

电气化和电力行业改革： 协调双重挑战

作者：Max Dupuy, Fredrich Kahrl¹

睿博能源智库（RAP）

概述

电气化和电力行业改革两者密切相关，是全球各国和各地区面临的双重挑战。尽管细节有所差异，这份政策简报强调了欧洲、北美、中国及其他国家存在的两点事实。首先，电力体制改革使得发电结构发生演变，决定了电气化对改善空气质量和减少温室气体排放产生的贡献。需要合理设计和实施电力市场、改进电力行业规划、良好执行环境法规来激励电力行业远离化石燃料发电同时最小化成本。其次，控制电气化成本并支持可再生能源并网将取决于电力行业改革如何释放电气化终端用途的灵活性。中国在电气化的某些方面已经引领世界——特别是交通电气化，中国还有引领世界电力行业改革以改进终端用户与电网互动方式的潜力。

电气化和脱碳的长期情景分析

在对于本世纪中叶中国实现空气质量目标、大幅减少温室气体排放潜在途径的研究中，除了涵盖建筑、工业和交通电气化起到的主要作用外，还包括了电力行业的转型扮演的关键角色。表1显示了几种脱碳情景分析的结果，以及2014年的数据以供比较。表中所列百分比表示的是电力在最终能源消耗中所占的比例²。虽然各个情景分析不尽相同，但他们都设想了一个类似的转型，即：1) 电力部门脱碳，远离燃煤发电，2) 终端电气化。

¹ 本文的审阅成员包括Ruth Hare以及Frederick Weston。本文中文版由何焱和王轩负责翻译和校正。

² 由于定义和假设不同，这些研究并不具有严格的可比性。例如，IEA对最终能源消耗的定义包括初级生物质消耗，而Teng等人(2015)和Khanna等人(2017)的研究是否包括初级生物质消耗尚不清楚。

表1. 研究报告中电力在能源消费中的份额和电力排放的影响因素

研究报告	年度	全社会	建筑	工业	交通	电力排放因素 (每MWh的CO ₂ 吨数)
国际能源署 (2016)	2014	20%	22%	27%	2%	0.77
国际能源署(2016) 450 情景分析	2040	31%	40%	39%	17%	0.08
Khanna et al. (2017) 最大 电气化情景分析	2050	45%	商业: 83% 居民: 68%	40%	25%	N/A
Teng et al. (2015) 深化低碳 情景分析	2050	34%	47%	39%	7%-10%	0.07
中国可再生能源中心 (2018) 已表述的政策情景分析	2050	48%	~53%	~53%	30%	N/A
中国可再生能源中心 (2018) 2摄氏度下情景分析	2050	53%	N/A	N/A	N/A	N/A

Sources: International Energy Agency. (2016). *World Energy Outlook 2016*; Khanna, N., Fridley, D., Zhou, N., Karali, N., Zhang, J., and Feng, W. (2017). *China's Trajectories Beyond Efficiency: CO₂ Implications of Maximizing Electrification and Renewable Resources Through 2050*; Teng, F., Liu, Q., Chen, Y., Tian, C., Zheng, X., Gu, A., Yang, X., and Wang, X. (2015). *Pathways to Deep Decarbonization in China*; and China National Renewable Energy Centre. (2018). *China Renewable Energy Outlook 2018*

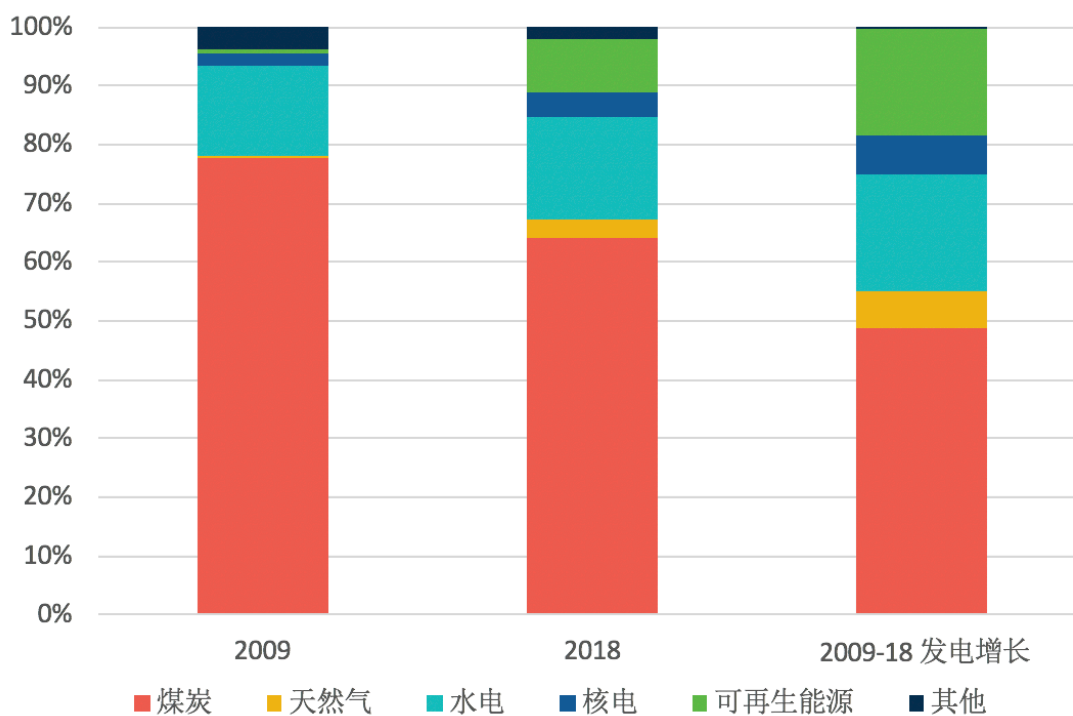
要“正确”实现这一雄心勃勃的双重转型，需要在一系列广泛的政策之间进行协调，包括监管标准和指令(如设备排放标准)、税收激励、研发项目、排放定价(例如，新的全国范围内的碳排放交易机制)和电力行业改革。如果电气化要在表1中的情景中发挥作用，并要实现空气质量目标和脱碳目标，电改就尤为重要。电力行业改革有一个关键方面需要支持表1中的设想：政策、法规和市场改革以实现1) 成本有效地降低煤炭在资源组合中的比例;2) 释放电力终端用途的灵活性³。

电力行业资源结构合理化政策

电气化作为工具，支持空气质量管理 and 实现温室气体减排情景的情况取决于发电组合中煤炭的进一步减少。煤炭在中国发电结构中的占比已经大幅下降，从2009年的78%降至2018年的64%，如图1所示（中国电力企业联合会，2013-2019）。2009年至2018年期间，非煤炭发电占发电增长的一半以上。然而，据报道，大量新的燃煤电厂正在建设中，下一个五年计划的煤电装机目标仍在讨论中(Shearer et al., 2020)。

³ 在睿博能源智库美国和欧洲的项目中，我们描述了电气化如果被认为是有益的需要满足的条件——也就是说，为实现公众利益，才可以算是有益电气化 (Farnsworth et al., 2018)。这项工作与我们在这里讨论的电改密切相关。参见Farnsworth等人(2018)。

图1. 中国发电结构组成



资料来源：中国电力企业联合会（2013-2019），“电力统计基本数据一览表”

中国的政策制定者如何确保发电组合的演变具有成本效益、可靠性，并和空气质量目标和表1中的情景相一致？答案就是，在电力行业改革的几个领域，“正确地”把握政策设计和实施的细节⁴：

电力行业规划

现有的投资规划和决策流程仍围绕煤炭发电，而不是为了促进最低成本面向所有资源的投资选择。中国专家拥有规划工具及其专业技能，为越来越不依赖煤炭发电的电力系统进行规划，但这些工具似乎并没有以综合的方式利用在投资规划和决策中⁵。此外，中国的规划过程尚未与新兴的批发现货市场相适应。这有别于美国电力市场发展较成熟的地区。在这些地区中，电力行业的规划流程对于评估市场结果，确定所需的市场规则变更，将市场驱动的决策与电力行业“市场化”程度较低（或不完全市场化）的方面（例如输电投资和能效投资）整合在一起至关重要。在探索如何更好地结合投资规划和批发市场的过程中，美国的资源规划过程，例如，加州的综合资源规划过程可能对中国是一个有用的参考。加州综合资源规划与加州电力批发市场之间存在合理的双向协调的关系。加州电力市场与目前中国一些省正在实施的现货市场大致相似。

⁴ 详情请参见Yue等人(2019年)和Dupuy等人(2018年)。

⁵ 对2016年国家能源局发布的指导意见进行解读和实施，将会建立一个更加平等的投资环境，并显著降低对新燃煤电厂投资的风险。参见NEA(2016)、Dupuy和Wang(2016)。

电力市场

电力市场对合理化运营、投资和机组淘汰决策非常有帮助。中国各省新生的现货市场和其他市场机制已经开始改变驱动这些决策的激励因素，煤炭发电企业的运营小时数面临下行压力，而风能和太阳能的弃电率有所下降。挑战将集中于确保这些市场充分支持省级市场政策中所规定的经济调度原则，并确保市场为发电机投资和淘汰决策传递合理的价格信号。现有的现货市场“试点”前景光明，但似乎存在一些设计上的问题，可能会影响运营和投资的有效性。这些因素包括最低和最高市场限价、市场监管不足，以及可能效率较低的“中长期”合同机制，通常是发电侧与终端用户或零售商之间签订的合同，期限为一个月或一年（Dupuy, 2019年）。

确保和完善具备可行性的市场规则是一项复杂的工作，美国和欧洲类似市场已经运转了几十年，对市场规则的讨论仍在进行中。如果现货市场的实施工作在中国陷入僵局 - 或仅在当前的现货市场试点省份实施 - 值得准备一个实际有效的替代方法，支持实现更好的调度和更好地释放投资和退役信号这些关键目标。这可能涉及有针对性的行政工作，在发电机组补偿改革的帮助下继续改善调度(Dupuy, 2019)。国际经验可以继续为中国电力市场发展提供重要参考。中国不仅可以从美国和欧洲也可以从韩国、印度和巴西等国家借鉴一些实践经验。这些国家已经实施了市场模式，以适应其自身的制度条件。

环境法规和排放定价

中国拥有世界上最严格的燃煤电厂排放标准。更好地监测和执行这些标准将减少燃煤发电企业的不准确报告，并有助于达到空气质量标准，这些标准是基于测量的污染物浓度水平，而不是报告的排放量（Karplus et al., 2018）。与此同时，推进电力行业的全国碳排放交易计划，为二氧化碳排放设定一个有意义的价格，将进一步帮助发电投资和退役激励措施合理化。

这些挑战密切相关，最好作为电力行业综合改革工作的一部分来应对。

实施政策、定价和市场机制来释放灵活性

许多类型的电气化终端用途——包括电动汽车充电、水加热、甚至建筑制冷——它们的需求具有内在的灵活性——也就是说，能够在使用时间上进行调整，以利用较低的非峰时电价或缓解系统的高需求压力。例如，水加热和电动车充电，都可以在一天中电网压力较小的时候进行。这种灵活性对电气化成本和电力部门的总成本有重大影响。如果新的电动汽车、锅炉、热泵和电炉在电力系统已经不堪重负的时候耗电，那么电气化将引发在配电、发电和输电基础设施方面昂贵的新的投资需要。但是，如果电力消耗发生在有剩余容量的时候，电气化可以提高电力系统的利用率，有助于降低成本。为了鼓励低成本的电气化，美国和欧洲的监管机构最近开始努力制定和改善激励措施，以激发电气化在交通和建筑行业终端用途的灵活性(Farnsworth et al., 2018, and Hildermeier et al., 2019)。

在中国，释放电气化的灵活性——以及实现节约成本——将取决于电价设计、新的市场机制和其他政策，这些政策允许用电根据电网情况做出反应，并决定用电时间。在这方面，各省正在开发的批发电力现货市场可以发挥重要作用，如果设计得当，它可以确定电网中成本高和成本低的时间和位置并发出信号。此外，如果现货市场的实施陷入停滞，那么设计“足够好”（至少在短期内）的基于成本的行政机制

来发出这些信号和相应的激励措施应该是可行的。

对用电灵活性的需求也突出了设计零售电价的重要性。鼓励电气化的政策应与鼓励有效使用电力系统的新价格设计同时进行。这些措施包括分时电价(TOU)（已长时间在中国的工业和商业部门实施，但可以扩大到包括居民在内的用户）和需求响应项目，为终端用户灵活用电提供经济激励⁶。以能源为基础，电力成本平均要比石油产品、天然气或煤炭的成本要高得多。然而，发电的成本在一天之内变化很大。对于在用电时具有灵活性的新电力负载（电动汽车，一些工业负载，一些建筑物供暖设备），将电力消耗与供电成本相匹配的分时电价可以降低消费者的电力成本，并鼓励电气化。零售电价设计的变化与当前电改进程交织在一起。

结论

在中国和世界各地，电气化和电改是相互依存的挑战。两者都将是实现长期（到本世纪中叶）大幅度减少温室气体排放战略的核心组成部分(Williams et al., 2014, Williams et al., 2015, Eurelectric, 2018)。在中国，解决空气质量挑战的紧迫性、有限的天然气供应以及电力技术对国家产业政策的战略重要性表明，中国也许会比美国和欧洲更快地实现电气化具备优势。实现电气化在改善空气质量、减少碳排放和节约成本方面的益处将取决于正在进行的电改工作，重点是使电力行业的资源和运营决策合理化，并释放电力终端用途的灵活性。中国、美国和欧洲之间的政策协调和交流学习可以帮助推动这些技术的大规模商业化应用。

引用的参考文献和资料

California Public Utilities Commission. (n.d.) *Integrated resource plan and long term procurement plan (IRP-LTPP)* [Webpage]. Retrieved from <https://www.cpuc.ca.gov/irp/>

China Electricity Council. (2013-2019). *Table of key electricity statistics* (电力统计基本数据一览表). Retrieved from <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/>

China National Renewable Energy Centre. (2018). *China renewable energy outlook 2018*. Retrieved from http://www.ea-energianalyse.dk/reports/1473_REO_2018.pdf

Dupuy, M. (2019). *Comments on National Energy Administration's "Advancing electricity spot market implementation."* Beijing, China: Regulatory Assistance Project. Retrieved from <https://www.raonline.org/knowledge-center/comments-on-national-energy-administrations-advancing-electricity-spot-market-implementation/>; Chinese language version at <https://www.raonline.org/knowledge-center/power-sector-planning-us-experience-and-recommendations-for-china-cn/>

Dupuy, M., Kahrl, F., and Weston, F. (2018). A toolkit of global insights as China builds its power sector of the future [Blog post]. Regulatory Assistance Project. Retrieved from <https://www.raonline.org/blog/toolkit-global-insights-china-builds-power-sector-future/>; Chinese language version at <https://www.raonline.org/blog/toolkit-global-insights-china-builds-power-sector-future-cn/>

Dupuy, M., Kahrl, F., Weston, F., Shen, B., Satchwell, A., Cappers, P., et al. (2017). Power consumption, demand and competition cooperation: Recommendations for the pilots in Guangdong, Jilin, Jiangsu, and Shanghai.

⁶ For example, see Farnsworth et. al (2018) and Hildermeier et. al (2019).

Lawrence Berkeley National Laboratory. Available in Chinese and English at <https://china.lbl.gov/news/article/power-demand-report>

Dupuy, M., and Wang, X. (2016, August 12). Excess coal generation capacity and renewables curtailment in China: Getting with the plan [Blog post]. Regulatory Assistance Project. Retrieved from <https://www.raponline.org/blog/excess-coal-generation-capacity-and-renewables-curtailment-in-china-getting-with-the-plan/>

Eurelectric. (2018). *Decarbonization pathways: European economy*. Retrieved from <https://www.energinorge.no/contentassets/bbdfe49e19f04c5c8b8b1d3cf6377d85/decarbonisation-pathways-electricity-part-study-results-h-ad171ccc.pdf>

Farnsworth, D., Shipley, J., Lazar, J., and Seidman, N. (2018). *Beneficial electrification: Ensuring electrification in the public interest*. Montpelier, VT: Regulatory Assistance Project. Retrieved from <https://www.raponline.org/knowledge-center/beneficial-electrification-ensuring-electrification-public-interest/>

Gopal, A.R., Park, W.Y., Witt, M., and Phadke, A. (2018). Hybrid- and battery-electric vehicles offer low-cost climate benefits in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 362-371

Hofmann, J., Guan, D., Chalvatzis, K., and Huo, H. (2016). Assessment of electrical vehicles as a successful driver for reducing CO₂ emissions in China. *Applied Energy*, 184, 995-1003

Huang, Y., and Qian, L. (2018). Consumer preferences for electric vehicles in lower tier cities of China: Evidences from south Jiangsu region. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 482-497

Huo, H., Cai, H., Zhang, Q., Liu, F., and He, K. (2015). Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and the U.S. *Atmospheric Environment*, 108, 107-116

Huo, H., Zhang, Q., Wang, M., Streets, D.G., and He, K. (2010). Environmental implication of electric vehicles in China. *Environmental Science & Technology*, 44, 4856-4861

International Council on Clean Transportation. (2018). *China's new energy vehicle mandate policy*. Retrieved from https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/China_NEV_mandate_PolicyUpdate%2020180525.pdf

International Energy Agency. (2017). *District energy systems in China: Options for optimisation and diversification*. Retrieved from <https://webstore.iea.org/district-energy-systems-in-china>

International Energy Agency. (2016). *World energy outlook 2016*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>

Ji, S., Cherry, C.R., Bechle, M.J., Wu, Y., and Marshall, J.D. (2012). Electric vehicles in China: Emissions and health impacts. *Environmental Science & Technology*, 46, 2018-2024

Kahrl, F., Su, Y., Tennigkeit, T., Yang, Y., and Xu, J. (2013). Large or small? Rethinking China's forest bioenergy policies. *Biomass and Bioenergy*, 59, 84-91

Karplus, V.J., Zhang, S., and Almond, D. (2018). Quantifying coal power plant responses to tighter SO₂ emissions standards in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 7004-7009

Ke, W., Zhang, S., Wu, Y., Zhao, B., Wang, S., and Hao, J. (2017). Assessing the future vehicle fleet electrification: The impacts on regional and urban air quality. *Environmental Science & Technology*, 51, 1007-1016

Khanna, N., Fridley, D., Zhou, N., Karali, N., Zhang, J., and Feng, W. (2017). *China's trajectories beyond efficiency: CO₂ implications of maximizing electrification and renewable resources through 2050*. Retrieved from http://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/1-142-17_zheng_khanna_final.pdf

- Li, J. (2017). *What caused China's squeeze on natural gas?* Chinadialogue. Retrieved from <https://www.chinadialogue.net/article/show/single/en/10322-What-caused-China-s-squeeze-on-natural-gas->
- Li, Z., and Ouyang, M. (2011). The pricing of charging for electric vehicles in China – Dilemma and solution. *Energy*, 36, 5765-5778
- Liu, J. (2012). Electric vehicle charging infrastructure assignment and power grid impacts assessment in Beijing. *Energy Policy*, 51, 544-557
- Liu, J., Hu, Z., Banister, D., Zhao, Y., and Wang, Z. (2018). The future of energy storage shaped by electric vehicles: A perspective from China. *Energy*, 154, 249-257
- Liu, W., Hu, W., Lund, H., and Chen, Z. (2013). Electric vehicles and large-scale integration of wind power: The case of Inner Mongolia in China. *Applied Energy*, 104, 455-456
- Ministry of Environmental Protection. (2017). 京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案. Retrieved from <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/W020170824378273815892.pdf>
- Myllyvirta, L., and Hove, A. (2017). *Analysis: How to fix China's botched heating policy*. Chinadialogue. Retrieved from <https://www.chinadialogue.net/article/show/single/en/10308-Analysis-How-to-fix-China-s-botched-heating-policy>
- National Development and Reform Commission. (2017). 北方地区冬季清洁取暖规划（2017-2021 年）. Retrieved from <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201712/W020171220351385133215.pdf>
- National Energy Administration. (2016). *Methods for managing electricity planning* 《电力规划管理办法》
- National Energy Administration. (2019). *Coal planning and construction risk warning system for 2022* 《2022 年煤电规划建设风险预警》. Retrieved from http://zfxsgk.nea.gov.cn/auto84/201904/t20190419_3655.htm
- Ou, S., Lin, Z., He, X., and Przesmitzki, S. (2018). Estimation of vehicle home parking availability in China and quantification of its potential impacts on plug-in electric vehicle ownership cost. *Transport Policy*, 68, 107-117
- Shang, X., Zhang, K., Meng, F., Wang, S., Lee, M., Suh, I., Kim, D., Jeon, K., Park, H., Wang, X., and Zhao, Y. (2018). Characteristics and source apportionment of fine haze aerosol in Beijing during the winter of 2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 2573-2584. Retrieved from <https://www.atmos-chem-phys.net/18/2573/2018/acp-18-2573-2018.pdf>
- Shearer, C., Myllyvirta, L., Yu, A., Aitken, G., Mathew-Shah, N., Dallos, G., and Nace, T. (2020). *Boom and bust 2020: Tracking the global coal plant pipeline*. Centre for Research on Energy and Clean Air. Retrieved from <https://energyandcleanair.org/publications/boom-and-bust-2020-tracking-the-global-coal-plant-pipeline/>
- State Council of the People's Republic of China. (2012). 节能与新能源汽车产业发展规划（2012-2020 年）印发. Retrieved from <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1146557/n1146619/c3072778/content.html>
- Teng, F., Liu, Q., Chen, Y., Tian, C., Zheng, X., Gu, A., Yang, X., and Wang, X. (2015). *Pathways to deep decarbonization in China*. Sustainable Development Solutions Network and Institute for Sustainable Development and International Relations. Retrieved from http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf
- Wang, L., Wei, Z., Wei, W., Fu, J. S., Meng, C., and Ma, S. (2015). Source apportionment of PM_{2.5} in top polluted cities in Hebei, China using the CMAQ model. *Atmospheric Environment*, 122, 723-736. Retrieved from http://acs.engr.utk.edu/publications/2015_wang_5_ae.pdf
- Wang, N., Pan, H., and Zheng, W. (2017). Assessment of the incentives on electric vehicle promotion in China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 101, 177-189

Williams, J.H., DeBenedictis, A., Ghanadan, R., Mahone, A., Moore, J., Morrow III, W.R., Price, S., and Torn, M.S. (2015). The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: The pivotal role of electricity. *Science*, 335, 53-59. Retrieved from <http://science.sciencemag.org/content/335/6064/53>

Williams, J.H., Haley, B., Kahrl, F., Moore, J., Jones, A.D., Torn, M.S., and McJeon, H. (2014). *Pathways to deep decarbonization in the United States*. Sustainable Development Solutions Network and Institute for Sustainable Development and International Relations. Retrieved from <http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2014/09/US-Deep-Decarbonization-Report.pdf>

[Yue, L., Kahrl, F., and Dupuy, M. \(2019\). *Strategies for China to reduce the risk of new coal power plant investments*. Beijing, China: Regulatory Assistance Project. Retrieved from https://www.raonline.org/knowledge-center/strategies-china-reduce-risk-new-coal-power-plant-investments/](https://www.raonline.org/knowledge-center/strategies-china-reduce-risk-new-coal-power-plant-investments/)

Zhang, K., Ouyang, M., Lu, L., Li, Z., Xu, L., Wang, H., and Li, J. (2014). Optimal decentralized valley-filling charging strategy for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 78, 537-550



RAP[®]

Energy Solutions for a Changing World

The Regulatory Assistance Project (RAP)[®]
Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504
No.19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

北京市朝阳区建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 100004
raponline.org