
既有高校碳达峰及碳中和路径研究

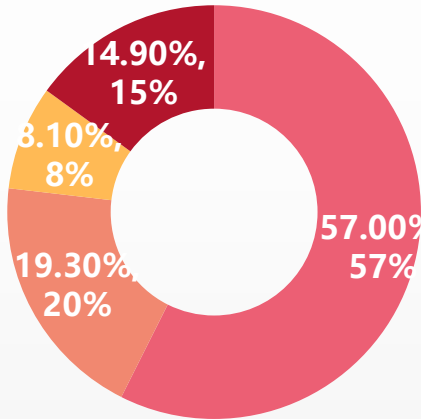
2021年4月



环境与能源危机 —— 3060战略

粗放式、高能耗的发展模式给我国带来了高速发展，但也使得我国**面临严峻的环境与能源危机**。

精细化、高质量、绿色、可持续发展、3060战略，我国迎来发展转型的重要历史机遇期。



■ 煤炭 ■ 石油 ■ 天然气 ■ 一次电力与其他非化石能源

图 2019年全国能源消费结构

资料来源：国家统计局《中国能源发展报告2020》

表 2019年全国各级各类学校规模情况

学校类别	数量（万所）	在校人数（万人）	在校教职工（万人）
学前教育	28.12	4712.88	491.57
小学	16.01	10561.24	585.26
初中	5.24	4827.14	435.04
普通高中	1.40	2414.31	283.37
中等职业教育	1.01	1576.47	107.33
高等教育	0.27	4002	256.67
总和	52.05	28094.04	2159.24

资料来源：2019年全国教育事业发展统计公报



高能耗校园 —— 绿色低碳

我国在**教育事业增加的投入和在校生数量的增长**导致**各类能源、资源消耗量逐年增长**，校园建筑作为能耗大户占到全国建筑总能耗5%左右，**校园运营成本逐渐凸显，系统能效有待提升，建设绿色低碳校园**成为我们面临的重要课题。



现状分析

学校建筑因为有寒暑假，建筑冷热需求低于常规公共建筑；建筑密度相对较低，具有较好的利用可再生能源的条件；同时校园本身自成生活体系，管理机制明确，还承担着育人的角色，具有率先实现碳达峰与碳中和的良好基础。在各行业开展3060战略规划的背景下，针对高校的3060战略，有如下建议：

- 1、开展高校碳排放现状统计，建立碳排放数据库，进行校园体检；
- 2、实施清洁供暖、光伏进校园行动；
- 3、建立高校碳排放计算方法，对高校进行分类分级，给出不同情景的测算及分析；
- 4、基于不同情景的测算及分析，提出高校碳达峰及碳中和路线图，明确时间节点；
- 5、编制高校碳达峰及碳中和技术导则，出台相关奖励及扶持办法，部分高校先行；
- 6、建立高校碳排放交易机制，引入绿色金融、碳交易，开启校园碳市场
- 7、建立高校碳排放数据平台，数据共享，进行监管、交易及技术服务。



碳排放指标

校园碳排放总量 $E=E_1+E_2+E_3$ 式中：E，校园碳排放总量，tCO₂；E₁，校园固定设施化石燃料燃烧导致的CO₂直接排放量，tCO₂；E₂，校园外购电力消耗所隐含的CO₂间接排放量，tCO₂；E₃，校园外购热力消耗所隐含的CO₂间接排放量，tCO₂。

校园单位建筑面积碳排放量 $Q_s=1000\times E/S$ 式中：Q_s，校园单位建筑面积碳排放量，kgCO₂/m²；S，校园总建筑面积，m²。

校园生均碳排放量 $Q_p=1000\times E/p$ 式中：Q_p，校园生均碳排放量，单位为（kgCO₂/p）；p，学校在校生人数。

校园单位建筑面积碳排放基准值

单位为千克二氧化碳每平方米（kgCO ₂ /m ² ）		
二级指标	学校类别	基准值
校园单位建筑面积 碳排放量 (Q _s)	理工及综合类高等学校	47.08
	文史财经师范及政法类高等学校	46.94
	高职及专业类学校	34.07

校园生均碳排放基准值

单位为千克二氧化碳每人（kgCO ₂ /p）		
二级指标	学校类别	基准值
校园生均 碳排放量 (Q _p)	理工及综合类高等学校	1 129
	文史财经师范及政法类高等学校	1 342
	高职及专业类学校	1 119

来源：《高等学校低碳校园评价技术导则》DB11/T 1404-2017

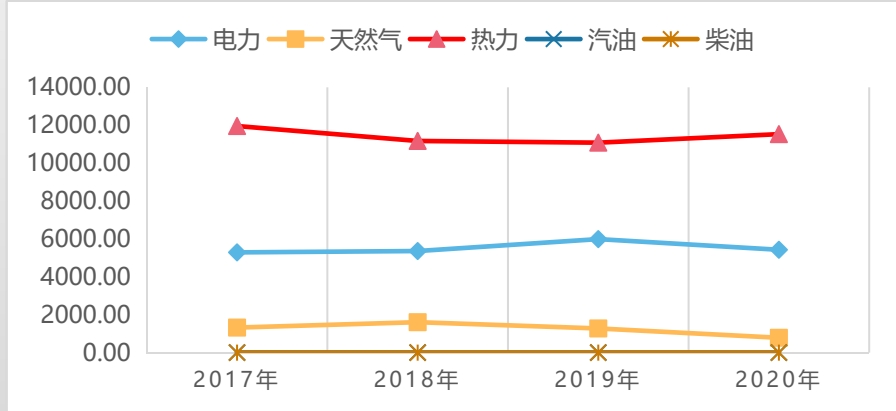
➤ 典型案例分析——南开大学八里台校区

南开大学八里台校区共包括第二主楼、省身楼、海冰楼、范孙楼、综合实验楼、学生活动中心、体育中心等共计130栋单体建筑。该机构用能系统包括供暖系统、空调系统、照明系统、变配电系统、生活用水系统、动力系统、室内用能设备、生活热水体统和特殊用能系统等，使用的能源资源种类主要包括电力、天然气、暖气、生产生活用水等。

按功能划分的建筑单元情况表

序号	建筑类别	建筑数量	单元面积	占总面积比例
1	场馆建筑	6	60437	9.24%
2	大型实验室	3	32411	4.95%
3	教学楼	21	147473	22.54%
4	科研楼	10	60289	9.21%
5	其他建筑	36	33143	5.07%
6	食堂餐厅	6	14474	2.21%
7	图书馆	4	25147	3.84%
8	行政办公楼	3	10777	1.65%
9	学生宿舍	24	173078	26.45%
10	学生浴室	2	3389	0.52%
11	医院建筑	2	3083	0.47%
12	交流场所	8	36830	5.63%
13	综合楼	5	53780	8.22%
合计		130	654311	1

年份	电力 (万kWh)	天然气 (万m³)	市政热力 (GJ)	汽油 (万L)	柴油 (万L)	总能耗 (tce)	总水耗 (万m³)
2017	4304.72	99.41	314285	0.52	0.00	17354.21	158.84
2018	4362.08	120.82	326983	0.48	0.03	18143.17	150.78
2019	4874.17	95.99	333446	0.45	0.03	18662.75	134.53
2020	3533.60	59.00	337512	0.32	0.03	16660.72	100.00

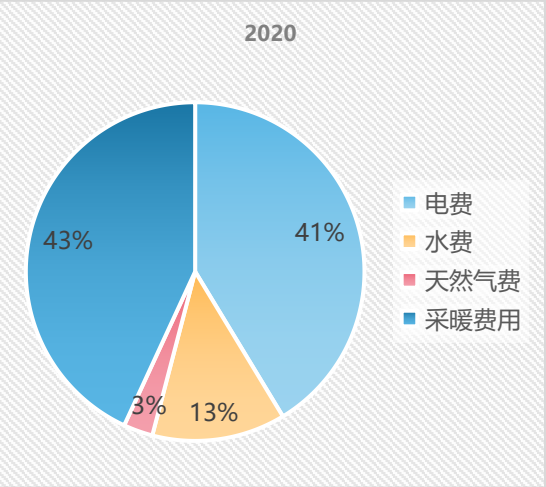
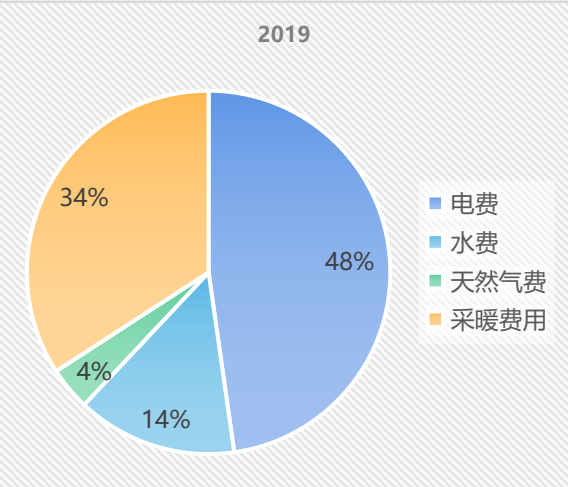
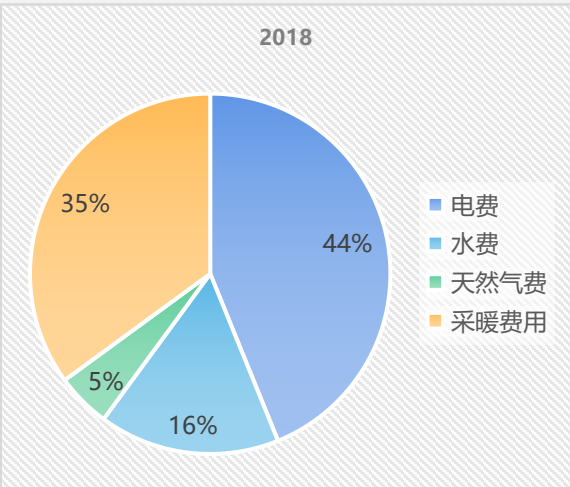
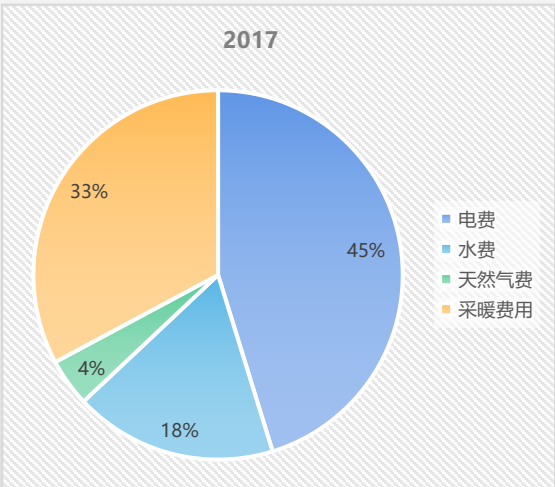


2017年-2020年能源消耗趋势

➤ 南开大学八里台校区能源费用

能源消费统计表

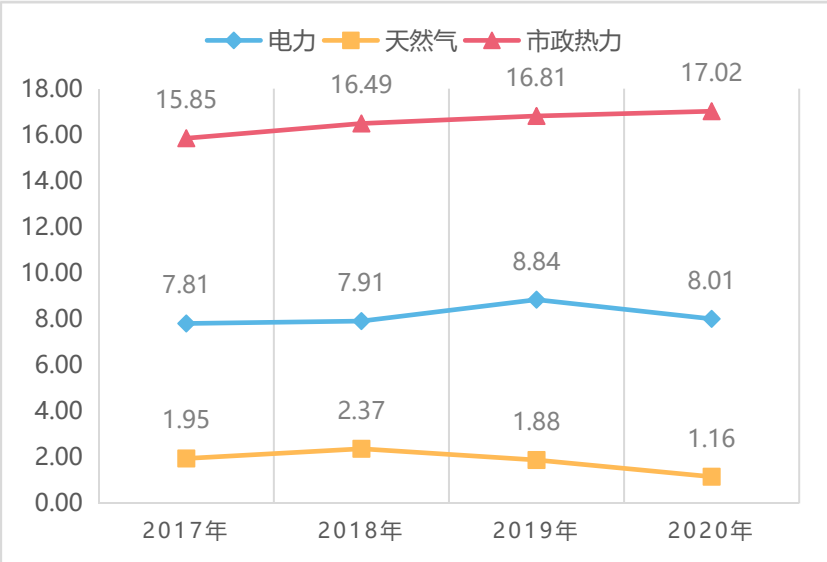
年份	电费		水费		天然气费		采暖费用	
	能源费用(万元)	费用占比	能源费用(万元)	费用占比	能源费用(万元)	费用占比	能源费用(万元)	费用占比
2017年	2825	45%	1109	18	262	4	2050	33
2018年	2865	44	1059	16	319	5	2289	35
2019年	3157	48	943	14	254	4	2258	34
2020年	2264	41	698	13	154	3	2362	43



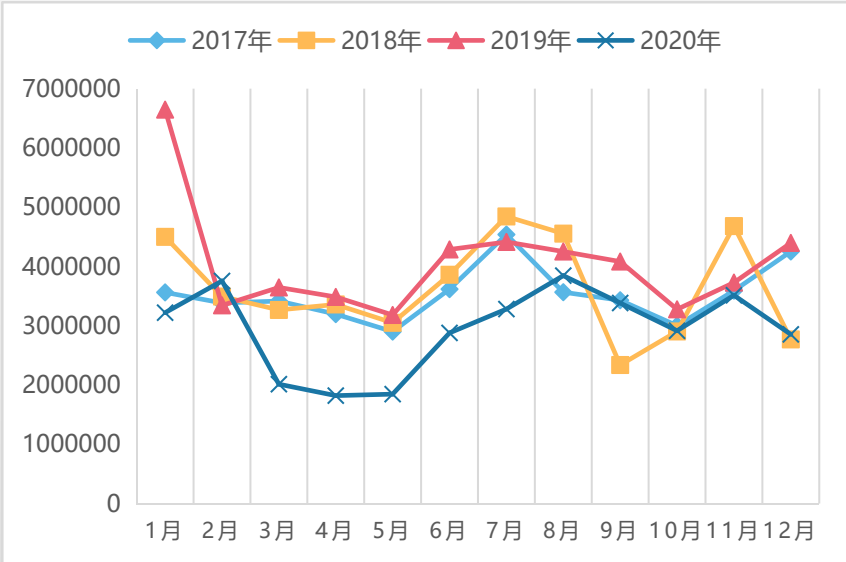
➤ 南开大学八里台校区能耗现状

2017年-2020年单位建筑面积能（水）耗分析

序号	能源种类	单位	2017年	2018年	2019年	2020年
1	电力	kWh/(m²·a)	65.57	64.39	71.95	65.20
2	天然气	m³/(m²·a)	1.47	1.78	1.42	0.87
3	热力	GJ/(m²·a)	4639.32	4826.76	4922.16	4981.77
4	自来水	m³/(m²·a)	2.34	2.23	1.99	1.47
5	总能耗	kgce/(m²·a)	25.61	26.77	27.54	26.19



2017年-2020年 单位建筑面积能耗 (单位: kgce/(m²·a))

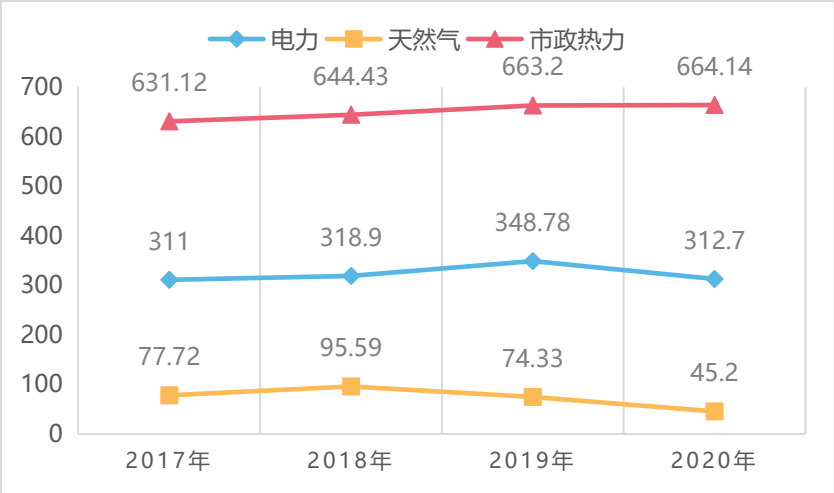


2017-2020年 逐月耗电量对比图 (kW·h)

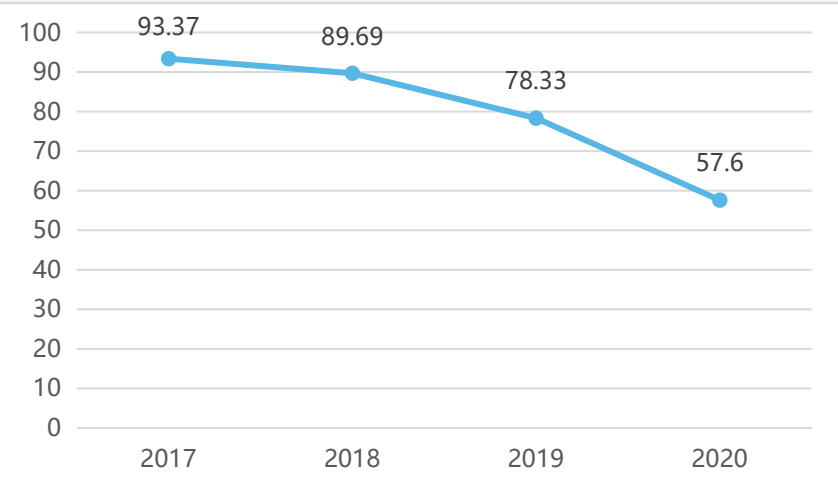
➤ 南开大学八里台校区能耗现状

2017年-2020年人均能（水）耗

序号	能源种类	单位	2017年	2018年	2019年	2020年
1	人均电耗	kW·h/（人·a）	2530.55	2594.78	2837.94	2544.35
2	人均天然气	m³ /（人·a）	58.44	71.87	55.89	33.99
3	人均热力	GJ/（人·a）	18.47	19.45	19.41	19.44
4	人均水耗指标	m³ /（人·a）	93.37	89.69	78.33	57.60
5	人均总能耗指标	kgce/（人·a）	1091.85	1078.92	1086.32	1022.04



2017-2020年人均能耗（kgce/（人·a））



2017-2020年人均水耗（m³/（人·a））

➤ 碳排放核算及相关分析

根据现场调研和数据的获取，校区碳排放的主要碳源包括建筑、交通和生活三个方面。建筑碳排放主要涉及7类建筑类型使用的电力、燃气能源；交通碳排放主要是校园公交（由于，校区设有多处停车场，所以进入校区的各类小汽车行驶时间较短，可忽略不计），生活碳排放主要指在校师生和工作人员的呼吸产生的CO₂。

参照 IPCC 编制的《国家温室气体清单指南》中的方法 2，即根据化石能源的消费数量及特定的排放因子进行CO₂排放的核算。依据校园能源使用特征，校园CO₂排放总量计算公式如下：

$$CE = \sum_i \sum_j E_{ij} \times EF_j$$

式中:i= 1, 2, 3 代表建筑、交通和生活的校园3个校园主要能源消耗部门，j= 1, 2, 3代表高校主要使用能源热力、天然气和电力等能源，E_{ij}代表 i 部门 j 能源的消费量，能源消费量根据南开大学能源统计数据分析获取； EF_j表示 j 能源的碳排放系数。

表 校区碳排放源分类

分类	排放设施
建筑碳排放	接待中心
	大型场馆
	膳食中心
	学生宿舍
	后勤服务
	办公教学
	各学院楼
交通碳排放	校车
生活排放	学生、教师、工作人员

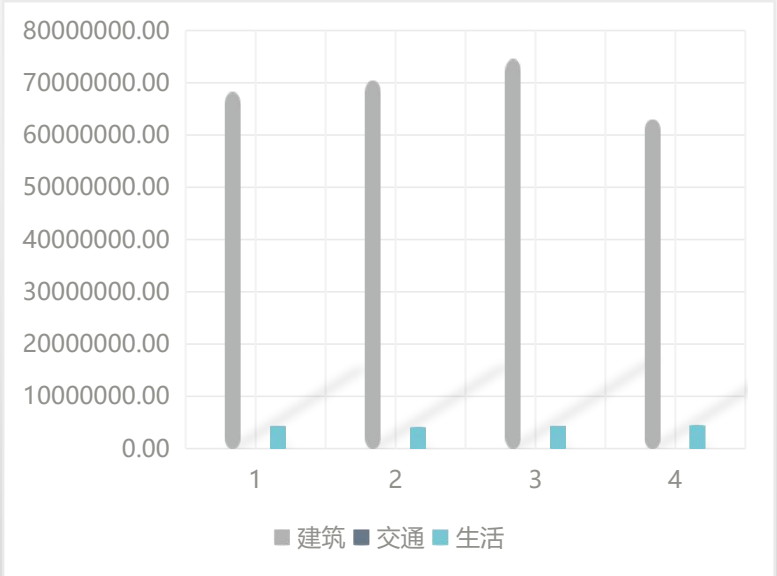
➤ 碳排放核算及相关分析

电力碳排放系数依据电力碳排放因子则按照《2019 中国低碳技术化石燃料并网发电自愿减排项目区域电网基准线排放因子》华北地区排放系数0.73 kg CO₂/kwh；参考《IPCC 国家温室气体清单编制指南》，结合我国《综合能源计算通则》中常用高能源热值标准：天然气 2.16 kg CO₂/m³；汽油 3.04kg CO₂/kg；柴油 3.14 kgCO₂/kg。天津市市政供热已全部煤改气，根据《国家发改委》公布的各行业核算指南，热力对应的二氧化碳排放因子缺省值为0.11 kgCO₂/MJ。在校人员的碳排放量取 0.9 kg/人·d。

年份	建筑碳排放量（kg CO ₂ ）	交通碳排放量（kg CO ₂ ）	生活碳排放量（kg CO ₂ ）	总量碳排放量（kg CO ₂ ）
2017	68145249.02	15821.52	4286772.00	72447842.54
2018	70423684.04	15548.01	4236372.00	74675604.05
2019	74335996.78	14635.23	4328100.00	78678732.01
2020	62934356.98	10679.85	4374720.00	67319756.83

由图可知，校园碳排放量主要与建筑与在校人员有关，交通碳排放量暂可不计。

能源种类	碳排放因子
电力	0.73 kg CO ₂ /kg
天然气	2.16 kg CO ₂ /m ³
柴油	3.14 kg CO ₂ /kg
汽油	3.04 kg CO ₂ /kg
热力	0.11 kg CO ₂ /Kwh



➤ 碳排放核算及相关分析

针对校园的特征，改进LMDI分解模型，结合Kaya公式对校园碳排放因素进行分析。

Kaya公式变形：

$$C = \frac{C}{E} \times \frac{E}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P$$

其中，C为碳排放总量，E为一次能源消费总量，Y为校园建筑面积，P为在校人数。

将其与LMDI模型进行结合：

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E_i}{E} \times \frac{E}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P$$

令：

$$F_i = \frac{C_i}{E_i}, \quad S_i = \frac{E_i}{E}, \quad I = \frac{E}{Y}, \quad R = \frac{Y}{P}$$

其中F是碳排放系数影响因素，S是能源结构因素，I是单位面积能耗，R是建筑面积因素，P是人口因素。

运用加法公式分解各影响因素的贡献值

$$\Delta C = \Delta C_S + \Delta C_I + \Delta C_R + \Delta C_P$$

表 各因素贡献值

年份	能源结构	单位面积能耗	建筑面积	人口因素	碳排放效应
2019-2018	353.91	377.42	-754.84	754.84	445.30
2018-2017	1014.23	334.30	-168.77	167.82	1347.58
2020-2019	1838.83	-1287.33	-406.81	409.97	554.66
累积	3206.97	-575.61	-1330.43	1332.64	2347.54

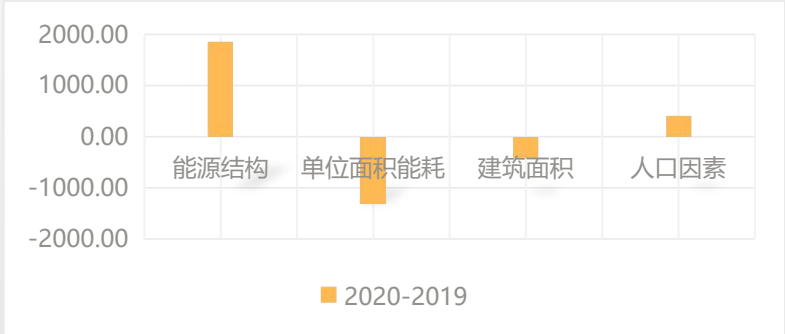
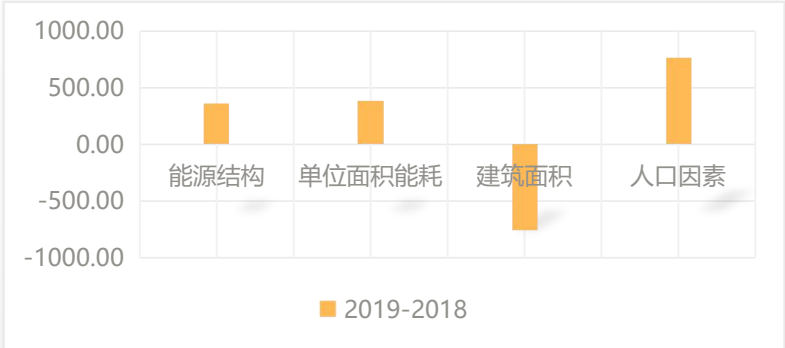
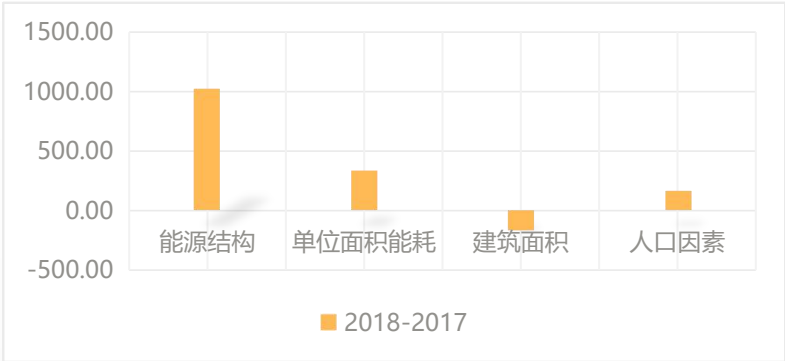


图 各因素贡献值

排除2020年疫情因素影响，分析得出，能源结构和人口因素基本对碳排放的增长期拉动作用，整体呈正效应，建筑面积的增加却在一定程度上起到了抑制作用。

➤ 能源消费及 CO₂排放情景预测

设置3种情景，快速达峰情景，中速达峰情景和慢速达峰情景。快速和慢速情景分别是对关键参数相应的“较快”和“较慢”的期望。利用这3种情景预测八里台校区CO₂排放达峰时间区间以及峰值水平区间，并分析3种情景达峰时间与峰值水平的差异，为校区制定节能减排政策提供参考。

情景设置

慢速达峰

中速达峰

快速达峰

根据 LMDI 分解，选取参数主要包括能源结构、人口总数、人均建筑面积等。参数值设定时，参考天津市“十三五”能源规划等相关政策文件以及相关文献，并根据 2017—2020 年各影响因素相对贡献度的变化趋势，对重要参数值进行修订、论证。

参数选择

能源结构

单位面积能耗

人均建筑面积

在校人数

➤ 不同情境下模型相关参数的设定

人口数据：基于2017-2020年人口数据，进行线性回归。

单位建筑能耗、人均建筑面积：基于2017-2020年数据，单位面积能耗基本维持在27kgce/m³上下，浮动约2-3%，人均建筑面积能耗在38%-39%，浮动约2%-4%，根据变动趋势进行赋值；

能源结构：对2020年数据进行修正，根据规划文件和参考文献，一次能源结构负效应可能进一步扩大、建筑面积正效应缩小并转为负效应的发展趋势设置中速达峰参数，并在此基础上加减相应百分比作为快速和慢速情景参数。

表 相关参数设置

参数	2020	2025	2030	2035
人数（人）	17360.00	17884.00	18424.00	18980.00
单位面积能耗（kgce/m²）	27.00	27.30	27.60	27.90
人均建筑面积(人/m²)	39.00	38.60	38.40	38.20

表 能源结构

能源种类	2020	慢速达峰			中速达峰			快速达峰		
		2025	2030	2035	2025	2030	2035	2025	2030	2035
电力	0.34	0.41	0.42	0.43	0.45	0.46	0.47	0.48	0.50	0.52
天然气	0.07	0.09	0.15	0.18	0.13	0.18	0.28	0.15	0.27	0.38
市政热力	0.59	0.50	0.43	0.39	0.42	0.36	0.25	0.37	0.23	0.10

➤ 不同情境下CO2排放达峰时间和峰值水平

表 不同情景下CO2排放达峰时间和峰值水平

年份	快速(kg CO ₂)	中速(kg CO ₂)	慢速(kg CO ₂)
2025	80484886.31	79551663.73	78706542.6
2030	80018501.99	80687897.87	79512475.74
2035	79769673.36	80234219.96	81237296.41 (未达峰)

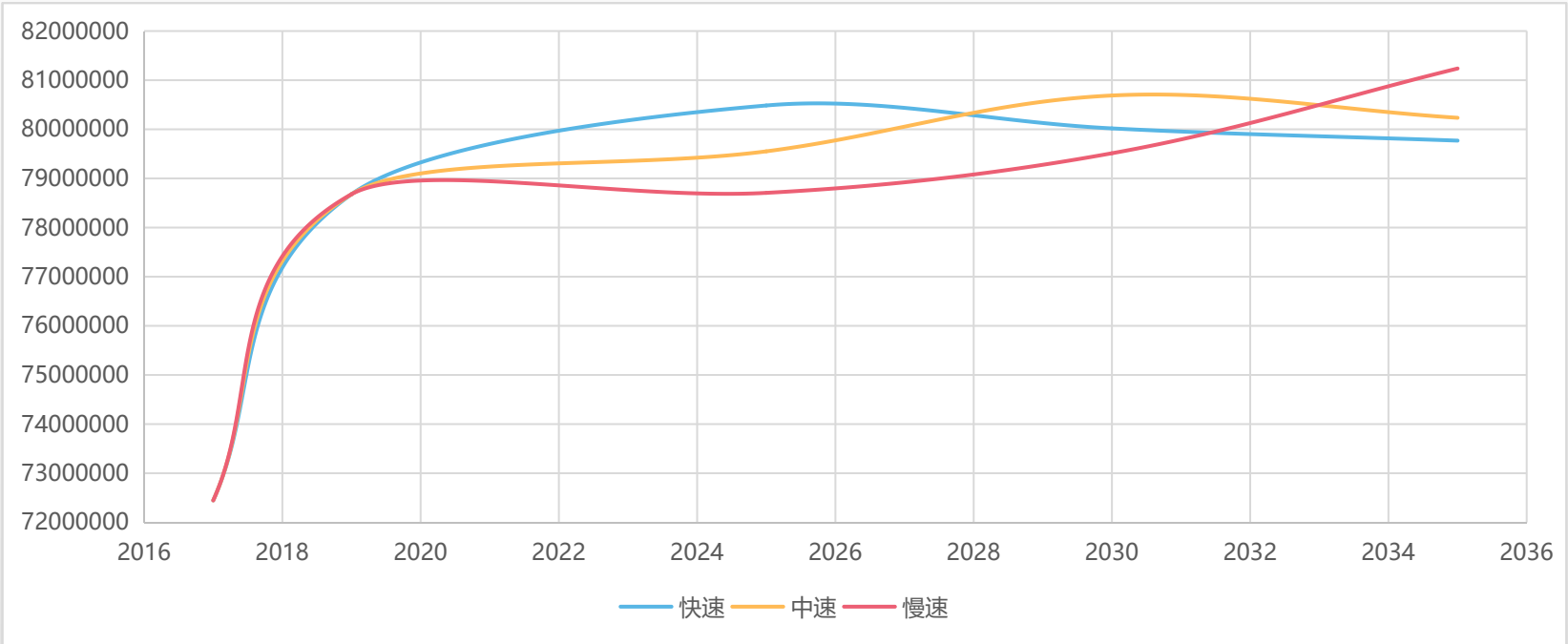


图 不同情景下CO2排放总量

根据数据预测，慢速情景设置下2035年前校园未实现碳达峰，中速情景下校园在2030年期间实现碳达峰，快速情景下校园在2025年期间实现碳达峰。

➤ 中速达峰情景下光伏发电需求量


以中速碳达峰为参照，假设校园在2030年达到碳达峰，碳排放量为 80687897.87kg CO₂, 折合耗电量110410369.3 kwh。

建筑屋顶光伏安装发电潜力：根据八里台校区提供的建筑面积数据，并通过在线地图和ENVI软件提取建筑轮廓计算八里台校区建筑屋顶面积并校正，估算出八里台校区屋顶可安装光伏并运用PVSYST软件进行光伏发电量模拟,约145187.87m²。安装最佳倾角：30°。校区安装数量87025块光伏板，模拟的出全年发电量约为35615649kwh，约占校园需求量的32%。为建设“零碳校园”可进一步考虑在建筑立面以及建筑之外的空间加装光伏板。



八里台校区建筑平面

YLM 60 CELL



Dimensions
1665mm / 1002mm / 35mm

产品规格
YL335D-30b (1500V), 峰值功率335W
YL330D-30b (1500V), 峰值功率330W
YL325D-30b (1500V), 峰值功率325W
YL320D-30b (1500V), 峰值功率320W

英利YLM系列组件, 选用优质P型单晶电池及生产工艺, 专业技术与可靠品质, 为系统发电量提供优良保障。

*有1000V和1500V两种设计

英利光伏组件

	GL. horiz. kWh/m ² .day	Coll. Plane kWh/m ² .day	System output kWh/day	System output kWh
Jan.	2.09	3.27	76292	2365063
Feb.	2.85	3.91	91088	2550473
Mar.	3.72	4.49	104679	3245047
Apr.	4.78	5.10	118757	3562706
May	5.50	5.41	126147	3910570
June	5.32	5.00	116571	3497125
July	4.84	4.63	107795	3341636
Aug.	4.29	4.34	101126	3134904
Sep.	4.02	4.66	108626	3258767
Oct.	2.95	3.76	87633	2716637
Nov.	2.02	3.05	71136	2134071
Dec.	1.59	2.63	61247	1898650
Year	3.67	4.19	97577	35615649

