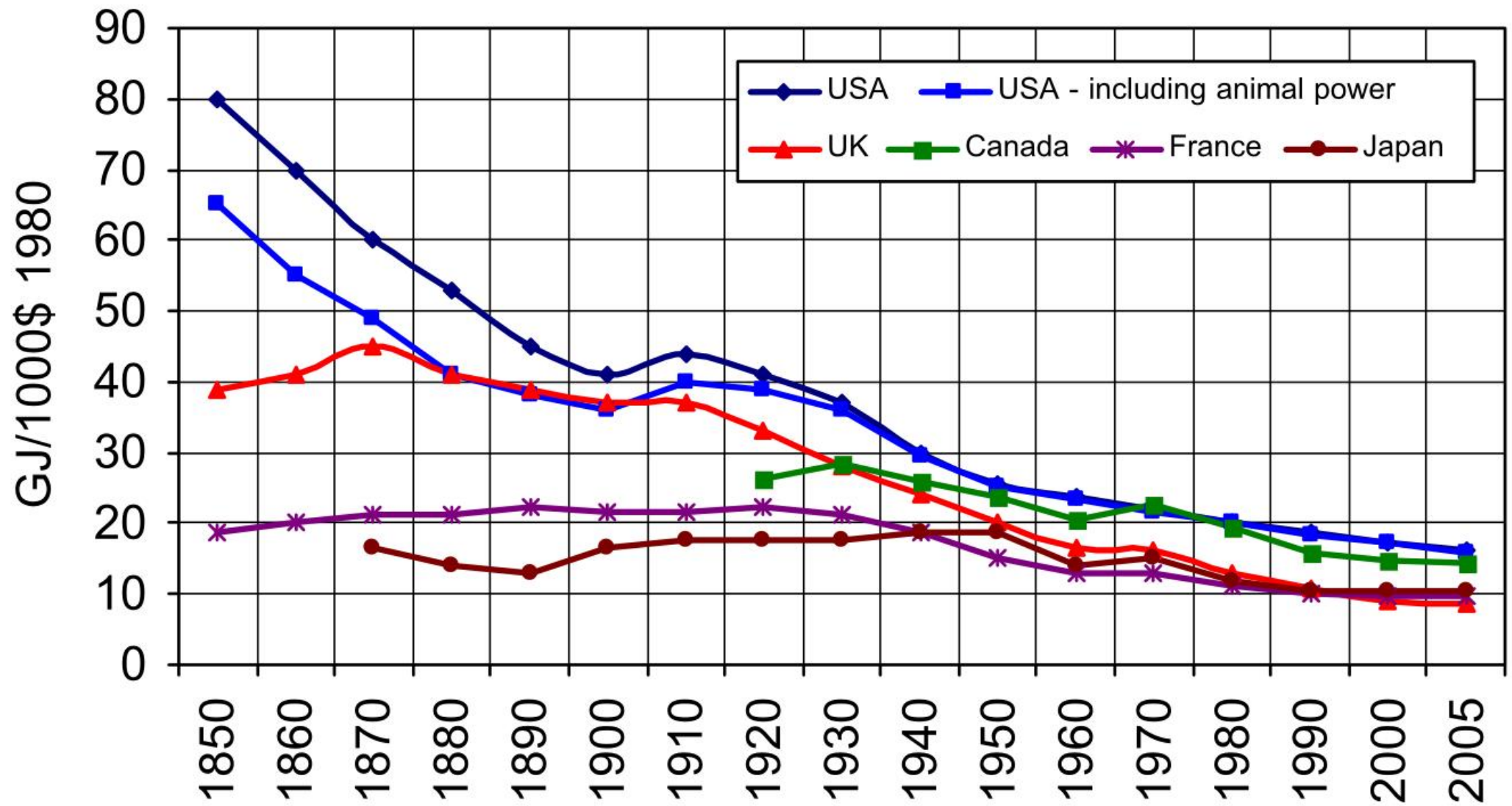


Fig. 7. Energy intensity of GDP: 1850–2005.

能源转型——第三定律



三、经验证据和历史速率

1. 能源生产率的历史增长速率

- 长期趋势：全球范围内，1800年至2021年间，一次能源强度下降了四倍，平均每年下降约0.6%。这与“能源质量”的平均改善速率非常接近。
- 近几十年G20国家的数据：1970年后，G20国家的最终能源强度年均下降率大多保持在-0.5%至-2.5%的范围内。
 - G7国家在1960年至2019年间的最终能源强度年均下降率为-1.16%。
- 例外情况：只有中国（-4%至-5%）和印度尼西亚（-3.8%）在特定时期内实现了更高的下降率。这些高增长率主要是由结构性变化驱动的（例如，住宅建筑面积增长滞后于GDP增长）。

2. 能源生产率与经济增长

- 克服增长限制：能源效率的提高在历史上已经移除了“增长的极限”——包括可负担性、资源和环境限制，从而实现了经济的反弹（继续增长）。
 - 例如，如果没有能源强度的提高，当前的全球一次能源消费将是实际值的4倍，全球GDP将停留在1971年的水平，而且能源成本将远远超过可负担性限制。
- 与有用功的关系：有用功强度（useful energy/exergy intensity）没有与GDP脱钩。只有当有用功强度上升时（例如1947年至1973年间），经济增长才会加速，因为这促进了TFP的提高。
- 转换效率：在二战结束到1973年能源危机期间，一次能源到有用功的转换效率通过电气化、机动化和末端技术进步而显著提高。但1973年后，有用功强度的下降速度与一次能源和最终能源的下降速度相匹配，导致TFP和人均GDP增长放缓。

能源转型——第三定律



三、经验证据和历史速率

1. 能源生产率的历史增长速率

- 长期趋势：全球范围内，1800年至2021年间，一次能源强度下降了四倍，平均每年下降约0.6%。这与“能源质量”的平均改善速率非常接近。
- 近几十年G20国家的数据：1970年后，G20国家的最终能源强度年均下降率大多保持在-0.5%至-2.5%的范围内。
 - G7国家在1960年至2019年间的最终能源强度年均下降率为-1.16%。
- 例外情况：只有中国（-4%至-5%）和印度尼西亚（-3.8%）在特定时期内实现了更高的下降率。这些高增长率主要是由结构性变化驱动的（例如，住宅建筑面积增长滞后于GDP增长）。

2. 能源生产率与经济增长

- 克服增长限制：能源效率的提高在历史上已经移除了“增长的极限”——包括可负担性、资源和环境限制，从而实现了经济的反弹（继续增长）。
 - 例如，如果没有能源强度的提高，当前的全球一次能源消费将是实际值的4倍，全球GDP将停留在1971年的水平，而且能源成本将远远超过可负担性限制。
- 与有用功的关系：有用功强度（useful energy/exergy intensity）没有与GDP脱钩。只有当有用功强度上升时（例如1947年至1973年间），经济增长才会加速，因为这促进了TFP的提高。
- 转换效率：在二战结束到1973年能源危机期间，一次能源到有用功的转换效率通过电气化、机动化和末端技术进步而显著提高。但1973年后，有用功强度的下降速度与一次能源和最终能源的下降速度相匹配，导致TFP和人均GDP增长放缓。

能源转型——第三定律



四、对未来和气候政策的启示

- 限制加速： 能源生产率增长律设定了“变革的极限”。历史表明，即使引入能源税和碳税，全球 GDP 能源强度的下降速度也难以超过每年额外的 0.5%。
- 气候目标挑战： 气候缓解研究通常假设或模型化未来 30 年 GWP 能源强度年均下降 3% 至 4%。历史上，G20 国家并未达到如此高的速度。达到 4% 的年下降率需要将旧资产的退役、升级和新资产的投产比例翻倍，这在实践中具有挑战性，特别是考虑到许多工业技术已接近热力学最小值。
- 政策平衡： 为了保持激励能效的动力，能源和碳税政策必须努力将能源成本与收入比率保持在接近阈值的水平。如果能源生产率增长率（如 2% 至 4%）与 ECS 约束相结合，则意味着未来几十年内实际能源价格每年可以增长 3% 至 4%，这远高于历史平均水平（1.0% 至 1.8%）。

能源转型的三大定律总结



第一定律：长期能源成本与收入比稳定律 (The law of stable long-term energy costs to income ratio)

- 表述：在长期来看，能源成本占收入的比率相对稳定，仅在非常有限的可持续波动范围内浮动。
- 核心机制：这种稳定性的根源在于有限的能源购买力。能源购买力设定了阈值，一旦超过这个阈值，就会导致能源需求对价格的弹性变得不对称，并阻碍经济增长。
- 替代表述（数学恒等式）：在长期来看，实际能源价格的增长幅度只能与能源强度的下降幅度相当（即“负一现象”）。

第二定律：能源质量提高律 (The law of improving energy quality)

- 表述：不断增长的整体经济生产率要求更高质量的能源服务。
- 核心机制：提高能源质量是通过用质量更好的生产要素替代低质量的生产要素来实现创新的主要途径。能源质量的提高（例如，电力在最终能源消费中的份额增加）体现在消费者愿意支付更高的平均能源价格，因为更高质量的能源能带来更高的生产率（TFP）更高的消费者效用。
- 支撑：经验证据显示，“能源质量”的年度平均增长率越高，人均 GDP 的年均增长率也越高。仅由高质量能源驱动的价格上涨不会阻碍，反而会刺激经济增长。

第三定律：能源生产率增长律 (The law of growing energy productivity)

- 表述：随着能源质量的提高，同时保持能源成本占收入的比率相对稳定，能源生产率就会增长，或者说能源强度会下降。
- 核心机制：提高能源生产率（即降低能源强度）的主要作用是抵消由于能源质量改进和其他因素驱动的平均能源价格的上涨。只有当新的价格增长被更有效的能源使用完全抵消时，更高价格的能源载体才能保持在可持续的能源成本占比范围内。
- 重要性：能源效率的改进在过去已经移除了“增长的极限”（包括可负担性、资源和环境限制），并允许经济继续增长。

阅读文献



- Bashmakov, I. (2007). Three laws of energy transitions. *Energy Policy*, 35(7), 3583–3594. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.023>
- Bashmakov, I. (2025). Three laws of energy transitions and economic growth. *Energy Efficiency*, 18(2), 215–234. <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10001-y>





谢谢!
Thank You

