

# 分布式光伏应用场景 研究报告

北京沃盈数字科技研究院有限公司

2023 年 5 月

## 目 录

一、BIPV 与 BAPV .....	1
1.1 BAPV、BIPV 介绍 .....	1
1.2 BIPV 应用场景及应用条件 .....	3
1.2.1 BIPV 应用场景.....	3
1.2.2 BIPV 限制条件.....	5
1.2.3 成本对比 .....	9
1.3 小结 .....	10
二、交通类分布式光伏应用场景 .....	12
2.1 高速公路 .....	12
2.1.1 服务区.....	12
2.1.2 边坡 .....	16
2.1.3 桥梁 .....	20
2.1.4 隧道遮阳棚.....	21
2.1.5 闲置区域（绿地、互通圈、隧道前方空地等闲置区域）	23
2.1.6 昆明场景应用可行性.....	24
2.2 机场 .....	24
2.3 轨道交通 .....	28
2.3.1 光伏发电在轨道交通中的应用价值 .....	28
2.3.2 光伏发电系统在轨道交通中的应用条件 .....	30
2.3.3 光伏安装地铁车辆段经济效益估算 .....	31
2.3.4 “光伏+轨交”场景在昆明的应用可行性.....	34

<b>三、城市分布式光伏运用场景 .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1 城区建筑物屋顶分布式光伏.....</b>	<b>36</b>
3.1.1 城市住宅、工商业屋顶分布式光伏 .....	36
3.1.2 工业园区屋顶分布式光伏 .....	40
<b>3.2 光伏+城市交通.....</b>	<b>43</b>
3.2.1 光伏+路灯 .....	43
3.2.2 光伏声屏障.....	44
<b>3.3 城市附属设施分布式光伏 .....</b>	<b>48</b>
3.3.1 光伏+城市景观.....	48
3.3.2 光伏+垃圾填埋场 .....	50
<b>3.4 小结 .....</b>	<b>53</b>
<b>四、农村类分布式光伏应用场景 .....</b>	<b>55</b>
4.1 光伏+农村屋顶.....	55
4.2 光伏+养殖（渔业、畜牧业） .....	57
4.3 光伏+农业大棚.....	62
<b>五、其他省份分布式光伏发电项目建设情况 .....</b>	<b>65</b>
5.1 分布式光伏上网电价 .....	65
5.2 分布式光伏发电上网模式 .....	67
5.3 分布式光伏发电项目接入要求 .....	68
5.3.1 并网电压等级要求 .....	68
5.3.2 屋顶分布式光伏发电项目接入要求 .....	70
5.4 屋顶光伏安装限高 .....	70

六、工作建议 .....	74
七、参考文献 .....	75
八、附 录 .....	79

## 一、BIPV 与 BAPV

### 1.1 BAPV、BIPV 介绍

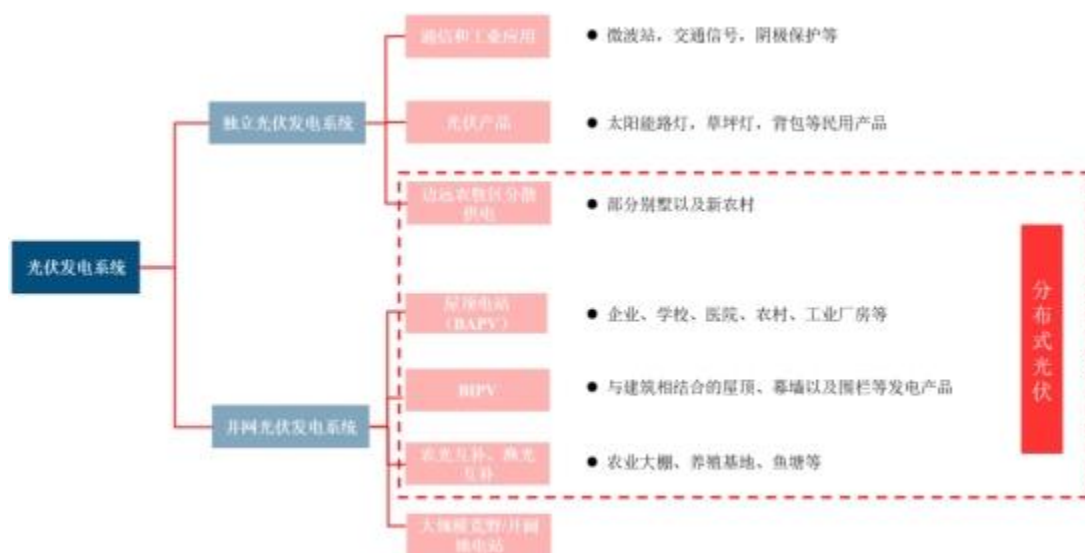


图 1 光伏发电系统的分类

分布式光伏与建筑的结合方式目前包括 BAPV 与 BIPV 两种。BAPV(Building Attached Photovoltaic)，称为“安装型”太阳能光伏建筑，在目前较常见应用中，普遍是在建筑屋顶上直接安装附加的钢结构支架或者滑轨，并在之上安装光伏板进行发电。



图 2 BAPV 与 BIPV 实际应用区别

由于结构相对简单，BAPV 发展较快，但也存在一些缺点：（1）屋面荷载：原建筑的荷载不满足安装要求，需对原有屋面再加固，或是加固困难导致无法安装；（2）在已有的屋面上安装时，会对原有建筑的防水层造成破坏，在建完后需要对防水层进行修补，给房屋的防水带来一定的安全隐患；（3）附属组件如逆变器等设施常常暴露在外，降低了其实际使用寿命。

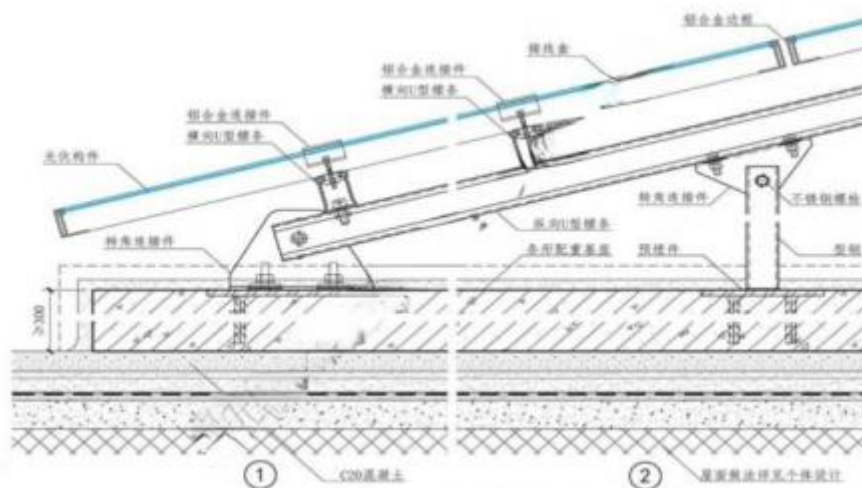


图 3 BAPV 安装结构示意图

BIPV(Building-integrated photovoltaics)是指光伏作为建材材料与建筑物同时设计、同时施工和安装，两者相结合的光伏发电系统，也称为“构建型”和“建材型”光伏，由于其本身承载了建筑材料的性能，其应用场景更加多元化。

BAPV 在已施工完成的建筑物，更适合应用在存量建筑场景，而 BIPV 本身即为建筑材料，其被使用在建筑施工流程中，因此其主要应用于新建建筑或整体大规模翻新建筑。两者模式并行发展，各有优劣。

表 1 BIPV 和 BAPV 并行发展，各有优势

项目	BAPV	BIPV
建筑外观	在彩钢板上后期安装支架和光伏电池板，屋面较凌乱， <b>整体性较差</b>	<b>屋面美观，简洁大方，具有现代工业建筑特征</b>
设计寿命	光伏发电组件处于露天环境，寿命一般在 <b>20-25 年</b> ，下方彩钢瓦使用寿命较短，使用寿命一般仅为 <b>10 年</b>	良好的密封环境，组件封装用胶为 PVB，具有透明、耐热、耐寒、耐湿，机械强度高特性， <b>整体能达到 30 年甚至更长的使用寿命</b>
屋面受力	屋面的压型金属板与后置的光伏电池板	<b>屋面结构受力清晰，结构安全性高，钢化玻</b>

	受力复杂，金属板和光伏电池板既有风载正压也有负压，光伏电池板受力通过支架传递到压型金属板， <b>长期的风载作用和变形会产生疲劳效应，影响结构安全</b>	璃的厚度符合国家建筑设计规范，通过严格的力学计算得出，满足屋面安全性要求
防水可靠性	在压型金属板（彩钢板或铝镁锰板）屋顶安装完毕后二次上人安装光伏组件等设备，会因为吊装、施工踩踏、长期光伏自重荷载和局部设备超载造成彩钢板或铝镁锰板永久沉降变形， <b>造成后期隐患性漏水并且难于检修和发现漏点</b>	屋面系统主要采用憎水型玻璃面板与主水槽、防水密封等形成屋面防排水系统，屋面构造、泛水包边、采光带等采用模块化组合，主水槽等受力构件采用卡扣式零穿孔连接，组件与组件（或踏板）间使用可靠的密封扣条进行固定和密封，泛水包边采用对焊连接， <b>系统设计带有防震动体系，避免漏水隐患</b>
施工难度和速度	屋面分 <b>二期施工，施工周期长</b> ，直立锁边金属板屋面板 <b>施工难度大</b>	<b>屋面施工难度小，安装速度快。</b> 在完成支架和水槽施工后，每人每天至少安装 40 m <sup>2</sup> （25 块组件），10,000m <sup>2</sup> 主屋面 20 人 15 天左右即可完成组件安装和屋面的整体密封工作
运营维护	屋面在施工检修中多次踩踏，屋面变形大，漏水隐患多， <b>维修难度大</b>	<b>屋面同步设计、施工，对屋面构件形成保护，不造成二次施工踩踏破坏。</b> 屋面以单块电池组件为单元模块化设计安装，可随意拆卸、修葺，检修维护方便；屋面根据合理运维，半径设置的检修走道踏板，对屋面和组件都不造成破坏，保护了屋面的完整性


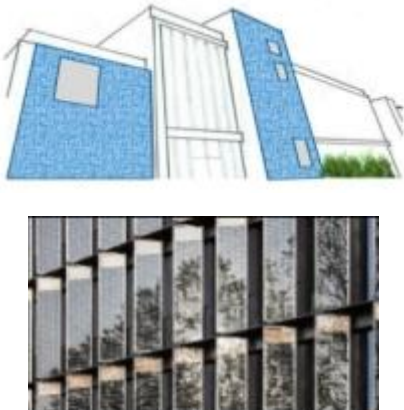


## 1.2 BIPV 应用场景及应用条件

### 1.2.1 BIPV 应用场景

BIPV 适用于各类公共建筑、工业建筑、民用建筑等可以承载光伏发电系统的建筑物，可应用在建筑屋顶、幕墙、采光顶、温室、雨棚等多种场景。目前主要应用于工商业厂房屋顶、防雨车棚等大面积屋顶，以及大型工商业建筑的外侧

幕墙。

表 2 BIPV 应用场景及相应优势

	应用	优势
<p>光伏屋顶</p> 	<p>太阳能组件取代常规瓦片集成为光伏屋顶</p>	<p>起到隔热、降温、美观作用；相比其他光伏电站，安装门槛低，只要有屋顶就能建电站</p>
<p>光伏幕墙/覆层</p> 	<p>太阳能电池板集成为幕墙和建筑外立面的传统覆层系统</p>	<p>半透明幕墙可平衡采光和遮阳，发电的同时又能保证美观，取代传统幕墙</p>
<p>太阳能玻璃和窗户</p> 	<p>太阳能电池作为窗户、玻璃面板，用于观景或采光</p>	<p>同时满足发电和照明需求；平衡采光和遮阳</p>
<p>建筑外部构造</p>  <p>光伏遮阳板</p>	<p>太阳能电池作为遮阳板、阳台护栏、温室、雨棚、隔音板、光伏车棚</p>	<p>作为建筑本体遮阳结构安装，防止了外墙的额外负载；有作为可调设备的潜力；允许使用不同形状的光伏组件</p>



 <p>光伏车棚</p>		
---	--	--

### 1.2.2 BIPV 限制条件

#### (1) 国内光伏建筑一体化标准并不健全

当前光伏行业 BIPV 相关标准并不健全，依然处于摸索阶段，我国标准主要引用自国际电工委员会太阳能光伏能源系统技术委员会 (IEC)。从现有国内标准的来看，光伏建筑中电气、结构、保温等内容已有覆盖，但缺少防火等安全性能的指标与测试方法。现有的标准更侧重于产品端，关于工程设计、环境条件的标准较少，对 BIPV 的应用造成一定限制。

表 3 BIPV 相关标准

类别	级别	标准名称
工程设计标准	国家标准	GB/T 36963-2018 《光伏建筑一体化系统防雷技术规范》
	国家标准	GB/T 37655-2019 《光伏与建筑一体化发电系统验收规范》
	国家标准	GB/T 51368-2019 《建筑光伏系统应用技术标准》
	行业标准	JGJ 203-2010 《民用建筑太阳能光伏系统应用技术规范》
	行业标准	JGJ/T 264-2012 《光伏建筑体一体化系统运行与维护规范》
	行业标准	JGJ/T 365-2015 《太阳能光伏玻璃幕墙电气设计规范》
	地方标准	DB 21/T 1792-2010 《太阳能光伏与建筑一体化技术规程》
	地方标准	DB 11/T 881-2012 《建筑太阳能光伏系统设计规范》
	地方标准	DB 11/T1008-2013 《建筑太阳能光伏系统安装及验收规程》
	地方标准	DB 33/ 1106-2015 《建筑太阳能光伏系统应用技术规程》
	地方标准	DB 34/ 5006-2014 《太阳能光伏与建筑一体化技术规程》
	地方标准	DB 34/T 2461-2015 《建筑用光伏构件系统工程技术规程》
产品标准	国家标准	GB/T 37052-2018 《光伏建筑一体化 (BIPV) 组件电池额定工作温度测试方法》
	国家标准	GB/T 37268-2018 《建筑用光伏遮阳板》
	国家标准	GB/T 38388-2019 《建筑光伏幕墙采光顶检测方法》

国家标准	GB 29551-2013《建筑用太阳能光伏夹层玻璃》
国家标准	GB/T 29759-2013《建筑用太阳能光伏中空玻璃》
国家标准	GB/T 38344-2019《建筑用太阳能光伏夹层玻璃的重测导则》
行业标准	JG/T 465-2014《建筑光伏夹层玻璃用封边保护剂》
行业标准	JG/T 492-2016《建筑用光伏构件通用技术要求》
行业标准	JGJ/T 365-2015《太阳能光伏玻璃幕墙电气设计规范》
地方标准	DB 13/T 2826-2018《建筑幕墙用光伏系统通用技术要求》

## (2) 行业融合难，建筑与光伏互相割裂

由于光伏企业在建筑建材性能方面缺乏经验，其仅对常规光伏产品进行建材化、构件化的改造，传统 BIPV 产品往往无法满足建筑要求，如防火、防水要求等。同时建筑行业对光伏行业缺乏理解，建筑的地理位置、场地条件和自身设计均会对 BIPV 发电效率产生影响，而 BIPV 则需要承载建筑的基本功能，如果光伏设计独立或滞后于建筑设计，则会导致方案的反复调整，延误工程进度，增加额外成本，BIPV 与建筑二者融合存在较大挑战。光伏设计需从建筑规划阶段开始介入，才能实现真正的光伏建筑一体化。



图 4 BIPV 一体化设计要点

## (3) 应用条件

结合相关标准及 BIPV 产品的特性、应用场景来看，其应用条件如下：

表 4 应用条件（以应用最成熟的光伏屋顶为例）

	相关因素	主要内容
环境 条件	光照条件因素	光照时间长、年有效日照小时更多的区域适宜安装光伏。
	朝向	发电板朝南时太阳辐射、发电量最高。在屋顶在南方 $\pm 10^\circ$ 范围内，对发电量都没有太大的影响。
	遮挡物状况	需选取无遮挡物的屋顶开展光伏建设，计算屋顶可利用面积。障碍物会对太阳能电池板造成热斑效应，这不仅会影响整体发电量，还会对面板造成致命的损害。
建筑 条件	屋顶斜率	光伏电站的安装角度全国各地区各省市各县都不相同，通过经度、纬度、场地角度、光伏方阵、地区光照条件等来计算。屋面的倾斜角度在 $25^\circ$ 左右属于适中角度，而如果屋顶太过于陡峭，一方面影响安装施工的难度，造成安装人员的安全隐患，另一方面，电站的发电效率将会大大减弱。
	屋面荷载 (各类型荷载)	光伏电站建在屋顶，要充分考虑到屋顶的固定荷重、风压荷重、雪压荷重、地震荷载能力，同时还要有足够能力来承载光伏组件，支架以及光伏线缆的重量。居民屋顶、工商业屋顶多为混凝土屋顶，进行前期荷载考量，选取合适的屋顶开展光伏建设。屋面荷载要求：水泥屋顶 $\geq 2\text{KN/m}^2$ 。（《建筑结构荷载规范》（GB50009-2012））
	屋面防水 (水泥混凝土、彩钢瓦)	城市住宅及商业屋顶多为水泥混凝土屋顶，主要考虑对屋顶防水层的影响。需要选取合适的安装形式，减少对屋顶防水层的破坏。 防水要求可重点参考《屋面工程技术规范》（GB50345），《坡屋面工程技术规范》（GB50693）、《压型金属板应用技术规范》（GB50896）。
	防火	我国关于光伏组件防火性能测试采用的标准是 IEC61730-2-2016《光伏组件安全规范—第 2 部分，测试要求》，但是光伏组件应用于建筑上时是远不够的，最终的光伏组件性能评价需要采用最为严苛的标准进行衡量。比如《建筑材料及制品燃烧性能分级》（GB8624-2012）和《建筑设计防火规范》（GB50016-2014）等一些常用的建筑防火相关标准。
	房屋可使用年限	混凝土屋顶的使用年限较长，一般情况下能保证光伏 25 年的运营期，选取时需要考量房屋未来的使用年限是否高于 25 年。
	对周围建筑物	建筑物上安装的光伏发电系统，不得降低相邻建筑物的日照标准。安装

		时需要选取合适的安装高度与区域，避免对周围建筑物的光照产生影响。
	建筑结构与电气	在既有建筑物上增设光伏发电系统，必须进行建筑物结构和电气的安全复核，并应满足建筑结构及电气的安全性要求。不能破坏既有建筑物结构，同时也要保证电气安全，技术因素。
	与屋面的间隔	平屋顶安装光伏组件时，最低点距离屋顶平面不得小于 0.3m，通风与防止雨水溅起；坡面屋顶，顺坡架空安装的光伏组件与屋面的垂直距离不得应小于 0.1m。
	高度限制	建筑为平屋面屋顶结构时，光伏组件安装最高点与顶层屋面（不包括女儿墙、楼梯间）距离不得超过 1.5m，建筑为坡屋面屋顶结构时，光伏组件应与顺坡安装，不得超出屋面外沿，不应超过该安装屋面的最高点，组件方阵表面与安装屋面的垂直高度不得超过 30cm。
	房屋产权	房屋所有权清晰：家庭屋顶的并网申请需要业主本人的身份证及房产证，所以这个房屋的所有权必须是清晰的；如果是高层屋顶，通常屋顶属于公共区域，若想安装光伏系统，需获得全体邻居的同意。特殊情况：如果房屋、园区、厂房本身不属于个人所有，则需签署一份较长期的租赁期且经过产权人同意，目前这种情况主要集中于分布式工商业项目中。
	美观要求	光伏组件应按集中优先、整齐对称、色调和谐、美观统一的原则进行布置。入口、重要集散广场及景观节点等区域的家庭屋顶加装光伏发电系统时，应严控安装形式与色调。

### 项目案例

国内 BIPV 项目类型主要为政府投资公共建筑项目、工业项目、商业项目等，住宅项目较少。例如 2021 年江西丰城中电建厂房屋顶分布式光伏发电项目预计将完工，其装机容量达 40.9MW，为全球 BIPV 单体容量最大项目。其他 BIPV 标志性案例包括上海世博园中国馆主题馆（2.91MW，安装面积 3.3 万平，年减碳排约 2,600 吨）、北京南站（245kW）、上汽大众宁波生产基地停车棚（20MW，年减碳排约 17,000 吨）、电谷锦江酒店（1.5MW）、国家电投总部大楼（170kW）、北京世园会中国馆（70kW）、国家能源集团 BIPV 中心（113kW）、隆基股份总部大楼、上海松江科创云廊、武汉新能源研究院等。



图 5 上海松江科创云廊屋面 BIPV

### 1.2.3 成本对比

#### (1) 工商业屋顶分布式光伏系统初始投资成本构成：

我国分布式光伏电站光伏系统端成本主要由光伏组件、逆变器、固定式支架、一二次设备、电缆、土地成本、电网接入成本等费用构成，建筑工程端成本主要由建安、一次性土地费用、管理费等组成，光伏组件成本约占整个系统成本的一半。



图 6 2021 年工商业分布式光伏电站安装成本占比

表 5 工商业屋顶 BIPV 与 BAPV 系统初始投资成本拆分对比

费用项目	BIPV 细分	金额 (元/W)	BAPV 细分	金额 (元/W)
设备安装费	光伏电池组件	1.50	光伏电池组件	1.50
	逆变器	0.17	逆变器	0.17



	支架	0.18	支架	0.35
	一二次设备	0.30	一二次设备	0.30
	屋面提升	0.40		
	电缆	0.05	电缆	0.05
	电网接入	0.12	电网接入	0.12
建筑工程费	建安	0.40	建安	0.40
	土地成本	0.25	土地成本	0.25
其他	咨询设计费	0.16	咨询设计费	0.10
	管理费	0.15	管理费	0.10
	施工利润	1.00	施工利润	0.50
总计		<b>4.68</b>		<b>3.84</b>

## (2) 工商业屋顶 BIPV 与 BAPV 系统经济性比较:

基于国泰君安研究所报告中的模型测算结论可知(测算假设、经济性测算可参考附录 1、2、3)，工商业屋顶 BIPV 系统的静态投资回收期约 10.0 年，项目 IRR 约 12.3%，工商业屋顶 BAPV 系统的静态投资回收期约 12.3 年，项目 IRR 约 11.1%。综合来看，尽管 BAPV 系统在初始投资方面具有略微优势，但现金流整体增速不及 BIPV 系统，运行 6-7 年后会被 BIPV 超越，达到投资回收期时间也比 BIPV 系统更长，后期二者收益差距进一步拉大。但不可忽视的是，BAPV 前期投资成本较 BIPV 低约 0.8 元/W，由于其初期成本低、建设速度快、简单，“短平快”的特性使得其在存量建筑的工商业屋顶场景成为主流模式。

## 1.3 小结

当前，BIPV 发展时间还并不长，更多用于工商业建筑屋顶。传统 BIPV 产品的建材属性又偏弱，很多市售 BIPV 产品都无法达到最基本的建材要求。长远来看，BIPV 虽然在多方面拥有优势，真正做到了光伏建筑一体化，但由于需承担建筑材料的功能，其技术难度高、初期成本高的情况下，要更换原有屋顶或玻璃将对居民生活、工厂生产以及建筑物的使用造成一定影响。在分布式光伏推进过程中，存量房屋为主要应用对象，前期存量房屋改造场景 BAPV 模式更加适合；新建建筑情况下，BIPV 则更加适合，两者各有优劣，为互补关系，真正考

虑的核心在于成本以及场景需求。在昆明地区，若对大量的存量建筑进行改造，则 BAPV 做法更加经济、短期效益快；若修建新建筑，如一些大型商业写字楼、地标建筑、车站等，考虑到美观及长期的效益，更适合采用 BIPV 模式。

## 二、交通类分布式光伏应用场景

### 2.1 高速公路

2020年8月6日，交通运输部发布《关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》，提到鼓励在服务区、边坡等公路沿线合理布局光伏发电设施，与市电等并网供电。“光伏+高速公路”即是将光伏发电技术与高速公路系统集成，利用高速公路系统中路肩、匝道、隔离带等自有空间，以及服务区建筑屋顶、停车棚、围墙等设施空间布置安装光伏发电系统。

#### 2.1.1 服务区

高速公路服务区的屋顶区域基本处于闲置状态且周围无遮挡，具有很好的安装条件，光伏发电系统可满足服务区内部用电需求，如公共场所照明、办公区域照明等。与一般集中式光伏电站项目相比，高速公路分布式光伏服务区场景具有以下优势：（1）不新增建设用地；（2）光伏设施运维管理可与高速公路日常运营管理一并统筹，仅需增加少量专业技术人员，管理方便；（3）所发电能供高速公路运营所需，可及时就地消纳。

##### 场景 1：服务区房屋屋顶光伏、高速公路收费站屋顶

针对现有的服务区内主要建筑物分为平屋面及坡屋面两种形式，平屋面光伏组件安装采用固定倾角方式，支架采用钢支架；坡屋面采用平铺式安装方式，支架采用铝合金支架。高速公路收费站、服务区院区主要包含收费天棚、办公楼、住宿楼、职工活动中心、辅助用房（餐厅、发电房、水泵房、锅炉房等），建筑结构一般分为钢混水泥屋面、彩钢屋面、瓦屋面等。其具有屋顶面积大，屋顶相对平坦等优势。高速服务区屋顶资源非常适合分布式光伏建设，施工工艺相对简单，市场普及率高，且均利用闲置土地。

##### 场景 2：服务区光伏车棚

光伏车棚是指在车棚顶部安装光伏组件发电，实现自发自用、余电上网。高速公路服务区设有（或预留）公共区域停车位，具备安装光伏车棚的优越条件，能为服务区提供灯光照明、电动汽车充电等设施设备用电需求，还能为车辆提供遮挡阳光及雨雪。车棚资源也较为适合分布式光伏建设，面积较小且区域分散。



从设计结构来看，光伏车棚主要有单车位光伏车棚和双车位光伏车棚。设计结构一般分为两种结构，分别单支撑立柱结构、双支撑支柱结构设计，均直接采用太阳能电池板作为其屋面系统，太阳能电池板连接通过铝合金压块方式固定，1块太阳能电池板通常采用4个压块。考虑到停车棚防水问题，可以在太阳能电池板之间增加泡沫棒并填充密封胶，而且在上部需要做彩钢或者铝合金盖板，此种做法防水性能极佳，安全稳定，安装方便。

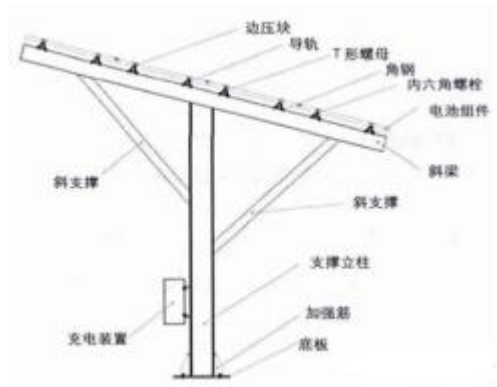


图 7 单支撑立柱单车位车棚结构

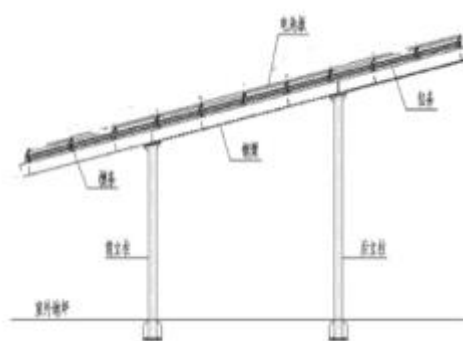


图 8 双支撑立柱单车位车棚结构

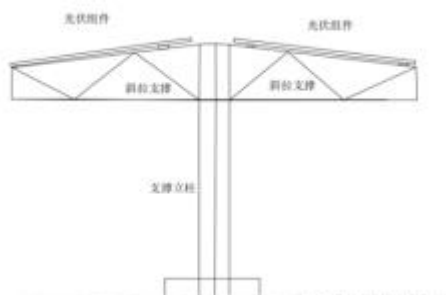


图 9 单支撑立柱双车位车棚结构

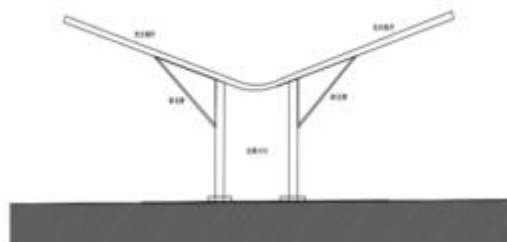


图 10 双支撑立柱双车位车棚结构

光伏车棚应用条件：光伏车棚大多为模块化设计，可单独使用或多个组合，便于扩展，少则几个车位，多则几百个车位，灵活性比较强，建设时考虑更多是本身的结构设计、承重等因素，几乎没有应用场景的限制。需要注意的是，光伏车棚虽然是在企业总体建设用地的范围内，但如果是没有相关建设规划许可的，可能会被列为违章建筑，建设前需要到规划部门办理相关手续，取得相应的许可文件。

### 项目案例——四川攀大高速公路（四川境）

2022年8月24日，在四川攀枝花和云南大理的“攀大高速”公路（四川境），

由蜀道集团旗下四川路桥投资建设的分布式光储项目全线成功并网运行，是四川省首个“光伏+高速”试点项目。该项目位于四川省攀枝花市仁和区，海拔 1,180m 至 1,932m 之间。该项目利用红线范围内各类闲置交通资产，如道路边坡、建筑屋顶、弃土场、隧道隔离带、服务区、收费站、沿线电子设备等全场景，建设分布式光储，集成光伏发电、电能储存、车辆充电、风光储氢多源协同的“冷热电”多能供应，实现资源高效利用，为高速公路低碳运行提供清洁能源保障。



图 11 服务区光伏设施图



图 12 服务区闲置边坡光伏设施图

该项目预计可实现年平均发电量 285 万 kWh，运营 25 年总发电量可达 7,125

万 kWh, 可节约标准煤约 2.34 万吨、减少二氧化碳约 5.7 万吨、二氧化硫约 0.052 万吨。日发电量基本能满足项目运营自身用电需求并有适当富余。截至 2022 年 9 月 14 日, 该项目已发电近 30 万 kWh, 使攀大高速(四川境)41 公里路段完全实现清洁能源自给自足, 另有 80%发电量直接输送至国家电网。



图 13 服务区内光伏车棚

根据国家气象局风能太阳能评估中心划分标准, 我国太阳能资源地区分为以下四类:

表 6 太阳能资源等级分类

地区 类型	年日照 时数 (h/a)	年辐射 总量 (MJ/m <sup>2</sup> )	主要地区	备注
一类 地区	3,200- 3,300	6,680-8,400	宁夏北部、甘肃北部、新疆东南部、青海西部和西藏西部等地。尤以西藏西部最为丰富, 最高达 2,333kWh/m <sup>2</sup> (日辐射量 6.4kWh/m <sup>2</sup> ), 居世界第二位, 仅次于撒哈拉大沙漠。	最丰富
二类 地区	3,000- 3,200	585-6,680	河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部等地	较丰富

三类地区	2,200-3,000	500-5,850	主要包括山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、苏北、皖北、台湾西南部等地	中等
四类地区	1,000	334-5,016	湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕南、苏北、皖南以及黑龙江、四川、贵州、台湾东北部等地	较差

高速路服务区光伏建设主要以屋顶光伏建设场景为主，其应用条件更多考虑如前文表 1 所述，如气候、朝向、遮挡物等环境因素和房屋斜率、荷载、防水层等建筑因素。而其他场景，停车场用地、闲置用地等场景，建设条件仅需考虑日照条件、建设可行性。综上，可以看出高速路服务区场景并无太多应用限制条件，更多地取决于当地的日照条件是否满足光伏建设要求，而通过以上案例可以看到，四川属于第四类资源区，尽管太阳能资源较差，但其服务区项目运行效率良好，云南属于第三类资源区，拥有更佳的前置条件，所以云南高速公路服务区分布式光伏项目建设具备可行性。2022 年初云南高速公路里程突破一万公里，目前全国、云南省都没有官方统计高速公路服务区数量，按照我国《高速公路交通工程及沿线设施涉及通用规范》，高速公路沿途服务区的平均间距不宜大于 50km，换言之，高速公路沿途每隔 50km 至少设有一处服务区。由此推算，云南至少有 200 个服务区，云南高速公路分布式光伏建设市场空间巨大。

### 2.1.2 边坡

高速公路路基分为填方路基（路堤）、挖方路基（路堑）等形式<sup>1</sup>，路基侧边大面积的边坡具有安装光伏的潜力。不过，在边坡修建光伏前，应对建设路段工程地质情况进行勘探和调查，根据地形地貌特征、水文特征、主要地层的分布及物理力学性质等选取合适的项目建设路段。

<sup>1</sup> 交通运输部，《公路路基设计规范》，2015-02



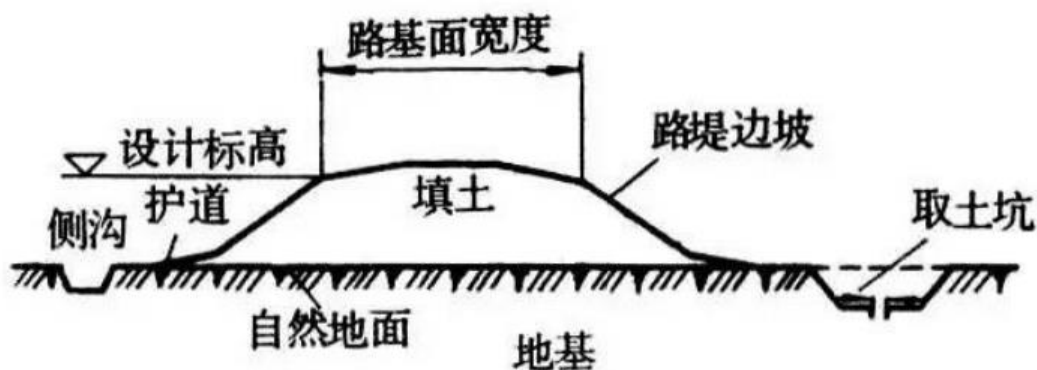


图 14 路堤示意图

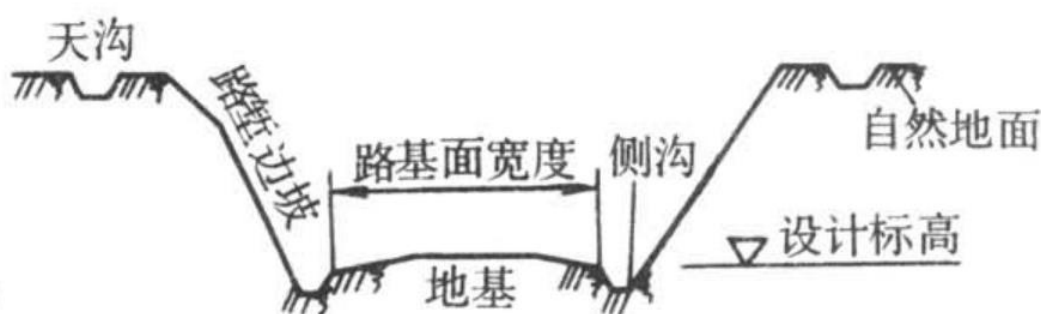


图 15 路堑示意图

公路边坡稳定性取决于自然山坡的稳定状况、地质条件（岩体结构、水文地质条件、风化程度等）和人为改造的程度。目前，高速公路边坡往往已被改造成人为工程设施，最初修建时已进行过严密的计算和设计，即已改变了自然坡体的应力状态和地下水的渗流条件并达到了较为稳定的状态。在修建光伏项目时，若随意改变现有条件，可能会发生失稳，甚至引发自然坡体的破坏灾害。另外，边坡一直处在各种自然条件的作用下，如阳光照射、降雨冲刷和下渗、风化和地震等，若处理不当，除了边坡自身状态的失稳，还易造成开挖暴露风化加剧、破坏植被地表水容易下渗等问题。因此，边坡修建光伏除了应充分考虑安全性及施工难度外，还应充分考虑路基边坡地质条件以及已有防护措施对水土的保护效果，同时考虑路段交通流量和交通事故持况，宜选择流量小、交通事故少的路段进行项目建设<sup>2</sup>。

<sup>2</sup> 山东市场监督管理局，《高速公路边坡光伏发电工程技术规范》，2022-06

需要注意的是，不同于路堤，高速公路处于路堑下方，若发生滑坡等自然灾害，滑落的光伏组件、滚落的砂石及泥土植被等对驾驶员安全是很大的威胁，宜选择路堤边坡进行项目建设。另外，还需充分考虑光资源利用率和眩光安全性，宜选择东西走向直线段向阳侧边坡和不产生眩光影响的曲线段向阳侧边坡进行工程建设<sup>3</sup>。若于路堑边坡修建光伏，光伏板的对光的反射也易影响驾驶员驾驶视线，发生交通事故的风险上升。

边坡光伏所发的电还应考虑消纳问题，建设自发自用、余电上网的边坡光伏发电工程，宜选择高速公路服务区、隧道、收费站等大用电量场景的临近路段边坡<sup>4</sup>。

### 项目案例——荣乌高速威海段

山东高速集团在荣乌高速威海段边坡光伏发电试验项目已成功并网，该项目是全国首个高速公路边坡光伏试验项目，总里程 2,290m，装机容量 2.01MW，预计年均发电量 201 万kWh，年节约标准煤 603 吨，年均减排二氧化碳 2,010 吨。

值得关注的是，该项目在建设中引入了重量轻、可折弯的柔性组件。在靠近文登服务区路段，采用的是轻质化PERC叠瓦组件重量 4.3kg/m<sup>2</sup>，仅为常规组件的 30%，大面积铺设时不会对边坡设计强度造成较大扰动。

同时，考虑到高速公路的路基一般由渣石土进行填充等因素，在本次建设项目中采用了大跨距高支柔性系统解决方案，使用的是预应力钢绞线作为主要材料，使立柱之间的跨距增大到 5.5 倍，是常规轻钢支架 3.2m间距的 1.7 倍，并且进一步优化钢索排布方向和固定方式，以及轻质组件布局间隙等，解决了边坡草皮减少导致的水土流失问题。

---

<sup>3</sup> 山东市场监督管理局，《高速公路边坡光伏发电工程技术规范》，2022-06

<sup>4</sup> 山东市场监督管理局，《高速公路边坡光伏发电工程技术规范》，2022-06



图 16 威海段光伏

昆明市地质情况多样,其中,土壤便有十二个土类、十九个亚类十六个土属、五十九个土种。昆明高速公路边坡条件多样,不可控自然因素时有发生,例如,2022年9月,高海高速出城距晖湾收费站约1公里处便发生了山体滑坡<sup>5</sup>。再以杨林隧道为例,隧道线路经过区域的工程地质条件总体上较好,但其土质条件多样,该区域历史上还曾发生过8级地震<sup>6</sup>。

---

<sup>5</sup> 云南网,《突发!山体滑坡,昆明这条高速临时交通管制!城区有淹水点断交》,2022-09

<sup>6</sup> 曾云川,严飞,《昆明绕城高速公路杨林隧道出口的边坡稳定性研究》,2014-08

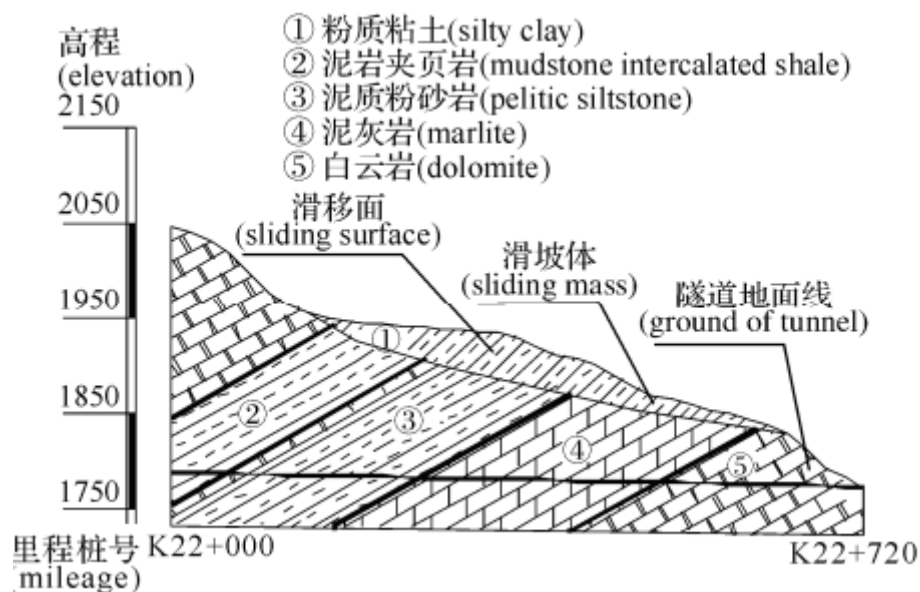


图 17 杨林隧道出口段工程地质剖面图<sup>7</sup>

因此，是否能在昆明市周边高速公路安装光伏组件，需要对具体路段进行现场调研与考察。

### 2.1.3 桥梁

可在桥梁两侧设置支架，安装光伏组件。



图 18 桥梁光伏

但是，若在高速公路桥梁两边安装，需要考虑光伏组件是否能够承受山间高速公路风级。根据国际电工委员会IEC61215的认证要求，光伏组件需满足2,400pa载荷测试，以应对户外12级台风下的极端天气。不过，即使组件产品的标准载荷能力测试中载荷对应的单位是Pa（帕斯卡，N/m<sup>2</sup>），即单位面积的受力，在现

<sup>7</sup> 曾云川；严飞，《昆明绕城高速公路杨林隧道出口的边坡稳定性研究》，2014-08



实情况下，即使是同样的风压，不同面积组件表面上受到的风力往往不在一个级别。面对大风等恶劣天气的侵扰，组件一旦发生问题，容易带来生命财产安全的损失。2023 年 2 月，江苏宿迁沭阳县一分布式光伏电站被大风刮倒，当日白天到夜间为东北风 4 到 5 级，阵风 6 到 7 级；2021 年 3 月，内蒙古出现大风和强沙尘天气，平均风力 8 到 9 级，最高风力达到 11 级，大风造成多个光伏电站受损<sup>8</sup>。高速公路桥梁多处于山间，风级往往高于城市。另外，高速桥梁往往离收费站、服务区等区域较远，桥梁边架设光伏后，如何消纳是一大问题，所以高速公路桥梁一般不适宜架设光伏组件。

#### 2.1.4 隧道遮阳棚

高速公路的建设持续向山区推进，隧道是高速公路建设中一种克服地形限制、缩短运营里程以及提高运输效率的方法。

隧道出入口段的交通事故发生率要远大于隧道中间段。隧道出入口之所以会成为高速公路上的事故多发地，很大一部分原因是“黑洞效应”与“白洞效应”所造成的。



图 19 隧道出入口“黑洞效应”与“白洞效应”

为了解决隧道出入口光环境的突变的问题，可在出入口处设置减光构筑物。目前，隧道建设工程中洞口减光构筑物主要有景观绿化减光、通透式棚洞及遮阳棚等形式。其中，遮阳棚由于具备减光均匀性好、对应用环境要求较低、能够减小恶劣天气对驾驶人行车安全影响等种种优点而被认为是隧道（群）出入口处的最佳减光措施之一<sup>9</sup>。遮阳棚会在钢拱骨架之间嵌入半透明的遮阳板来避免阳光直射隧道洞口路面从而降低洞口外的环境亮度，遮阳棚能使隧道出入口光照强度

<sup>8</sup> 世纪新能源网，《七级“大风”？组件全毁，又一屋顶电站被掀翻！》，2023-02

<sup>9</sup> 冯悦，《高速公路隧道（群）出入口光伏遮阳棚设计关键技术研究》，2022-04

连续且均匀变化，让驾驶员在行车过程中进行多次小幅光照变化适应，延长驾驶员在隧道洞口生理适应的时间和空间，提高行车安全性及驾驶舒适性。考虑到洞口通风及降低行车噪声，遮阳棚的两侧一般都会设置一定高度的镂空。除此之外，遮阳棚的顶部封闭结构让雨雪不能直接降落到棚内路面，再加上其半透光效果，由汽车行驶时轮胎带进棚内的雨雪会快速蒸发，不会出现外界路面干燥，棚内路面潮湿造成路面附着力突变导致车辆在高速行驶时打滑侧翻的情况。

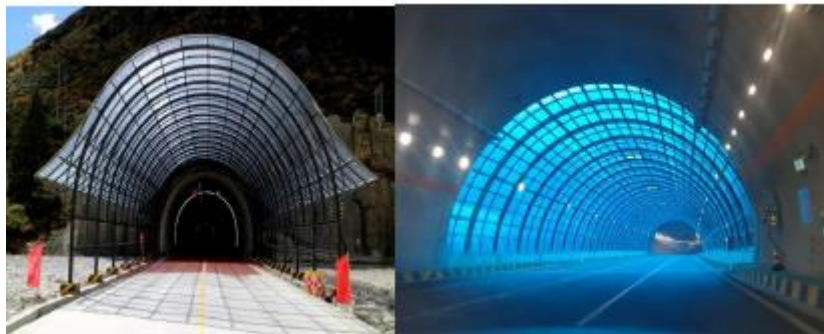


图 20 隧道遮阳棚

光伏遮阳棚是在一般遮阳棚的基础上加上太阳能光伏板。隧道照明及通风系统耗电量巨大，在隧道出入口遮阳棚上设置光伏发电系统可为隧道内机电设备供电，创造经济效益，降低高速公路的运营成本，也能够降低隧道用电对传统火力发电的依赖，降低污染物排放。

由于光伏遮阳棚主要用于缓和洞口处的照度突变，可应用于需设置加强照明的隧道出入口（若隧道本身条件无需加强照明，那么设置光伏遮阳棚的必要性不大）。所以，光伏遮阳棚的适用范围为<sup>10</sup>：隧道入口，长度大于 500m 的非光学长隧道及长度小于 300m 的光学长隧道<sup>11</sup>；隧道出口，曲线隧道或长度大于 300m 的直线隧道<sup>12</sup>。即是说，昆明地区可应用于高速隧道口光暗反差大，长度大于 500m 的非光学长隧道及长度小于 300m 的光学长隧道入口以及曲线隧道或长度大于

---

<sup>10</sup> 冯悦，《高速公路隧道（群）出入口光伏遮阳棚设计关键技术研究》，2022-04

<sup>11</sup> 光学长隧道是指驾驶员位于行车道中央(1.5m 高度)、距隧道行车进洞口一个照明停车视距处不能完全看到行车出洞口的、且几何长度不大于 500m 的短隧道。“光学长隧道”从实际长度上来看是短隧道，但是因为看不到出洞口，通视程度不高，从光学上来讲是长隧道。

<sup>12</sup> 隧道分类(按长度)，特长隧道:全长 10,000m 以上；长隧道:全长 3,000m 以上至 10,000m;中隧道:全长 500m 以上至 3,000 m;短隧道:全长 500m 及以下。

300m的直线隧道出口。例如，昆石高速公路阳宗隧道因距离长、灯光照明不稳定，容易引发道路交通事故并发生交通拥堵被称为“死亡隧道”，全长 3 公里，便可尝试在出入口安装光伏遮阳棚。

另外，为了保障隧道洞口的通风以及隧道内发生交通事故时方便消防救援，光伏遮阳棚的两侧应设置一定高度的镂空，遮阳棚两侧镂空最好应小于等于  $1.2\text{m}^{13}$ 。

### 2.1.5 闲置区域（绿地、互通圈、隧道前方空地等闲置区域）

高速公路上闲置空间较多，如环岛、互通区匝道与等闲置空地可用于安装光伏。



图 21 环岛光伏

#### 项目案例——惠州广河高速公路龙华互通分布式光伏发电示范项目

2022 年 12 月，惠州广河高速公路龙华互通分布式光伏发电示范项目正式并网发电，这是广东省首条高速公路匝道圈分布式光伏发电示范项目。惠州广河高速公路龙华互通 1,102.4kW 分布式光伏发电项目涉及龙华互通匝道圈内闲置公路两个地块，本次并网的地块 809kW 分布式光伏发电项目共安装 1,484 块 545kWp 光伏板、230kW 并网光伏逆变器 3 台及相关配套设备，项目发电采用自发自用、余电上网模式，项目预计平均每年可提供清洁电能 80.35 万 kWh。与相同发电量的火电相比，每年可节约标煤 264 吨，相应每年可减少多种大气污染物

---

<sup>13</sup> 冯悦，《高速公路隧道（群）出入口光伏遮阳棚设计关键技术研究》，2022-04

的排放，其中减少烟尘排放约 218 吨，二氧化碳约 801 吨，二氧化硫约 24 吨，氮氧化物约 12 吨。

高速闲置区域光伏建设主要以一定的面积空地建设场景为主，应用条件更多考虑如气候、朝向、遮挡物等环境因素。高速闲置区域场景并无太多应用限制条件，更多取决于当地日照条件是否满足光伏建设要求，而通过以上案例可以看到，广东等属于第四类资源区，尽管太阳能资源较差，但其项目运行效率良好，云南属于第三类资源区，拥有更佳的前置条件，所以云南高速公路闲置区域分布式光伏项目建设更具优势。

### 2.1.6 昆明场景应用可行性

综上所述，“光伏+高速公路”模式场景应用较多，目前，限制条件较少且技术较为成熟的服务区、隧道遮阳棚、闲置区域等场景在昆明可以应用，但昆明周边高速公路情况较为多样，边坡等场景则需根据具体项目的综合条件进行进一步判断是否可行，而桥梁等场景则因安全性以及经济效益等问题，并不太适用。

## 2.2 机场

2019 年，中国民用航空局发布了《民用机场智慧能源管理系统建设指南》，其中提到在太阳能资源充足的地区，机场建筑屋面等位置宜设置光伏发电系统。目前，我国部分机场已建有太阳能光伏系统，但是其在机场的应用远未达到饱和我国现阶段仍然没有将光伏发电系统应用于机场的通用指南，机场在建设光伏电站时缺乏建设依据和相关标准，使得光伏电站在机场的大面积应用仍面临较大困难。

表 7 机场分布式光伏部分项目一览<sup>14</sup>

序号	项目名称	项目规模 (MW)	并网时间	建设区域
1	北京大兴机场	5.61	2019.09	货运区屋顶、东跑道外围栏外闲置区域、公务机区屋顶
2	上海虹桥机场西货运区光伏发电	3.456	2014.02	货运站金属屋面

<sup>14</sup> 北极星太阳能光伏网，<https://guangfu.bjx.com.cn/>

	项目			
3	上海浦东机场分布式光伏项目	1.70	2014.06	主要位于浦东机场 P1、P2 停车场 屋顶
4	北京首都机场 GTC 停车楼 光伏发电项目	0.464	2016.09	GTC 停车楼屋顶采光带上
5	深圳宝安国际机场光伏项目一期	10.00	2013.10	机场保税物流园区和航空物流园区
6	深圳宝安国际机场光伏项目二期	10.00	2015	新货运站 (B1、B3) 顶部, 并在 机场能源中心停车区建设光伏车棚
7	新疆库尔勒机场光伏电站项目	0.02	2013	闲置屋顶和地面
8	新疆吐鲁番机场光伏项目	0.15	2014.12	闲置屋顶和地面
9	安徽合肥新桥机场分布式 光伏发电项目	0.40	2015.05	机场内航食楼
10	杭州萧山国际机场货站屋面分布 式光伏发电项目	2.30	2016.06	货站屋顶
11	江西宜春明月山机场分布式光伏 发电示范项目	0.14	2016.08	屋顶
12	河北石家庄正定国际机场 光伏项目	7.40	2016 年 底	停车场、货库屋顶
13	厦门新机场项目	-	2022-01 开工	航站楼屋面采用光伏建筑一体化的 做法

其次, 光伏建设是否会对机场的安全性造成影响是最重要的考量因素, 例如对管制员与飞行员产生的眩光影响、对无线电系统的电磁干扰、对净空产生的影响等问题, 这使得民航管理机构对该技术的审查和批准变得更加复杂。除去前文所述的日照条件、朝向等环境要求以及建筑设计要求外, 机场光伏还需要考虑以下条件:

### (1) 对电磁环境影响

光伏发电在将直流电能转化为与电网电压同频同相的交流电能过程中, 并网逆变器可能会产生电磁干扰, 影响航空无线电台(站)运行, 进而影响航空安全。因此, 光伏发电设施需结合机场各无线电台(站)的位置及其电磁环境要求、光



伏逆变器位置及其辐射电磁波情况等进行分析。

### **(2) 对场面运行影响**

机场跑道、滑行道及其周边范围，属于飞机起降和滑行的敏感区域，为保障飞行安全，对场地平整度、强度等均有严格要求<sup>15</sup>。因此，设置光伏发电设施需结合机场内飞行区场面运行相关标准规范及机场运营单位的需求等进行综合分析。

### **(3) 对净空限制影响**

为了保障机场安全运行，在机场区域内有各种障碍物限制面，用以限制机场及其周围地区障碍物的高度。而光伏组件安装后可能会突破障碍物限制面，进而影响机场运行安全，需在机场现场进行勘测考虑。

### **(4) 光污染影响**

由于光伏组件具有反光特性，太阳光经光伏电池板反光后可能影响空中飞行员和地面塔台管制人员，进而影响飞行安全。因此，针对光污染的影响，需结合进离场航线、塔台位置、塔台明室高度、光伏板位置及安装角度等进行综合分析。

### **项目案例——上海虹桥机场分布式光伏项目**

上海虹桥机场光伏电站项目位于京沪高铁上海虹桥铁路枢纽站两侧雨篷之上，上海虹桥机场周边，于 2010 年 7 月 18 日正式并网发电。共计安装了 23,910 块太阳能电池板，利用屋面面积 6.1 万 m<sup>2</sup>，装机容量 6,688kW，年均发电可达 630 万 kWh，每年发电可供 12,000 户居民使用一年。此项目每年可以减排二氧化碳 6,600 多吨，节约标煤 2,254 吨，其经济效益和节能减排作用十分明显。考虑到光伏组件反光影响，上海空间电源研究所对该项目的光伏组件进行了镜面反射和漫反射检测，经过测试太阳能电池板的反射率最大值在 380nm 处，大小为 8.9%，低于玻璃幕墙和彩钢板，并且远离跑道区域，不会对飞行安全造成影响。

---

<sup>15</sup> 民用机场飞行区技术标准（MH5001-2021），2021-09



图 22 上海虹桥机场光伏电站

由上文项目列表及虹桥机场案例可以看出，出于安全角度考虑，机场传统的光伏应用往往选择远离飞行区或航道的位置，如货运楼、远离飞行区的空地等，以求最大限度减少对机场运行的影响。

然而北京大兴机场不仅在货运区、东跑道、公务机区 3 个区域建设了分布式光伏发电系统，还在飞行区北一跑道建设了中国首个民航系统跑道周边的光伏系统。大兴机场所安装的 5.61MW 的光伏电站，并网运营后，每年可向电网提供 610 万 kWh 的绿色电力，相当于每年节约 1,900 吨标准煤，减排 966 吨二氧化碳，减少排放 14.5 吨二氧化硫，并同步减少各类大气污染物的排放。其采用了华为分布式智能光伏解决方案，逆变器电磁辐射小，不影响机场设备正常使用，完全满足机场要求。<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> 华为官网，《全球最大空港北京大兴机场采用华为智能光伏》，

<https://solar.huawei.com/cn/news/Huawei-FusionSolar-is-used-in-Beijing-Daxing-Airport>, 2019-09



图 23 大兴机场跑道周边铺设光伏效果图（局部）

综上，可以看到光伏建设对于机场的安全性影响是有限的。上述项目案例经验值得借鉴，可以将光伏发电系统安装在这些远离机场跑道的航站楼屋顶、货运站屋顶、停车场屋顶和远离飞行区的空地等场景。昆明长水国际机场航站楼面积为 54.83 万  $\text{m}^2$ ，单体建筑面积超过首都国际机场 T3 航站楼，提供站坪机位 84 个，其中近机位 68 个，3.5 万  $\text{m}^2$  的货运站，1.4 万  $\text{m}^2$  的航空配餐设施、配套建设供电、供水、供热、供冷、燃气、污水污物处理设施等。其潜在可利用的屋顶和远离飞行区的闲置空地是建设分布式光伏的潜力场景。

## 2.3 轨道交通

### 2.3.1 光伏发电在轨道交通中的应用价值

#### “光伏+高铁”

在国内，轨道交通中应用太阳能的主要方式是将太阳能电池板安装在高架车站（最多）、车辆段停车场（其次）、高架区间、地下站出入口集散地等，为车站提供照明和一般机电负荷供电，如今比较典型的例子有，在上海虹桥火车站、北京丰台高铁站、雄安高铁站等已经建立了并网光伏发电系统。

#### “光伏+地铁”

地铁本身是一种绿色低碳环保的交通工具，肩负着“减碳”的重任。城市轨道交通作为城市交通的重要组成部分，电力消耗巨大，且城市轨道交通建筑类型多样，车辆基地和车站建筑等均具备分布式光伏发电的良好条件。因此，利用光伏



发电进行用电替代，对满足节能需求、减少碳排放，实现城市轨道交通绿色低碳发展具有重要意义。

轨道交通的繁忙意味着巨大的电力消耗，轨道交通的繁忙同样随着近年来光伏度电成本的降低，“光伏+地铁”的绝妙搭配开始在一些一线城市涌现。当光伏遇上地铁，不仅可以解决碳排放的问题，还能给车站基础设施送去绿色电力，可谓是一举两得。

### “光伏+轨交”的经济价值

以现在的市场行情来看，目前光伏板的生产成本已经大幅下降，而且呈逐年递减的趋势，我国已经取消了相关补贴政策。根据目前市场行情 1MW 屋顶分布式光伏发电并网发电成本在 330 万元-430 万元之间，在国家政策支持下，银行贷款比例可达到 75%，有相应的税收和利率优惠。由于轨道交通用电量大会所发电能全部自用，1MW 发电站年节约电费约 50 万元，估算约 7-9 年即可收回成本。按照目前光伏发电系统使用周期为 25 年计算，在光伏使用全生命周期内，1MW 装机容量可以带来 750 万元-850 万元的收益。每条地铁线路至少可以达到 6MW 的装机容量年节约电费至少 300 万元，并且在未来随着光伏发电技术的科技进步收益也会越来越多。所以，太阳能光伏发电系统在轨道交通中的使用会带来巨大的经济效益及社会价值<sup>17</sup>。

<sup>18</sup>“碳达峰”和“碳中和”目标赋能可再生能源发展新需求的宏观环境下，城市轨道交通建筑具有应用光伏发电的良好条件，随着城市轨道交通规模的日益扩张，光伏利用越来越广泛，节能减碳效益可观。国内城市轨道交通建筑多通过在屋顶安装光伏组件进行发电，采用“自发自用，余电上网”的运行模式，后续可探索光伏建筑一体化、光伏光热建筑一体化、基于光伏发电的车辆基地直流微电网等新技术在城市轨道交通建筑中应用可行性，进一步提升光伏利用效率，促进城市轨道交通建筑的低碳化、绿色化发展。

---

<sup>17</sup> 张晔，《分布式光伏电站系统在城市轨道交通中的应用分析[J].科技创新与应用》，2017（17）  
<https://www.fx361.com/page/2021/1110/9409412.shtml>

<sup>18</sup> 马岫，《论分布式光伏电站技术在轨道交通屋顶资源中的应用》，2021-11-10  
<https://www.fx361.com/page/2021/1110/9409412.shtml>

### 2.3.2 光伏发电系统在轨道交通中的应用条件

城市轨道交通建筑分为车站建筑和车辆基地建筑。车站包括地下车站、地面车站和高架车站，因高架车站一般架空设置于城市道路上，车站主体结构和附属结构位于室外，建筑物屋顶及侧立面面积大，适用于光伏发电。车辆基地内建筑物类型多样，屋顶面积大，光伏发电可利用的建筑面积大；另一方面，周围高层建筑物少，光伏组件被遮挡的可能性小，从而为光伏发电提供良好条件。

<sup>19</sup>地铁拥有占地面积大，规模大，建筑群集中，用电负荷稳定等特点，所以应用光伏发电系统是具备可行性条件的，光伏发电系统技术应用的条件如下：

（1）太阳能光伏发电系统由于自身的发电特点，在安装过程中需要对周边的环境和日照条件等因素进行调研。具体的，地铁所在地日照是否充足，年日照时间长短，组件和建筑单体是否可以结合，是否满足安装、清洁、维护的要求，车辆段、高架车站屋顶面积的大小，是否合适安装太阳能光伏发电装置；

（2）光伏发电系统需要兼顾总功率和稳定性两个方面。在光伏发电系统的设计过程中，不仅需要考虑其日常运行的固定工作时间，还要考虑其使用的峰值和最大载荷量，以及最大电流的流通量等因素；

（3）在没有光照或者光照很弱的阴雨雾霾天气，还要考虑系统连续工作的最大天数，在设计中考虑以上的因素，才能保证太阳能光伏发电系统能够发挥最大的使用效率。

下图介绍了隆基助力地铁轨交的一些光伏方案。

---

<sup>19</sup> 张晔，龙源期刊网，《科技创新与应用》，2017年第17期



图 24 隆基光伏助力地铁轨交



图 25 隆基光伏+地铁解决方案

### 2.3.3 光伏安装地铁车辆段经济效益估算

若按照车体长度按照 19m（扣除两端空调、水箱等设备）计算，太阳能电池选择无锡尚德的多晶硅电池，尺寸为 156mm×156mm，单片电压 0.5V，功率 4.4W。光伏发电系统电压范围最终确定为 100-135V，总发电功率按照 6,000W 计算，多晶硅光伏电池价格约为 3-4 元/W，则 1 辆客车光伏电池的成本投入最高约为 38,016 元；按每年有效晴天数为 250 天计算，则 1 辆客车每年节约电能 6,300-8,400kWh；光伏电池寿命为 25-30 年，则每辆客车在 30 年的设计周期内可节约用电 18,900-25,200kWh；考虑光伏电池寿命终结时还可再回收利用，由此算出每辆客车因增设光伏发电系统而增加的成本约 4.8 至 6.4 万元，而其使用期可节约的电费将近 12 至 16 万元。

## 项目案例——“光伏+高铁”

近年，国内很多高铁站配置了光伏发电项目，通过将光伏板铺装在高铁路站屋顶，将太阳能转化为电能，为高铁站的日常运营提供清洁能源，并实现“自发自用，余量上网”的功能。目前，“光伏+高铁”模式正在全国各地快速落地推进，这是我国积极应对气候变化、推动新能源发展的举措。

### 北京丰台站屋顶光伏项目

北京丰台站屋顶光伏项目为全部采用 DeepBlue 3.0 的站房屋顶 5.9MW 分布式光伏项目，将为站内照明、取暖、制冷、通风、客运电梯及冷库等提供绿色电力，总发电量约 1.76 亿 kWh，年发绿电 700 多万 kWh。在节能减排方面，项目总计减排二氧化碳 16.5 万吨，二氧化硫 5,160 吨，氮氧化物 2,580 吨，可为丰台站减少二氧化碳排放。

北京丰台高铁站屋顶光伏发电项目是全国一流的示范性铁路分布式能源项目，“光伏+高铁”模式未来将有望推广至北京其他既有火车站，通过项目改造（BAPV 模式），帮助其实现低碳目标，为首都绿色发展和节能减排贡献力量。



图 26 北京丰台站屋顶光伏项目

### 雄安高铁站屋顶光伏项目

<sup>20</sup>2020 年 12 月 25 日，京雄城际铁路雄安站房屋顶分布式光伏发电项目正

---

<sup>20</sup> 彭拜新闻，《雄安高铁站光伏项目实现双双“破百”》，2021-04-05

[https://m.thepaper.cn/baijiahao\\_12059756](https://m.thepaper.cn/baijiahao_12059756)



式并网发电。雄安站光伏发电项目采用“自发自用、余电上网”模式，总装机容量 6MW，每年可为雄安站提供 580 万 kWh 清洁电能，可减少燃煤消耗 1,800 吨，减少二氧化碳排放 4,500 吨，相当于植树 12 公顷。除此之外，项目还装配了有机融合城市智慧能源管控系统、智慧能源等多重创新元素，可以实现光伏发电系统的综合监测、智慧调控、分析决策等功能。

雄安站光伏发电项目日最高发电量 1.7 万 kWh，所发电力基本实现就地消纳，主要用于雄安高铁站内空调、风机、照明、电梯等用电设备运行电力需求。

雄安高铁站站顶安装了一共约 4.2 万 m<sup>2</sup> 的光伏板，超过 1.77 万块多晶硅光伏板将太阳能转化成绿色电能，与建筑设计相辅相成，提供的电力将驱动着高铁站内电梯、风机等设备运行，为雄安高铁站源源不断注入清洁电能。



图 27 雄安高铁站光伏项目

### 项目案例——“光伏+地铁”

#### 上海地铁：龙阳路基地光伏项目

利用太阳光能为地铁提供清洁无污染的绿色电力，是上海地铁近年来贯彻执行高标准的“绿色轨道交通”理念的重要一环。

上海浦东地铁龙阳路基地承担着地铁 2 号线和 7 号线保障服务，每天有大量的地铁列车都在这里出库入库。但鲜为人知的是，这里还隐藏着一座光伏“发电厂”，在车站屋顶，安装了相当于五六个足球场大小的地方几乎铺满了太阳能板，大大的 M 字样光伏板嵌套着绿色草坪分外显眼，metro 代表着地铁，绿色象征着环保。

<sup>21</sup>该地铁基地的装机容量达到了 6.56MW，年发电量约为 670 万 kWh，主

---

<sup>21</sup> 诚康新能源（中国）官网，《“绿色轨道交通”地铁车库屋顶分布式光伏项目》，2022-2-17，

要为上海地铁 14 号线检修、基地运营提供绿色电能，也体现了上海地铁 14 号线作为我国首条全线以绿色三星级标准进行设计和建设的轨道交通线路，将绿色理念贯穿了从规划设计到运营维护的全过程、全周期。该项目是上海地铁川沙、封浜和九亭基地的武定分布式光伏项目中装机量最大的一个，3 个项目装机总量 12.4MW，正式投运后，预计年发电量可以达到 1,170 万 kWh，年均节约标煤约 3,370 吨，年均减排二氧化碳 9,220 吨，节能减排效果明显。



图 28 上海地铁龙阳路基地光伏项目

#### 2.3.4 “光伏+轨交”场景在昆明的应用可行性

高铁可应用场景：昆明站、昆明南站高架站屋顶顶部。

昆明站、昆明南站车站屋顶满足以下条件：车站顶棚屋顶面积满足光伏系统安装要求，屋顶支架足以支撑承重需求，屋顶周边没有遮蔽物，昆明的天气状况良好，光照时间充足，适合采用 BAPV 模式安装光伏发电系统，一般情况下，可以满足“自发自用，余量上网”的模式。

地铁可应用场景：昆明地铁 2 号线、6 号线车辆段顶棚，昆明地铁 2 号线、6 号线部分车站顶棚（2 号线星耀路站、饵季路站等，6 号线大板桥站等），昆明地铁基地建筑顶部，以上场景适合采用 BAPV 模式安装光伏发电系统。

未来，无论是新建高铁车站或是地铁轨交项目，在规划过程中可以考虑采用 BIPV 模式加入光伏发电系统进行配套设计施工，从而可以最大限度地提升分布式光伏在轨交项目中的应用效能。

特别的，“光伏+地铁车辆段”的应用条件有以下限制要求<sup>22</sup>：1、气象条件：地铁车辆段所在地需要日照充足，日照系数高，年日照时间长，一年中太阳能有效利用时间长，季节的总辐射量差异不大，则该城市地铁车辆段适合设置光伏发电系统；2、环境条件：光伏发电系统设置应综合考虑车辆段周边环境，组件的布置需要避开或者远离遮荫物。光伏组件的设计应与车辆段建筑单体相结合，综合考虑发电效率、发电量、结构安全，并与建筑物屋顶形式相协调，满足安装、清洁、维护的要求。

在光照要求方面，云南属于第三类资源区，昆明的光照时间、天气条件都非常符合“光伏+轨交”模式的场景应用条件的要求。

城市轨道交通作为现代化的交通工具，行业发展迅速，是未来的轨道交通主力，同时也带来了巨大的能源消耗，而太阳能光伏发电技术的诞生和发展无疑为地铁提供了新的科技力量和动力，可以大大降低城市轨道交通的运营成本，在一定程度上减少了碳排放量，为城市的绿色发展提供新的助力。

---

<sup>22</sup> 张国祥，《论光伏发电技术在地铁车辆段中的应用》，2018-9-22，  
<https://www.fx361.com/page/2018/0922/8295433.shtml>

## 三、城市分布式光伏运用场景

### 3.1 城区建筑物屋顶分布式光伏

应国家能源局印发的《关于公布整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点名单的通知》中所提及的相关要求，在昆明市宜良县、富明县、石林县三个地区开展光伏试点，为切实保障试点地区光伏项目的推进，云南省能源局于 2021 年 9 月印发了《云南省整县（市、区）屋顶分布式光伏试点工作推进方案》。

#### 3.1.1 城市住宅、工商业屋顶分布式光伏

云南省城区屋顶光伏发展工程<sup>23</sup>：率先在机关事业单位、城市公共建筑等屋顶建设光伏发电系统，推动城市连片商品住宅小区、搬迁安置住宅小区、商业建筑建设屋顶光伏发电系统。2021 年 12 月—2023 年 10 月，试点县党政机关建筑屋顶总面积安装光伏比例不低于 50%；医院、学校、村委会建筑屋顶总面积安装光伏比例不低于 40%；城市住宅小区建筑屋顶总面积安装比例不低于 20%；商业集群屋顶安装光伏比例不低于 30%。

在开展城区屋顶光伏建设时需要考量气候因素、遮挡物状况等环境条件，以及与建筑屋顶相关的屋面载荷、屋面防水、屋顶使用年限等因素。

表 8 城区屋顶光伏建设主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
环境条件	气候因素	光照时间长、降雨量偏少，太阳辐射总量大的地区适宜安装光伏。	昆明市太阳能资源等级分类划入三类地区，全年辐射总量在 5,016-5,852MJ/m <sup>2</sup> ，日平均日照峰值时间在 3.8-4.45 小时 (备注：1kWh/m <sup>2</sup> =3.6MJ/m <sup>2</sup> )，日照条件相对较好。
	遮挡物状况	树木、电线杆、女儿墙等外在障碍物会影响太阳辐射总量，阴影遮挡对光伏发电	需选取遮挡物较少或无遮挡物的屋顶开展光伏建设，屋顶可利用面积远小于实

<sup>23</sup> 《云南省整县（市、区）屋顶分布式光伏试点工作推进方案》所提及的重点工程。



		电系统的发电效率具有加大影响。	际面积。
建 筑 条 件	屋面荷载 (各类型荷载)	分为永久荷载（光伏组件与零配件的自重）与可变荷载（雪、风、积灰荷载）。	居民屋顶、工商业屋顶多为混凝土屋顶，前期开展荷载考量，选取合适的屋顶开展光伏建设。屋面荷载要求：水泥屋顶 $\geq 2\text{KN/m}^2$ <sup>24</sup> 。
	屋面防水 <sup>25</sup>	屋顶分布式光伏电站倚靠屋面作为结构基础,如果屋面无防水保障,轻者光伏设备锈蚀,屋面渗水漏水,重者可能面临整个屋面结构损坏的情况。一般建筑的防水等级为屋面Ⅲ级防水,其防水层合理使用年限仅为 10 年。	在进行光伏铺设的时候应该考虑屋顶的防水年限，在防水年限低于 25 年时应该做必要的防水层加固 <sup>26</sup> ，避免后期的卸装组件、屋面翻修回塑。
	屋面排水	不影响屋顶排水功能。主要是针对在既有屋顶上安装光伏板。	在设置屋顶构架时，需要充分考虑屋顶的排水系统。
	房屋可使用年限	尽量选取新建房屋和建设年限较短的房屋，减少因房屋维修导致的光伏电站运营成本的增加。	混凝土屋顶的使用年限较长，一般情况下能保证光伏 25 年的运营期，选取时需要考量房屋未来的使用年限是否高于 25 年。
	对周围建筑物	建筑物上安装的光伏发电系统，不得降低相邻建筑物的日照标准。	安装时需要选取合适的安装高度与区域，避免对周围建筑物的光照产生影响。
	建筑结构与电气	在既有建筑物上增设光伏发电系统，必须进行建筑物结构和电气的安全复核，并应满足建筑结构及电气的安全性要	不能破坏既有建筑物结构，同时也要保证电气安全。

<sup>24</sup> 中华人民共和国住房和城乡建设部，《建筑结构荷载规范》（GB50009-2012），2012-5-28

<sup>25</sup> 魏斌，《别让防水成为屋顶光伏电站的软肋》，中国建材报/第 010 版，2022-4-25

<sup>26</sup> 中华人民共和国住房和城乡建设部，《屋面工程技术规范》（GB 50345-2012），2012-5-28，建筑类型分为四个层级，特别重要或对防水有特殊要求的、重要的建和高层建筑、一般的建筑、非永久性的建筑，防水层合理使用年限分别为：25 年、15 年、10 年、5 年。

		求。	
	与屋面的间隔	平屋顶安装光伏组件时，最低点距离屋顶平面不得小于 0.3m，通风与防止雨水溅起；坡面屋顶，顺坡架空安装的光伏组件与屋面的垂直距离不得应小于 0.1m。	安装时注意与屋顶的间隔，保证一定的高度，以达到良好的通风与防污性能。
	高度限制	建筑为平屋面屋顶结构时，光伏组件安装最高点与顶屋屋面（不包括女儿墙、楼梯间）距离不得超过 1.5m，建筑为坡屋面屋顶结构时，光伏组件应与顺坡安装，不得超出屋面外沿，不应超过该安装屋面的最高点，组件方阵表面与安装屋面的垂直高度不得超过 30cm。（昆明市暂无相关规范文件，高度限制参考曲靖市经开区）	在既定高度限制范围内安装光伏组件，保证必要的安全性。
	屋顶朝向	朝向对光伏组件的发电量有着非常重要的影响，光伏组件的朝向决定了其能否充分地吸收太阳能。	昆明市地处北半球，一般来说，光伏朝向为朝南时，太阳光线照射角度最佳，能够充分地照射到光伏组件上，从而产生更多的电能，光伏组件发电量较高。若是斜面屋顶尽量选择偏南朝向屋顶搭建光伏。针对平面屋顶，应最大化满足组件的南向安装。
	屋顶斜率 (斜面屋顶)	斜面的屋顶(包括彩色钢板屋顶和瓦屋顶)不需要铺支架，而是在安装时根据当前屋顶的倾斜角度来铺设。	昆明市的最佳安装角度为 25°，此时发电效率最大。如果屋顶太过于陡峭，一方面影响安装施工的难度，造成安装人员的安全隐患。
	阵列间距 <sup>27</sup>	布置光伏阵列各排、列的间距时，应保	按照要求进行计算与分析混凝土屋面光

<sup>27</sup>中华人民共和国住房和城乡建设部，《光伏发电站设计规范》（GB 50797—2012），2012-6-28

		证每天 9:00 至 15:00 (当地真太阳时) 时太阳能电池阵列不被遮挡。	伏阵列间距距离; 彩钢瓦屋面光伏阵列因采用平铺方式, 没有阵列间距距离要求。
	房屋产权	建设户用光伏电站需要对屋顶拥有独立使用权。有独立屋顶的别墅居民安装起来相对方便。多层或者高层以上住宅的公用区域楼顶屋顶, 整栋楼业主共同拥有使用权, 要想在上面建设电站, 需要获得整栋楼业主的同意, 否则即使安装完毕, 电网公司也不允许并网。	需要厘清屋顶产权, 选择产权清晰的屋顶搭建分布式光伏。
	美观要求	光伏组件应按集中优先、整齐对称、色调和谐、美观统一的原则进行布置。入口、重要集散广场及景观节点等区域的家庭屋顶加装光伏发电系统时, 应严控安装形式与色调。	保证安装的美观性要求。
	用电负荷特性	按照商厦、写字楼、酒店、会议中心、度假村等服务业的特点, 用户负荷特性一般表现为白天较高, 夜间较低, 能够较好的匹配光伏发电特性。	可优先在商厦、写字楼等有较好的用电场景的区域开展光伏建设。

### 项目案例——昆明市级行政中心屋顶分布式光伏项目

该项目装机容量 1.45MW, 分布于市级行政中心 12 栋建筑物屋顶, 占用屋顶面积共 6,630m<sup>2</sup>, 总投资 913.94 万元。2022 年 7 月, 实现全部并网发电, 年均发电量 186.5 万 kWh, 每年相当于节约标煤 644 吨、减少碳粉尘排放量 503 吨、减少二氧化碳排放量 1,561 吨。项目按照“自发自用、余电上网、就近消纳、电网调节”的运行方式开展建设。加之利用行政中心闲置屋顶开展分布式光伏发电系统应用, 在满足机关用电的同时, 剩余电量还能上网售电。根据对行政中心每栋楼用电量与发电量分析, 工作日光伏发电量可全额消纳, 休息日仅有少部分楼宇存在余电上网情况。经测算, 行政中心全年可消纳光伏发电量 177.02 万 kWh, 自用电量占发电总量 95%。

## 昆明场景应用可行性

根据昆明市城区屋顶光伏发展工程的要求，对试点区域各类型屋顶类型的光伏安装比例做了强制性规划，为屋顶分布式光伏建设提供了政策支持与强制性推动力。其次，根据城区屋顶分布式光伏建设的主要考虑条件来看，昆明市具有较好的太阳能资源，且建筑条件中需要考虑的屋顶使用年限、屋顶载荷、屋顶产权等皆可根据现实状况进行选取，在众多屋顶中选择合适、安装价值高的屋顶先行开展光伏建设，屋顶防水排水、光伏支架选取、光伏安装高度、与屋顶的间隔、建筑电气安全、美观要求等因素为技术性要求，可以参照相关规范开展建设，也可根据现实状况进行优化以达到光伏安装条件。当前，昆明市已经在宜良县、富民县、石林县三个地区开展整县屋顶分布式光伏建设，且都完成了一期项目的建设，为光伏建设提供了案例借鉴。综合来看，城区屋顶光伏的建设具有较强的可行性，需基于现阶段发展状况持续推进。

### 3.1.2 工业园区屋顶分布式光伏

工业园区屋顶分布式光伏主要是以工业厂房屋顶为载体建设和运营光伏发电设施。根据国家要求，鼓励各类电力用户按照“自发自用，余量上网，电网调节”的方式建设分布式光伏发电系统。

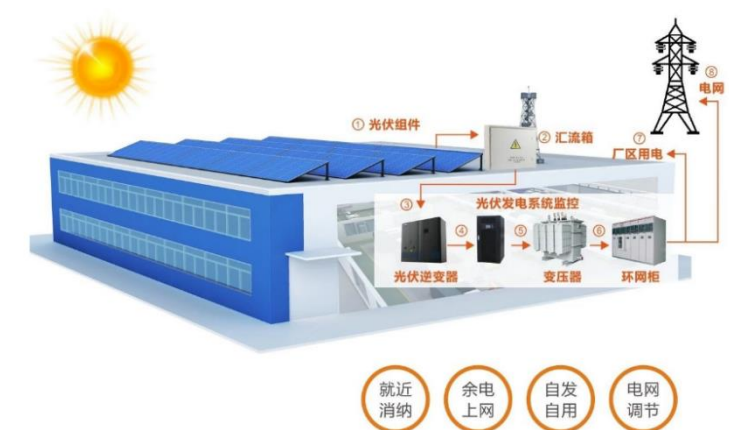


图 29 园区屋顶光伏建设示意图<sup>28</sup>

<sup>28</sup> 零能耗与零碳建筑，《工商业屋顶装光伏的好处居然这么多？》，2022-11-6，  
<https://mp.weixin.qq.com/s/jEJlcahzYgkZFR4ylI49LA>

云南省园区屋顶光伏发展工程<sup>29</sup>：在各经济开发区、工业园区、工商业厂房等全面实施屋顶分布式光伏发电项目。2021 年 12 月—2023 年 10 月，试点县工商业屋顶安装光伏比例不低于 30%。

在开展工业园区屋顶光伏建设时需要考量气候因素、遮挡物状况等环境条件，以及与建筑屋顶相关的屋面载荷、屋面防水、屋顶使用年限等因素，部分因素与城区屋顶光伏建设要求相似。但还需考虑大量粉尘、腐蚀性气体对光伏搭建的影响。

表 9 城区屋顶光伏建设主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
环境 条件	气候因素、遮挡物状况	同表 8	
	环境敏感性	工业园区企业排放粉尘附着在光伏组件表面，影响光伏组件表面透光率，对光伏组件发电效率影响较大。	可选取屋面或周边不存在大量粉尘、腐蚀性气体的，不属于火灾危险性分类为甲类、乙类的建筑物搭建光伏设施。
建筑 条件	屋面荷载 (各类型荷载)	分为永久荷载（光伏组件与零配件的自重）与可变荷载（雪、风、积灰荷载）。	工业园区厂房在设计在建设时，通常未考虑增加其它附着物的情况。若有必要，需对厂房进行加固。进行前期荷载考量，选取合适的屋顶开展光伏建设。屋面荷载要求：水泥屋顶 $\geq 2\text{KN}/\text{m}^2$ ，彩钢瓦 $0.5\text{KN}/\text{m}^2$ <sup>30</sup> 。
	屋面防水 (水泥混凝土、彩钢瓦)	不破坏屋顶防水功能。	工业园区厂房以彩钢瓦房屋面较多。彩钢瓦屋面由于其相对简易的结构形式决定了该类屋面自身防水能力较差，容易出现漏水问题。需要选取合适的安装形式。

<sup>29</sup> 《云南省整县（市、区）屋顶分布式光伏试点工作推进方案》所提及的重点工程。

<sup>30</sup> 中华人民共和国住房和城乡建设部，《建筑结构荷载规范》（GB50009-2012），2012-5-28

	屋面排水、房屋可使用年限、对周围建筑物的影响、 建筑结构与电气安全	同表 8	
其他 条件	与屋面的间隔、屋顶朝向、 屋顶斜率、高度限制	同表 8	
	房屋产权	考察建筑物产权是否独立清晰 (房产证、土地证建设规划许可证原件)，房屋产权是否质押。	工业园区厂房通常具有产权集中， 选择产权明晰的建筑屋顶开展光伏建设。
	用电情况 <sup>31</sup>	根据电费结算单、负荷曲线，用电负荷和用电时间，从而判断光伏自发自用比例。	光伏自发自用比例，比例越高收益越好。

### 项目案例——云南钛业股份有限公司屋顶分布式光伏发电项目<sup>32</sup>

该项目在云南钛业股份有限公司 4.61 万 m<sup>2</sup> 的钛材厂房、标准化厂房屋顶铺设光伏板，通过光伏发电实现“自发自用、余电上网”。该项目光伏系统装机容量 5.42MW，25 年可发绿电总量 15,727.7 万 kWh，年平均可提供清洁电能 629.11 万 kWh，其中 68.46% 的发电量能在云南钛业公司厂区就地消纳。项目建成后，每年可节约标煤 1,918.2 吨，减少温室效应气体二氧化碳排放 4,130.3 吨，减少二氧化硫排放 1.01 吨，减少氮氧化物排放 1.13 吨，具有显著的经济效益及社会效益。

### 昆明场景应用可行性

根据工业园区屋顶光伏发展工程的要求，对试点区域屋顶光伏安装比例做了强制性规划，为屋顶分布式光伏建设提供了政策支持与强制性推动力。其次，根据工业园区屋顶分布式光伏建设的主要考虑条件来看，昆明市具有较好的太阳能资源，且建筑条件中考虑屋顶使用年限、屋顶载荷、屋顶产权、环境敏感性分析状况（粉尘、腐蚀性气体）等皆可根据现实状况进行选取。选择合适、安装价值

<sup>31</sup> 云南省绿色能源行业协会，《[产业动态]分布式光伏项目开发流程》，2023-02-28，

<https://mp.weixin.qq.com/s/bX-cjqU9Ikt9WVKOQg7hSA>

<sup>32</sup> 楚丰头条，《云南钛业“屋顶分布式光伏项目启动会”顺利召开》，2023-01-20，

<https://mp.weixin.qq.com/s/AhM9vb0SAopfghXqUm6QBQ>

高的屋顶开展光伏建设，屋顶防水排水、光伏支架选取、光伏安装高度、与屋顶的间隔、建筑电气安全、美观要求等因素为技术性要求，可以较好解决。当然，园区是分布式光伏最佳载体，既有丰富屋顶资源，又有较好的用电需求，各地纷纷布局园区厂房分布式光伏，已有较多成功案例。综合来看，工业园区屋顶分布式光伏在昆明市具有较强可行性。

## 3.2 光伏+城市交通

### 3.2.1 光伏+路灯

光伏路灯是利用太阳能电池板，白天接收太阳辐射能并转化为电能经过充放电控制器储存在蓄电池中，夜晚当光线逐渐降低，蓄电池对灯头放电以达到照明作用。光伏路灯建设主要考量太阳能资源、遮挡物状况等环境相关条件，以及照明级数、风荷载、防水、防污染等与路灯相关的因素。

表 10 光伏+路灯建设主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
环境条件	气候因素 遮挡物状况	同表 8	
路灯要求	照明级数 <sup>33</sup>	城市道路分为高速公路（收费站出入口）； 主路（主干路、快速路、环城路）、城市内 外道路：（支路、次干路、省道、人行 道）、巷路、街道、村镇道路。	根据道路的不同类型选取合适的布灯方式、路灯型号以达到照明等级。
	环境温度	根据使用区域和场所不同，应能在适用的环境温度湿度范围内正常工作。（详见表 11）	采用合适的路灯类型，以保证在不同温度条件下能够较好的照明。

<sup>33</sup> 中国照明协会，《光伏路灯应用设计规范》规定了光伏路灯道路照明系统一般要求与安全要求，2020-



	风荷载	城市光伏路灯能承受 12 级风荷载。	厂家应根据安装区域的条件调整风荷载级别，保证路灯的安全性。
	防水 防污染	控制器室和蓄电池室需要良好的防水、防污染的措施。	应该注重防水措施的布局，保证光伏路灯的正常运行。

表 11 不同环境温度下可以提供的照明时长<sup>34</sup>

安装区域	装置适用环境温度	连续阴雨天数 (提供正常照明)	每天照明时间
城市道路	-40℃-0℃	3 天	≥10h
	0℃-5℃	7 天	≥10h

### 项目案例——北京经开区兴亦路太阳能物联网路灯项目

该项目安装太阳能物联网路灯 154 盏。与过去常见的太阳能路灯灯型不同，本案例中太阳能光伏板并非架设在灯杆顶端，而是在距离地面 6-8m 的位置，并采用双板分布式架设，目的是减低侧方风力影响，从而减小对灯杆底部压力，降低安全隐患，增加有效采光面积。其次，储能单元采用的是特制的高能量密度的三元聚合物锂电池，与相同容量的其他电池相比，重量更轻，体积更小，低温效能更高，因此无需埋设在地下，不会对土壤造成污染；智能运维管理系统对其进行科学的充放电管理，电池额定循环次数得到最大保障，因此使用寿命更长。

### 昆明场景应用可行性

光伏路灯在城区路灯建设中已有较多案例实践，从光伏路灯建设的主要考量因素来看，分为环境条件与路灯性能要求两个板块，昆明市具有较好的太阳能资源，其次遮挡物状况、路灯照明等级、路灯载荷、防雷接地要求、控制器室和蓄电池室防水措施等皆为人为可控因素，可以较好解决。综合来看，太阳能路灯在昆明市具有较好的应用价值。

### 3.2.2 光伏声屏障

光伏声屏障将太阳能发电技术与传统声屏障相结合，在保障声屏障降噪性能

<sup>34</sup> 中国照明协会，《光伏路灯应用设计规范》，2020-10

的同时将太阳能转换为电能，供给其他用电设施<sup>35</sup>。光伏声屏障工程应用需要解决两个核心问题，一是光伏声屏障的吸隔声性能保障，二是光伏发电效率。

光伏声屏障无需额外占用城市土地资源，既能发挥声屏障作用降低交通噪声，又能发挥光伏板优势进行太阳能发电<sup>36</sup>。光伏声屏障建设需在满足声屏障声学性能的基础上再考量光伏的搭建。在建设时除考量环境条件以外，还需考量发电效率、维修保养与管理、荷载等相关因素。

表 12 光伏声屏障建设主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
环境条件	气候因素、遮挡物状况	同表 8	
光伏声屏障	声学性能 <sup>37</sup>	实际应用过程中，太阳能光伏板的隔音降噪效果相对于专门的吸音材料还是存在一定的差距。声屏障临道路一侧（或双侧）宜采用降噪系数 0.6 以上的吸声屏体。	在结构设计和材料使用方面入手，确保声学性能不断优化，满足声屏障运行的基本要求。
	发电效率	道路两旁安装的声屏障方向多变，并且要受到道路宽度的限制，不可能按照最佳倾角和朝向安装，这些都会影响太阳能电池的发电量。此外，光伏声屏障大都需要垂直安装，且仅有外侧能够接收光照，导致发电量进一步减少。	尽量选择能满足相对较好倾角和朝向的路段安装，保证较好的发电效率。
	维修保养与管理	光伏声屏障在使用过程中，不可避免地会存在不同程度的污染（灰尘）、损坏或者破坏。公路光伏声屏障养护成本或偏高。	需要投入一定成本来开展清洁与维修保养，且危险系数、难度相对较大。

<sup>35</sup> 乔飞; 王俊生; 姚舒涵; 郭凯; 夏鹏鹏, 《光伏声屏障的发展与应用研究》, 2020 年 11 期, 2020-06-

<sup>36</sup> 王俊生; 乔飞; 郭凯; 夏鹏鹏, 《高效光伏声屏障设计研究》, 2022-01-06

<sup>37</sup> 王昱婷, 《太阳能声屏障的性能及应用分析》, 期刊《机电信息》, 2020 年第 5 期, 2020-07-04

	荷载	声屏障结构强度设计应考虑自重、风荷载等。	充分考虑各项荷载。
	安全性	道路有必要安装声屏障，声屏障设置不会影响道路正常使用及运行安全（防眩光）。	保证道路行驶安全的条件下进行安装。
	高度	声屏障高度不宜低于 3m；高度超过 5m 时，宜采用顶部折板、弯折、增加吸声体等设计提高声屏障的有效高度，但其位置不应影响道路安全通行；超过 6m 高度路侧声屏障仍不能满足敏感建筑降噪要求时，应结合实施条件，考虑采用半封闭、全封闭形式。设置封闭式声屏障应满足道路通行安全、消防等相关规范或规定的要求，兼顾景观、经济等综合效益。	没有现行国家标准，可以参考其他地区标准建设，在相关高度要求内开展建设以达到最有隔音效果。
	长度	声屏障长度应覆盖保护对象沿道路方向的长度，并在两端适当延长，延长的长度应根据保护对象与声屏障的距离、边缘敏感建筑物的噪声目标值、背景噪声值等因素综合确定。声屏障两端延长长度宜不小于 50m，对道路噪声源的遮蔽角百分率宜不低于 80%。	没有现行国家标准，可以参考其他地区标准建设，在相关长度要求内开展建设以达到最有隔音效果。

当同时满足以下情形时，宜采用声屏障措施<sup>38</sup>：（1）高速公路、城市快速路、主干路等道路交通噪声对敏感建筑物的影响超过所在声环境功能区标准；（2）经济、技术上可行，即道路有条件安装声屏障，声屏障设置不会影响道路正常使用及运行安全；（3）同时能保证声屏障基础、结构安全；（4）道路交通噪声贡献值超过被保护对象所处环境背景噪声 3dB 及以上。

### 项目案例——浙江嘉兴嘉绍大桥服务区光伏声屏障

该项目在嘉绍大桥服务区安装总长 330 多 m 的光伏声屏障，装机容量 41.5kW，每年可发电超 4.5 万 kWh、节约标准煤 24.42 吨，减排二氧化碳 67.51 吨、二氧

<sup>38</sup> 深圳市市场监督管理局，《深圳市地方标准，道路声屏障建设技术规范 DB4403/T 62—2020》，2020-05-01

化硫 0.23 吨、氮氧化物 0.21 吨。此次安装的光伏声屏障分新型光伏多维声屏障、光伏直立声屏障两种类型。嘉绍服务区西区出口处的新型光伏多维声屏障是全国首例在高速公路段的应用，新型光伏多维声屏障形状如台阶，通过改变噪声回弹方向、增加吸声材料，大大降低了道路两侧噪声，经实测比普通直立声屏障多降噪约 8dB。光伏声屏障通过双玻组件中运用的单晶双面电池片发电技术，突破了传统单面发电条件限制，采用直立安装方式，不额外占用土地，可随意设置安装朝向，提高了光伏组件的发电效率，在满足服务区各项设施设备用电需要的同时，多余电量输送国家电网。



图 30 浙江嘉兴嘉绍大桥服务区光伏声屏障<sup>39</sup>

### 昆明场景应用可行性

光伏声屏障在保障声屏障降噪性能的同时将太阳能转换为电能。目前，在建设时主要考量太阳能资源、遮挡物状况等环境条件，同时也需要考虑声学性能、发电效率、荷载、安全性等需要从技术方面突破的因素。光伏声屏障的安装不需要占用新的土地面积，可以通过对城市已经建成或新建设的道路声屏障进行改造与新建，而且可就近为公路沿线的路灯或机动车辆提供电能。综合考量，昆明市太阳能资源丰富，且技术方面涉及的因素能够较好突破，所以光伏声屏障具有较好的应用前景。

---

<sup>39</sup> 潇湘晨报，《全国首例！嘉兴这个高速服务区的声屏障满是“黑科技”》，2022-11-15，  
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1749492215269274750&wfr=spider&for=pc>

### 3.3 城市附属设施分布式光伏

#### 3.3.1 光伏+城市景观

“光伏+城市景观”是指将光伏发电系统与各种仿生景观相结合，形成各种功能组合的多用途发电装置，是对传统光伏发电系统的深化运用，在经济发达的城市，土地资源非常稀缺，可应用场所为观光园、商业广场、停车场、道路两侧、公园绿地、智慧小镇、别墅庭院等空地，实现以空间换平面<sup>40</sup>。且根据场景和需求不同，可设计为不同形状和颜色，同时，兼具发电、智能控制、环保、美观、实用等多种功能。并可与其他智慧设施综合提升所属场景的科技和智能层次。以光伏树为例，有 3kW，5kW，kW，9kW，12kW 等规格，一棵 5kW 的光伏树在正常的日照情况下，每月产电约 500kWh，全年产电约 6,000kWh。光伏与城市景观相结合在建设时不仅需要考虑环境条件，也需要考虑负荷、美观度、投资成本等因素。

表 13 “光伏+城市景观”主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
环境条件	气候因素 遮挡物状况	同表 8	
其他条件	负荷	分为永久荷载（光伏组件与零配件的自重）与可变荷载（雪、风、积灰荷载）。	在结构设计和材料使用方面入手，满足一定的载重。技术考量因素。
	美观度	可与周围环境有机融合，不影响周围观感。	可根据周围环境无类型进行实时调整，技术考量因素。
	投资成本	因该场景多不依附于其他建筑物、构筑物开展光伏搭建，需要额外建设支撑框架。以光伏树为例，其由地	昆明市在有较多光伏应用场景的情况下，光伏与城市景

<sup>40</sup> 《十一科技用“光伏树”创造绿色财富》，国际太阳能光伏网，2017-08-22，<https://msolar.in-en.com/html/solar-2293416.shtml>



		基、定制树干、光伏组件、控制系统、逆变系统、储能系统、照明系统及配套电气模块组成，成本或将高于其他可依托于现有支撑框架的光伏运用场景。	观结合的安装模式或不是较好选择。
--	--	---	------------------

### 项目案例——北京海淀区的生态观光园区光伏树项目

该项目所涉及的光伏树树冠直径约 6m，树高 6m，覆盖面积约为 36m<sup>2</sup>。该树树干上排布着多块光伏发电板，空间层级结构兼具发电与美观，成为园区内一道亮丽的风景线。每一棵皆由地基、树干、光伏组件、控制系统、逆变系统、储能系统、照明系统及配套电气组成，装机容量为 5.4kW，一年发电量约 7,500kWh，相当于少消耗约 3 吨标准煤，减排二氧化碳约 7.48 吨，减少排二氧化硫约 0.225 吨。



图 31 北京海淀区的生态观光园区光伏树项目<sup>41</sup>

### 昆明场景应用可行性

环境条件方面，昆明市具有较好的太阳能资源。同时，在“光伏+景观”运用时可能需要考量负荷、美观度等因素，皆可通过技术手段来实现。但不同于其他发达地区，开展“光伏+景观”场景建设的目的是以空间换平面，昆明市当前存有较多的光伏应用场景有待开发利用。相较于其他应用场景，此类场景建设成

<sup>41</sup> 全国能源信息平台，《太阳能光伏应用系列场景之“光伏树（PVtree）”》，2020-03-21，  
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1661731085589936563&wfr=spider&for=pc>

本或将偏高。综合来看，当前，昆明市可行性较弱，未来在技术逐步推进叠加场景运用逐步饱和的情况下或可加以利用。

### 3.3.2 光伏+垃圾填埋场

2022年6月，生态环境部、国家发改委、工信部、住建部、交通部、农业农村部、能源局7部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》。在推进土壤污染治理协同控制方面，强调研究利用已封场垃圾填埋场、污染地块等因地制宜规划建设光伏发电、风力发电等新能源项目。

国内对封场的垃圾填埋场地的资源再利用方面应用较少，多数用于植物复耕。在中国对垃圾填埋处理厂与新能源的结合应用尚不多见。

在建设光伏垃圾填埋场时，主要考量太阳能资源、遮挡物状况等环境条件的同时，也需要考虑垃圾填埋场稳定化状态、坡面朝向、填埋场气体状况等因素。

表 14 光伏+垃圾填埋场主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
环境条件	气候因素 遮挡物状况	同表 8	
填埋场因素 <sup>42</sup>	稳定化状态	由于垃圾填埋场易产生沉降现象 <sup>43</sup> ，根据封场年限，填埋物有机质含量等，选择合适的场地安装光伏。	按照要求应该选择封场年限≥5 年，填埋物有机质含量 < 16%的填埋场开展光伏建设，可采用柱下配重式条形基础等方式减小基础的差异沉降。
	坡面稳定性	考虑太阳阴影、排水控制系统以及腐蚀、土质等各种因素后，结合坡度，	根据实地状况，进行考量，选择坡面稳定性较好的区域搭建光伏。

<sup>42</sup> 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会，《生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求 GB/T 251679-2010》，2010-09-26

<sup>43</sup> 垃圾填埋场的沉降是其稳定化进程的一种宏观表现和主要指标。由于生物降解、颗粒混合、机械弯曲压碎以及物理化学的原因，普通填埋场的场地沉降一般要持续 25 年以上，其总的沉降量为其初始填埋高度的 25% -50%，其中 50%以上的沉降量发生在封场后的第 1 年。垃圾填埋场封场的时间越长，其沉

		考察坡面稳定性。	
	坡面朝向	根据所处半球选择合适的安装角度。	由于朝南的地区更有利于太阳辐射的吸收。 如果垃圾填埋场有更多向南面积(如东西走向的垃圾填埋场就比南北走向垃圾填埋场拥有更多的向南的面积), 则越利于太阳能利用系统的建立。
	填埋场 气体状况 <sup>44</sup>	在垃圾填埋场中, 垃圾中所含有的有机物在微生物的作用下会降解, 产生以甲烷为主的填埋气体。	甲烷是一种易燃易爆的高热值气体, 在安装光伏时应该进行相关气体的收集利用或干预, 减少光伏项目潜在风险。
其他因素	荷载	大风、冰雪、积灰对太阳能电池的支撑框架提出了一定的力学要求。	采用合适的光伏支架材料和光伏组件。
	自然灾害	自然灾害发生频率与严重程度(洪涝、泥石流、山体滑坡等)。	尽量选择自然灾害发生频率低的地区开展建设, 有效保证光伏的运作。

### 光伏发电在填埋场应用的两种方式<sup>45</sup>

**晶体硅电池加框架方式:** 在垃圾填埋场安装一套太阳能光伏发电系统, 首先需要把太阳能电池组固定在地面上, 而通常通过连接在水泥石墩上的铝或镀锌钢框架来起到固定作用。在这种方式下, 需考虑整个系统的质量对填埋场地面沉降的影响。该方式在欧美已有许多成功案例。在上海老港填埋场位于上海市浦东新区老港镇东, 封场后有近 3.33km<sup>2</sup> 土地的再利用, 整个工程光伏阵列均采用 1MW 容量的模块化布置, 组件安装方位角采用正南方向, 安装倾角按当地最佳倾角 25° 设置, 以最大限度地利用太阳能。单列组件前后间距为 3.3m, 保证全年 09:00~

降对太阳能发电系统的影响就越小。

<sup>44</sup>王渡; 龚淼; 陈德珍, 《基于灰色决策的太阳能发电系统在垃圾填埋场的应用》, 《太阳能学报》第 34 卷第 3 期, 2013-03

<sup>45</sup>王渡; 龚淼; 陈德珍, 《垃圾填埋场封场后的太阳能光伏发电的应用和系统设计》, 《太阳能学报》第 34 卷第 1 期, 2013-01

15:00 时段内前后组件不遮挡。



图 32 晶体硅电池加框架方式

**塑料隔离薄膜组合柔性电池板方式：**该方式将蓝色的柔性薄膜太阳能电池铺设在绿色的改进的土工高密度塑料薄膜上，而这块土工塑料薄膜又直接覆盖在垃圾填埋场上。到目前为止，全世界建成并运行的系统不多，位于美国圣安东尼奥的垃圾填埋场的太阳能光伏发电系统是一个典型案例。该垃圾填埋场被封场后，它使用了一种被称为太阳能覆盖面的新型工程覆盖膜系统。太阳能覆盖面的主要功能是把高效的填埋场覆盖膜和柔性太阳能电池组进行组合。太阳能覆盖面被铺设在三期朝南的 2 万多  $\text{m}^2$  的坡度为  $18^\circ$  的斜坡上。填埋场覆盖膜是厚度为 60mm 的耐火的热塑性塑料，该系统总装机容量 135kW。



图 33 覆盖膜上的柔性电池板

#### 项目案例——南昌市麦园垃圾填埋场光伏项目

该项目由南昌市水业集团计划投资 2 亿元，建设面积近 59.99 万  $\text{m}^2$  的光伏发电项目，目前正在逐步建设中。项目通过铺设 9 万余块光伏板，把垃圾填埋库区建设成年平均发电量可达近 5,000 万 kWh 的光伏发电站。按照每户每年用电



量大约 2,000kWh 计算，可满足该市 2.5 万户家庭一年的用电。



图 34 南昌市麦园垃圾填埋场光伏项目<sup>46</sup>

### 昆明场景应用可行性

在垃圾填埋场安装光伏设施，可以高效利用填埋场闲置土地。昆明市太阳能资源较为丰富，但高原山地地形状况明显，在选择建设光伏时应该充分考量高山、树木等遮挡物状况；其次还需考量垃圾填埋场的稳定化状态、坡面稳定性等因素进行选择；最后选择厂址时还需注意洪涝、泥石流、山体滑坡等自然灾害的威胁。总的来看，在低碳循环发展大背景下，昆明市开展填埋场光伏建设具有一定可实践性。昆明有位于东郊白水塘的东郊垃圾卫生填埋场（1998 年投入使用），和位于西郊沙朗红水塘的西郊垃圾卫生填埋场（2001 年正式投用）等垃圾填埋场，这两座垃圾填埋场总占地面积约 116.67 万 m<sup>2</sup>。在对垃圾填埋场进行资源再利用时可考虑开展光伏搭建，将是较好的光伏场景发展突破点。

## 3.4 小结

光伏在城市中的运用场景较多，可运用于各类屋顶、路灯、声屏障、垃圾填埋场和景观树等方面。综合来看，任何场景的光伏运用都需要考虑环境条件，包括太阳能辐射状况及周围的遮挡物状况。其次，各个场景也有各自的特殊考量因素。如下表所示。

表 15 各场景特殊考量因素

<sup>46</sup> 南昌新闻网，《昔日垃圾填埋区变身光伏发电站》，2022-10-19，  
[http://www.ncnews.com.cn/nwsp/ycsp/202210/t20221019\\_1886692.html](http://www.ncnews.com.cn/nwsp/ycsp/202210/t20221019_1886692.html)



场景	特殊考量因素
建筑屋顶	屋面荷载、屋面防水、屋面排水、屋面朝向、对周围建筑物的影响、建筑结构与电气安全、光伏组件安装高度、光伏板阵列间距、房屋可使用年限、房屋产权、周围污染物影响、美观度等。
光伏路灯	防水、防污染、风荷载、环境温度、照明级数等。
光伏声屏障	声学性能、发电效率、车辆行驶安全、风荷载、维修保养等。
光伏+景观	雪、风、积灰负荷、美观度、投资成本等。
光伏垃圾填埋场	场地稳定化状态、坡面稳定性、坡面朝向、填埋场气体、荷载、自然灾害发生频率等。

综上所述，屋顶光伏作为光伏的重要运用场景已经有大量案例实践，技术及运用相对成熟，在满足相关规范要求的前提下，昆明市可依托现有光伏试点辖区的基础上进一步开展屋顶光伏项目的推进。而诸如光伏路灯、光伏声屏障等与交通相关的基础设施方面，需要在满足相关照明、隔音功能的基础上，搭建太阳能光伏板，其中涉及诸多技术方面的因素，现在已有一定突破，昆明市可以在适宜的区域及场所进行光伏运用。至于光伏与景观的结合，其运用目的在于以空间换平面，在一线土地资源匮乏的城市已有案例实践，但鉴于其投资成本考量，昆明市在有其他运用场景的前提下，此类场景可行性较弱。光伏垃圾填埋场作为一种新兴光伏运用场景，国内并没有太多案例实践，此场景重要考量的是垃圾填埋场的稳定状态、坡面朝向，自然灾害发生频率等因素，且可以大面积搭建光伏板，可利用价值较高，昆明市可以率先在已封场的垃圾填埋场开展实践，或可在云南省形成一定的示范效应。

## 四、农村类分布式光伏应用场景

### 4.1 光伏+农村屋顶

2021年9月云南省能源局发布了《云南省整县（市、区）屋顶分布式光伏试点工作推进方案》提出，结合乡村振兴和新农村建设，全面推动乡村现有居民住宅、新农村集中搬迁住房、村集体物业设施屋顶建设屋顶光伏发电系统，鼓励集中连片发展。试点县农村户用建筑屋顶总面积安装光伏比例不低于20%。2023年底，试点地区各类屋顶安装光伏发电的比例均达到这一要求的，列为整县（市、区）屋顶分布式光伏开发示范县。公布了我省列为整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点的28个县（市、区），昆明市有宜良县、富民县、石林县。

农村屋顶光伏建设主要考量因素和城市屋顶大致相同，但要注意农村屋顶的基本形式，昆明少量存在一些少数民族合院建筑粘土瓦屋顶（直、曲线坡）<sup>47</sup>是不宜建屋顶光伏的。

#### 项目案例——云南省昆明市禄劝彝族苗族自治县马鹿塘乡普德村

云南省昆明市禄劝彝族苗族自治县在昆明市科学技术局的支持下，以整村推进的方式在村民住宅的屋顶上建设分布式光伏发电系统。该项目整体投资约500万元，由财政资金和企业共同担负，项目落成后，每户年化收益约1,774元，村集体每年减少电费支出约37万元，25年周期内可实现碳减排1.25万吨。

根据村民意愿、住宅安装条件，以及每户用电需求，该项目为普德村中的99户住宅安装了屋顶分布式并网光伏发电系统。每户的屋顶分布式并网光伏发电系统的装机容量为3.52kW，整个项目的总装机容量达到348.48kW。由于每户住宅的屋顶布局不同，因地制宜，屋顶分布式并网光伏发电系统采用了不同的安装形式。其中：图A的屋顶无平台，且坡屋顶朝向东、西，因此只能选择在户外空地上安装分布式并网光伏发电系统；图B的屋顶只有很小的平台，基本可满足系统的安装；图C的平台面积约有30~40m<sup>2</sup>，系统约占平台面积的1/2；图D的平台面积更大，系统约占平台面积的1/3；图E的屋顶有很大的平台，且有上下两个平台（即3楼平台上的建筑屋顶也是平台），合计面积超过100m<sup>2</sup>，系统安装在两

---

<sup>47</sup> 杨大禹，《云南少数民族住屋》

个平台中较高的平台上，约占上平台面积的  $1/2$ ，可供两户使用。



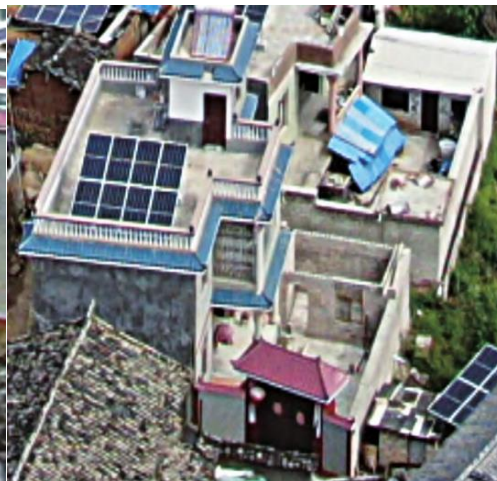
A.屋顶无平台



B.屋顶有小平台



C.系统约占平台面积的  $1/2$



D.系统约占平台面积的  $1/3$



E.有两个平台，系统约占上平台面积的  $1/2$

图 35 普德村项目中不同屋顶布局对应的屋顶分布并网光伏发电系统的安装形式



### 项目案例——云南省昆明市石林县屋顶分布式光伏一期项目 EPC 总承包

光伏电站位于石林县的公共事业单位的屋顶上，场址地理位置位于东经  $103^{\circ} 14' 44.50'' \sim 103^{\circ} 30' 48.56''$ 、北纬  $24^{\circ} 36' 27.93'' \sim 24^{\circ} 49' 21.14''$ ，场地海拔约 1,678m。石林县公共事业单位的屋顶总面积约 63,024m<sup>2</sup>，以固定倾角的方式，共安装 8,560 片 540Wp（长 2,256mm 宽 1,133mm）的单晶硅组件，总装机容量直流侧为 4.6224MW，交流侧为 4.17MW，容配比为 1.114，拟采用 0.4kV 电压等级接入石林县各公共事业单位 0.4kV 供电线路上或单位专变的 0.4kV 母线上，通过原有供电线路或单位专变接入电网，实现“自发自用，余电上网”。

内容包括（但不限于）：勘察设计（含接入系统设计）、全部设备和材料采购供应、项目接入手续的办理、建筑安装工程施工、项目管理、调试、验收、培训、移交生产、工程质量保修期限的服务等内容。

中标人：陕西诺尔建筑工程有限公司，中标价：1,642 万元（约 1.868 元/W）

48

### 昆明场景应用可行性

发展农村民居屋顶分布式光伏发电可以促进农村能源转型和助推乡村振兴，根据整县（市、区）屋顶分布式光伏试点工作推进方案，对试点县农村户用建筑屋顶总面积安装光伏比例做了强制性规划，为屋顶分布式光伏建设提供了政策支持与强制性推动力。昆明农村民居的环境条件（日平均日照峰值时间在 3.8-4.45 小时）和建筑条件（屋顶的基本形式、屋顶大小、屋顶强度、阴影、坡屋顶平面的倾斜度、屋顶平面的方位角、屋顶面积的可利用性）均处于适当。

昆明农村民居普遍高度住宅楼层不超过 4 层<sup>49</sup>，几乎没有遮挡物，且农村地广人稀建筑物密度小，昆明已有禄劝彝族苗族自治县马鹿塘乡普德村成功案例。综合来看，农村屋顶分布式光伏在昆明市具有一定可行性。

## 4.2 光伏+养殖（渔业、畜牧业）

2022 年 11 月，云南省工业和信息化厅发布了《云南省智能光伏电站装备产

---

<sup>48</sup> 国家能源招标网，<http://www.chnenergybidding.com.cn/bidweb/>

<sup>49</sup> 昆明市人民政府令第 160 号文件，《昆明市农村村民住宅建设管理办法》，2021 年 7 月

业发展三年行动计划（2022—2024 年）》，提出因地制宜整合各类“光伏+”综合应用，探索光伏农业新兴模式，将光伏发电与农业设施有机结合，在种养殖、农作物补光、光照均匀度与透光率调控、智能运维、高效组件开发等方面深度创新，促进农民增收。

“渔光互补”是将现代光伏清洁能源与传统养殖相结合，实现屋内养殖屋顶设光伏电站，或者水下养殖水上光伏发电的新型养殖模式。而同其他的农业光伏模式相比，渔光模式更有其特有的优势，由于水面环境温度，地面环境温度，组件间距比其他模式大，形成良好的日照、通风、降温环境，对于延长光伏寿命，提高发电效率较为有利。项目只能在水面建设，光伏组件底端不低于水面 1m。渔光互补项目区别于地面光伏电站，其在选址阶段必须考虑当地洪水位的影响，必要时需委托有资质的单位开展防洪评价，严格按照洪评报告结果开展设计。



图 36 渔光互补

“畜光互补”是指光伏产业与畜牧产业有机结合起来，将养殖棚改装成为钢架结构，利用养殖舍棚顶空间，安装光伏板发电，上面是光伏，下面发展养殖，光伏产业与畜牧养殖起到了优势互补的作用，实现了资源相互利用，也称为“上光下养”。





图 37 畜光互补

表 16 渔光、畜光互补建设主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
建筑条件 (渔光)	安全性	选址阶段必须考虑当地洪水水位的影响，必要时需委托有资质的单位开展防洪评价，严格按照洪评报告结果开展设计。	已有的水库水面、河流水面、湖泊水面或坑塘水面上建设或者通过改造后建设光伏发电项目。
	方位角和安装倾角	倾斜面所接收到的年总辐射量也随之变化，确计算最佳倾角，考虑散射影响，利用天空各向同性模型进行计算并利用 PVSYST 软件（光伏系统的研究和模拟）验证。	昆明市的最佳安装角度为 25°，此时发电效率最大。
	防水等级	组件要有更好的质量更高的防水等级，如果组件存在工艺不合格那么很可能有水汽进入，影响发电量。	昆明在满足相关防水等级规范的前提下安装即可。
	耐紫外老化	光伏组件安装于池塘水面之上，水面对紫外线有着一定的反射，由于组件背面与水面相	昆明在满足相关耐紫外老化规范的前提下安装即可。

		对更易受到紫外线影响，长期紫外线照射会加速组件背面边框的腐蚀，降低寿命，所以就要求组件背面的边框要有耐紫外线能力。	
	抗 PID（电势诱导衰减）能力	处在高湿环境中，电池片与其接地金属边框之间的高电压作用下出现离子迁移，而造成组件性能衰减的现象，影响组件寿命与发电量。	昆明在满足相关抗 PID（电势诱导衰减）能力规范的条件下安装即可。
	排水	光伏支架基础采用排水施工时，对打桩精度的要求较高，光伏支架形式宜选择用钢量较少的立柱焊接形式；当采用水上打桩时，因打桩精度较差，光伏支架设计应具有一定的可调节余量，保证支架系统的水平度满足工程精度要求。	昆明在满足相关排水能力规范的条件下安装即可。
建筑条件 (畜光)	光伏组件的选型	光伏复合项目支架基础应根据土地种类、地质条件、建设方式，结合太阳能资源条件、技术经济可行性设计科学合理确定。	光伏组件下部空间进行畜牧类养殖，一般框架结构高度大于 1.5m，能够为养殖提供适宜的温度和湿度，同时也能够提高土地资源的利用效率。

### 项目案例——湖南三仙湖镇 20MWp 渔光互补分布式光伏发电项目

该项目一期投资 1.6 亿元，由中国能建安徽电建二公司承建，装机容量达 20MWp，包含一座 35 千伏集成式升压站，17 个发电单元，87,000 余块光伏组件，位于湖南省益阳市三仙湖镇调蓄湖水域，总水域面积 39.99m<sup>2</sup>，光伏区及升压站分布于 20 个鱼塘中，施工环境较为复杂。项目建成后，年发电量为 1,823 万 kWh，与传统的火电相比，每年可节约标准煤 5,800 吨。其次，将光伏板支架立

体布置于水面上方及鱼塘沿岸，因此不需要占用其他土地，在节约土地的同时，也增加了单位面积土地经济价值，真正实现了“一地两用，渔光互补”。

#### **项目案例——山阴县牛棚屋顶 100MW 分布式光伏发电项目 EPC 总承包**

建设容量预计为 100MW<sub>p</sub> 光伏项目，一次性建成，配套新建五座 35KV 开关站，通过 5 回 35KV 线路接入系统河阳 110KV 变电站 35KV 侧。中标人：中铁四局集团有限公司和陕西新现代电力工程设计有限公司联合体单位，中标价：4.19 亿元（单价 4.19 元/W）。

#### **项目案例——云南岫箐农业科技有限公司水产养殖基地 5MW 渔光互补分布式光伏电站项目**

招标人：为中广通能源（元谋县）有限公司，计划总投资：约 2,250 万元，中标人：云南建投安装股份有限公司

#### **项目案例——云南昆明寻甸县浑水塘一期农光互补项目，羊场一期（化桃箐）农、牧光互补项目**

浑水塘一期 60MW 农光互补和羊场一期（化桃箐）35MW 农/牧光互补两个项目，场区总占地面积约 187.21 万 m<sup>2</sup>，总投资约 4.75 亿元，项目建成后预计年均发电量达 1.4 亿 kWh。

#### **昆明场景应用可行性**

从昆明来看，宜良县是水产养殖大县，也是全市乃至全省重要的水产苗种生产地，2022 年全年其水产养殖面积规模达 1,866.66 万 m<sup>2</sup><sup>50</sup>，具备一定的渔光互补项目的先决条件。但应注意光伏电站等项目不得在河道、湖泊、水库内建设<sup>51</sup>，且“渔光互补”的基础研究目前还处于空白状态，还需通过产学研结合，研究“渔光互补”的产业特征、系统结构、环境响应机制，以及产业系统与自然生态系统之间物质和能量的交换和代谢过程，优化与调控方法以及实现产业系统高效、和谐发展的工程建设模式等。综合来看，我省元谋县已有案例正在建设，昆明可以把握产业合作新的机遇期，充分发挥技术与成本优势，深入参与。

畜光互补的主要考虑因素是光伏组件下部空间进行畜牧类养殖，一般框架结

---

<sup>50</sup> 昆明市农业农村厅

<sup>51</sup> 水利部，《关于加强河湖水域岸线空间管控的指导意见》，2022-05

构高度大于 1.5m，能够为养殖提供适宜的温度和湿度即可，且昆明寻甸已有畜光项目正在建设中，已具备各方面的先决条件。

### 4.3 光伏+农业大棚

光伏农业大棚利用的是农业大棚的棚顶，不占用地面，也不会改变土地使用性质，通过在农业大棚上架设不同透光率的太阳能电池板，能满足不同作物的采光需求，可种植有机农产品、名贵苗木等各类高附加值作物，还能实现反季种植、精品种植。



图 38 光伏农业大棚

表 17 农业大棚类型

类型	适用场景
单栋棚	组件安装于前屋面上，一般种植食用菌等喜阴性植物
春秋/冬暖棚	组件安装于大棚上方，根据保温性能区分，种植蔬菜、花卉等
冬暖阴阳棚	组件安装大棚上方，阳棚种植喜光，阴棚种植喜阴植物
双模双网棚	组件安装于大棚上方，适合种植喜阴作物
联排棚	组件安装大棚阳坡面，种植对阳光需求一般的中药、茶等作物
玻璃温室	组件安装于大棚阳坡面，适合种植花卉等，用于示范和育苗
联栋敞开式	组件安装大棚阳坡面，一般适用于南方气候温暖地区
架高式农业大棚	组件安装于抬高支架上，受当地土地政策影响

表 18 农业大棚光伏建设主要考量因素

	相关因素	主要内容	昆明市状况
建 筑 条 件	光伏组件 的选型及 排布方式	需充分考虑大棚内作物的采光要求，能够满足作物生长所需透光率，同时考虑不同排布形式对棚内光线的影响。	我省光伏复合项目建设要求和认定标准的项目，架设在 25°以上耕地(水田除外)或其他农用地上的光伏方阵用地，满足光伏组件最低沿高于地面 2.5m、高于最高水位 0.6m，桩基间列间距大于 4m，行间距大于 6.5m 的架设要求 <sup>52</sup> ，与温室结合的农光互补项目参照相关光伏建筑设计规范。
	系统设备	光伏组件、接线盒、电缆、桥架、汇流箱等选型需考虑大棚内高湿环境的影响。	昆明在满足相关系统设备规范的前提下安装即可。
	安装倾角	大棚应根据日光温室建造规范选择有利于作物生长的前屋面倾角，如果组件安装于前屋面上兼做大棚的棚顶，倾角设计要综合考虑大棚用钢量、棚内温度、湿度以及发电量等因素，经技术经济比较后确定。	昆明市的最佳安装角度为 25°，此时发电效率最大。
	覆盖率	覆盖率会对农作物大棚的采光率造成直接影响，光伏板之间的间隔太大，将导致单位面积内发电量无法满足项目要求；光伏板之间的间隔太小，也会导致农作物的采光率过低，影响农作物的正常生长，同样属于关键性因素。	严格控制光伏板的覆盖率在合理范围之内。在尽可能不影响蔬菜收益的前提下，扩大光伏板的覆盖面积，提高单位面积内的发电量以及土地利用率。
	总平面布置设计	除了考虑发电工艺合理需求外，还应关注合理布置农业生产工艺流程、关注实现观光、旅游、示范功能，在功能区划分、道路规划、人流、物流组织等方面进行统筹	避免进行二次施工和设计，这会涉及一些滴灌、通风、捉虫、照明采暖的设备设施。

<sup>52</sup> 《云南省产业用地政策实施工作指引（2022 年版）》



		考虑。	
	农作物的 种类选择	由于光伏农业大棚中，光伏板对光照具有遮挡作用，因此光照强度相较于普通农业种植较弱。在农作物种类选择方面，应尽可能选择对光照强度要求不高的农作物，或选择喜阴作物，如菌类作物、中药等。	昆明根据各地不同环境条件选择合适的农作物即可。

### 项目案例——云南元江北泽坝 40MW 光伏农业科技大棚电站项目

总占地面积约 96.67 万 m<sup>2</sup>，装机容量 40MW，包括 561 个光伏农业科技大棚及配套设施建设，总投资约 4.5 亿元，年均可上网电量达到 4,977 万 kWh，每年可节约标准煤约 16,921 吨，每年可减少 CO<sub>2</sub> 排放量约 42,304 吨。据估算，该项目 25 年总上网电量 12 亿 kWh，将直接并入国家电网，可有效弥补元江、玉溪用电丰枯期的电力缺额，同时园区内种植的果蔬、特色茶叶、优质菌菇、花卉苗木、中草药等高附加值农作物进一步带动了当地高原生态农业的稳步增长。农业科技光伏大棚的建成，使当地土地亩产值从过去的 6,000 多元增加到 80,000 多元，有效提高了耕地产出率，为发展高原特色农业提供了示范和样板。

### 昆明场景应用可行性

影响光伏农业大棚主要因素有光伏组件的选型及排布方式、光伏系统设备、组件安装倾角、光伏板覆盖率、总平面布置设计、农作物的种类选择等方面。光伏农业大棚目前还存在成本高、技术不成熟、农业自动化程度较低、种植单一品种等问题。但未来随着有关政策的细节完善，且云南已有示范和样板，农业光伏大棚产业不仅包括农作物的生产与经营、光伏电能的管理，还融合农业旅游、文化旅游和田园景观建设，提升了农业产业土地资源收益，使光伏农业产业的效益生态化。

## 五、其他省份分布式光伏发电项目建设情况

### 5.1 分布式光伏上网电价

2022 年，对新备案工商业分布式光伏项目延续平价上网政策，上网电价按照当地燃煤发电基准价执行<sup>53</sup>，例如，2022 年，四川省对新备案工商业分布式光伏项目上网电价，延续平价上网政策，按四川省燃煤发电基准价每千瓦时 0.4012 元执行<sup>54</sup>。

上网电价补贴方面，2021 年起，新备案集中式光伏电站、工商业分布式光伏项目，中央财政不再补贴，实行平价上网<sup>55</sup>。2021 年新建项目上网电价，按当地燃煤发电基准价执行。不过，依旧鼓励各地出台针对性扶持政策，支持光伏发电等新能源产业持续健康发展。目前，部分地区对于分布式光伏电站还有地方补贴<sup>56</sup>。

表 19 全国各省市燃煤发电标杆价

省市	燃煤发电基准价 (元/kWh)
北京	0.3598
天津	0.3655
河北	冀南: 0.3644 冀北: 0.3720
山西	0.3320
山东	0.3949
内蒙古	蒙西: 0.2829 蒙东: 0.3035
辽宁	0.3749
吉林	0.3731
黑龙江	0.3740
上海	0.4155

<sup>53</sup> 国家发改委，《关于 2022 年新建风电、光伏发电项目延续平价上网政策的通知》

<sup>54</sup> 四川省发改委，《关于 2022 年新建风电、光伏发电项目上网电价政策有关事项的通知》

<sup>55</sup> 国家发改委，《国家发展改革委关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》

<sup>56</sup> 分布式光伏上网电价=燃煤发电基准价+地方补贴

江苏	0.3910
浙江	0.4153
安徽	0.3844
福建	0.3932
湖北	0.4161
湖南	0.4500
河南	0.3779
四川	0.4012
重庆	0.3964
江西	0.4143
陕西	0.3545
甘肃	0.3078
青海	0.3247
宁夏	0.2595
新疆	0.2500
广东	0.4530
广西	0.4207
云南	0.3358
贵州	0.3515
海南	0.4298

云南省周边省市中，贵州及广西暂无明确补贴政策执行，如贵州工商业分布式光伏项目上网电价仍按《国家发展改革委关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》的规定，以燃煤发电基准价执行，贵州省燃煤发电基准价为每千瓦时 0.3515 元<sup>57</sup>。广东、四川、重庆部分地区补贴情况如表 20。

表 20 云南周边省市光伏发电补贴情况

地区	补贴	估算上网电价 <sup>58</sup>
----	----	----------------------

<sup>57</sup> 贵州省发改委，[http://fgw.guizhou.gov.cn/hdjl/zsk/202205/t20220516\\_74074450.html](http://fgw.guizhou.gov.cn/hdjl/zsk/202205/t20220516_74074450.html)

<sup>58</sup> 此处并非最终上网电价，最终上网电价还需注意区县级行政单位是否有相应补贴，以及是否能

广东深圳	0.3 元/kWh	0.7530 元/kWh
广东东莞	非自有住宅建设企业分布式光伏发电项目，补助 0.1 元/kWh	非自有住宅建设企业分布式光伏发电项目，0.5530 元/kWh
	自有住宅及在自有住宅区域内建设的居民分布式光伏发电项目，补助 0.3 元/kWh	自有住宅及在自有住宅区域内建设的居民分布式光伏发电项目，0.7530 元/kWh
广东佛山	0.3 元/kWh	0.7530 元/kWh
广东潮州	年实际发电量达到 50 万 kWh 以上，补贴 0.01 元/kWh	年实际发电量达到 50 万千瓦时以上，0.4630 元/kWh
四川省	工商业分布式光伏发电，补贴 0.05 元/kWh	工商业分布式光伏发电，0.4512 元/kWh
	户用分布式光伏发电，补贴 0.08 元/kWh	户用分布式光伏发电，0.4812 元/kWh
重庆市	户用分布式光伏发电，补贴 0.18 元/kWh	户用分布式光伏发电，0.5764 元/kWh

## 5.2 分布式光伏发电上网模式

光伏发电项目的并网模式有以下三种模式：（1）全部自用：光伏设备发电的电量全部自用，不进行并网；（2）自发自用，余电上网：光伏设备发电的电量，部分电量自用，剩余电量进行并网；（3）全额上网：光伏设备发电的电量全部并网。

国家发改委发布的《分布式发电管理暂行办法》指出“分布式发电以自发自用为主，多余电量上网，电网调剂余缺。采用双向计量电量结算或净电量结算的方式，并可考虑峰谷电价因素。结算周期在合同中商定，原则上按月结算。电网企业应保证分布式发电多余电量的优先上网和全额收购。”。

---

与市级补贴叠加。

南方电网发布的《南方电网公司分布式光伏发电服务指南》包含上述三类模式。发电分布式光伏发电项目在备案和申请接入时可以选择选择“全额上网”、“自发自用、余电上网（上网电量不超过 50%）”或“自发自用”中的任一运营模式。

## 5.3 分布式光伏发电项目接入要求

### 5.3.1 并网电压等级要求

参考河北省能源局 2022 年发布的《屋顶分布式光伏建设指导规范（试行）》以及广州供电局有限公司 2017 年编制的《光伏指导手册》相关规范和要求，针对分布式光伏并网申请及系统接入，并网电压规范化要求建议如下：

表 21 接入电压等级建议表

单个并网点容量	并网电压等级
400 千瓦及以下	380 伏
400 千瓦-6 兆瓦	10 千伏
6 兆瓦及以上	35 千伏
注：最终根据并网电压等级应根据电网条件，经过技术经济比选论证确定，优先采用低电压等级接入。	

表 22 分布式光伏并网点选择

电压等级	并网点
35 千伏	变电站或开关站 35 千伏母线； 35 千伏线路
10 千伏	变电站、开关站、配电室、箱变、环网箱（室）的 10 千伏母线； 10 千伏线路（架空线路）
380（220）伏	配电室、箱变或柱上变压器低压母线；低压主干线路/配变箱

光伏电站接入电网方案应根据最终分期规模、送电距离、接入条件、电网运行要求和承受能力等因素确定，并应在对提出的接入系统方案进行必要的电气计算和技术经济比较后提出推荐方案。

光伏发电接入电压等级选择应根据不同方案的技术经济比较确定，一般情况



参考下表。

表 23 光伏发电（含分布式电源）并网的电压等级

总容量范围 (KW)	并网电压等级 (千伏)		单点容量范围 (千瓦)
	A、B、C 类供电区	D、E、F 类供电区	
小于 8	0.22	0.22	--
8 至 500	0.38	0.38	440 以下
500 至 6000	10 (6)	10 (6)	--
6,000 至 10,000	10 (20)	35	--
10,000 至 30,000	10 (20) 、 110	35、 110	--
30,000 至 100,000	110	110	--
100,000 及以上	110、 220	110、 220	--

有不同接入电压等级可供选择的时候，宜根据送电方向选择适合接入的电压等级，原则上应在本电压等级内消纳。经过技术经济比较，并考虑发展规划等原因，采用低一级的电压等级接入优于高一级的电压等级接入时，推荐采用低一级的电压等级接入。

单点容量等于或小于 400kW 的分布式光伏发电系统宜接入 380V，单点容量 400kW-6MW 的分布式光伏发电系统宜接入 10（6）kV。当采用 220V 单相接入时，应根据当地配网三相不平衡测算结果确定接入容量，一般情况下单点最大接入容量不宜超过 8kW<sup>59</sup>。

有不同接入电压等级可供选择的时候，宜根据送电方向选择适合接入的电压等级，原则上应在本电压等级内消纳。经过技术经济比较，并考虑发展规划等原因，采用低一级的电压等级接入优于高一级的电压等级接入时，推荐采用低一级的电压等级接入。

单点容量等于或小于 400kW 的分布式光伏发电系统宜接入 380V，单点容量 400kW-6MW 的分布式光伏发电系统宜接入 10（6）kV。当采用 220V 单相接入时，应根据当地配网三相不平衡测算结果确定接入容量，一般情况下单点最大接

<sup>59</sup> 中国南方电网广州供电局有限公司，《广州供电局光伏指导手册》，2017-07

入容量不宜超过 8kW<sup>60</sup>。

### 5.3.2 屋顶分布式光伏发电项目接入要求

屋顶分布式光伏项目按照“光伏+储能”方式开发建设，以确保电网安全运行和用户供用电安全为原则，统筹考虑负荷特性和电能质量要求进行储能配置<sup>61</sup>。

屋顶分布式光伏配套储能，可选择自建、共建或租赁等方式灵活开展配套储能建设。配套储能原则上应在主要并网点集中建设，优先采用 380 伏并网，并网点应在分布式光伏并网点附近，以解决部分台区电压偏差、设备重过载、就地无法消纳等问题。

屋顶分布式光伏设计使用年限不应小于 25 年。自然人的屋顶分布式光伏项目应不大于 50 千瓦，一般采用接入 35 千伏及以下电压等级的屋顶分布式光伏项目进行建设。

对于主屋顶分布式光伏升压站或输出汇总点的电气主要接线方式，应根据屋顶分布式光伏规划容量、分期建设情况、供电范围、当地负荷情况、接入电压等级和出线回路数等条件，通过技术经济分析比较后，可采用如下典型主接线方式：

- （1）380（220）伏：采用单元或单母线接线；
- （2）10 千伏：采用线变组或单母线接线；
- （3）35 千伏：采用线变组或单母线接线；
- （4）配有屋顶分布式光伏的配电台区，不得与其他台区建立低压线路。

## 5.4 屋顶光伏安装限高

浙江、广东、湖南、湖北等省份对屋顶光伏安装限高作出明确规定，线稿自 1.2 米到 4 米不等。根据我国相关法律法规规定，未经规划部门审批，私自在房屋四周、屋顶、阳台等处擅自搭建的各类建筑物和附属设施，或者私自改变小区居民住宅楼房屋外立面结构的行为属于私搭乱建。屋顶分布式光伏发电设施无法以封闭式构筑物的形态新增于已建成的建筑物屋顶。

表 24 部分省市对屋顶光伏安装的限高

---

<sup>60</sup> 中国南方电网广州供电局有限公司，《广州供电局光伏指导手册》，2017-07

<sup>61</sup> 河北省能源局，《屋顶分布式光伏建设指导规范（试行）》

地区	限高
广东广州	最高点应不高于顶屋屋面(不包括女儿墙、楼梯间)2.8 米，其中有楼梯间的居民分布式光伏项目，光伏组件安装的最高点应不高于楼梯间顶平面 1 米(最高点应不高于顶屋屋面 4 米)，并且四面均不得围蔽形成建筑使用空间。
广东深圳	项目安装最高点至顶屋屋面(不包括女儿墙、楼梯间)垂直距离应不高于 2.2 米，且四面均不得围蔽形成建筑使用空间。
广东珠海	高度距离铺设平面最高不超过 2.8 米
广东中山	最高点距离铺设平面的高度不得高于 2.8 米或不高于建筑物最高平面 1 米（具有特殊楼梯间的居民楼，在楼梯间上铺设的分布式光伏发电项目最高点应不高于屋顶屋面 4 米），并且四面均不得围蔽形成建筑使用空间。分布式光伏发电项目的垂直投影不应突破建筑物屋顶范围。
湖北武汉	屋顶安装的光伏板从屋面平台起算其高度不应超过 1.8 米，覆盖范围不得超越建筑物主体结构轮廓线；对于超出既有建筑女儿墙高度的光伏板应开展隐蔽设计，确保建筑立面的协调性
湖北宜昌	屋顶安装的光伏板从屋面平台起算其高度不应超过 1.5 米（城区限建区域内的住宅不得布置屋顶分布式光伏发电设施，但鼓励限建区域内的厂房、公共建筑等建筑安装屋顶分布式光伏发电设施，同时给出建设规定，城区限高为 1.2 米），覆盖范围不得超越建筑物主体结构轮廓线；对于超出既有建筑女儿墙高度的光伏板应开展隐蔽设计，确保建筑立面的协调性
浙江瑞安	建筑为坡屋面结构时，光伏组件安装最高高度与屋面距离不应超过 30 厘米；建筑为平屋面结构时，光伏板顶端距离屋顶平面的高度不得高于 2.2 米，光伏板下方四周不得进行任何形式的围合。
上海市	居住建筑上安装最高点与屋顶之间高差面不应超过 1.5 米，坡屋面光伏方阵表面与安装屋顶面平行距离不得超过 30 厘米

表 25 部分区县对屋顶光伏安装的限高

地区	限高
广东省 佛山市 禅城区	安装光伏发电设备不影响建筑外立面，且安装高度不大于 2.2 米的,无需办理规划审批手续。安装光伏发电设备影响建筑外立面，且安装高度不大于 2.2 米的，应向发展规划和统计局申请办理建筑外立面装修规划审批手续。安装光伏发电设备的总高度原则上不得大于 2.2 米，确属设备需要大于 2.2 米，且无替代方案的，申请人在完善分布式光伏发电项目备案后，应按建筑物改扩建（加层）事项要求向发展规划和统计局申请办理规划审批手续。
江西省 赣州市 南康区	在屋顶建设的项目，光伏板顶端距离屋顶平面的高度不得高于 2.5 米；光伏板下方四周不得进行任何形式的围合。
浙江省 丽水市 庆元县	建筑顶层屋顶为坡屋面的，需结合建筑坡屋顶安装光伏发电系统，光伏板需与建筑屋面平行且有机结合，不得超出屋面外沿，光伏板最高点不得高过屋脊。建筑顶层屋顶为平屋面的，要求光伏板按建筑平屋面南侧起坡不高于 0.3 米的标准建设，最高点不得大于 2.2 米。
浙江省 丽水市 遂昌县	建筑为坡屋面结构时，光伏组件应顺坡安装，组件方阵表面与安装屋面的垂直高度不应超过 30 厘米，光伏板不得超出屋面外沿，最高点不得超过屋脊；建筑为平屋面结构时，光伏组件安装最高高度与屋面距离不应超过 1.5 米，应利用女儿墙等建筑构件对光伏组件进行适当围挡，保证建筑主体美观。
湖南省 岳阳市 岳阳县	建筑物的屋顶屋面为坡屋面结构的,光伏组件应当顺坡平行安装,光伏组件的最高点不得超过安装屋面的最高点光伏组件方阵表面与安装屋面的平行距离不得超过 30 厘米。建筑物的屋顶屋面为平屋面结构的，光伏组件的最高点与安装屋面的高差不得超过 2.2 米。在设有通往屋顶屋面的楼梯间的建筑物的屋顶屋面安装光伏组件

	的,光伏组件的最高点与楼梯间最高点的高差不得超过 1 米,与安装屋面的高差不得超过 4 米,且不得通过四周围蔽形成建筑使用空间。
--	--



## 六、工作建议

（一）丰富分布式光伏发电并网模式，与我省同属南网公司业务辖区的广西省，在 2021 年 10 月发布的《广西电网有限责任公司分布式光伏并网服务业务指导书》中明确指出“发电量可以全额上网、全部自用或自发自用余量上网，由客户自行选择，客户不足电量由电网提供。”而南网云南公司仅提供全部自用或余量上网两种选择，应统一服务标准，添加全额上网方式。

（二）提供经济激励措施：政府可以考虑通过补贴、奖励或减免税收等方式，参考四川、重庆、广州、江苏等地情况，建议采取电价补贴模式，补贴参考区间为 0.05 元/kwh-0.15 元/kwh。

（三）建立并细化标准化技术规范，国内光伏用电大省均已制定贴合本省发展需求的分布式光伏发电技术规范或建设标准，建议参考武汉、广州、杭州等地相关标准，建立昆明市分布式光伏建设管理要求，对于例如建设高度、并网电压等级等指标作出明确要求，确保设施的可靠性和安全性，提高发电效率。部分技术指标设置简易见本文“五”中相关内容。

（四）引入和建立成熟的商业运营模式、监管机制。引入专业的商业运营团队与分布式光伏发电设施建设用地业主方建立长效的利润分配机制和监管机制，加强对分布式光伏项目的监测、管理和维护，确保设施的正常运行和发电效益，促进和督促业主方自发自愿与分布式光伏发电设施建设运营方合作，推动分布式光伏发电设施建设。

（五）提供技术支持和培训：设立培训机构或项目，提供相关技术支持和培训，培养和提升当地的分布式光伏发电设施建设和维护人员的专业水平。

## 七、参考文献

- [1] 杨光，中信建投，《屋顶光伏打开防水新空间，跨界合作龙头最受益——BIPV 系列报告 1》，2022-02
- [2] 岳恒宇；唐笑；贾宏坤，招商证券，《BIPV 行业深度报告（一）》，2022-02-10
- [3] 庞钧文；周淼顺；石岩；国泰君安证券，《BIPV 蓝海来袭，分布式光伏风起在即——光伏 BIPV 市场分析》，2021-07
- [4] 鲍荣富；王涛；王雯，《2022 年 BIPV 发展报告：快速扩容，产业整合新时代》，2022-09
- [5] 中国光伏行业协会，《中国光伏产业发展路线图 2021 版》，2021-06
- [6] 尉凯旋；邹戈；谢璐，广发证券，《光伏建筑风起在即，BIPV 扬帆起航》，2022-04
- [7] 北极星太阳能光伏网，<https://guangfu.bjx.com.cn/>
- [8] 新华网，《我国首个“交通全场景友好型”分布式光储项目正式投运》，2022-08，[http://sc.news.cn/content/2022-08/08/c\\_1128897518.htm#](http://sc.news.cn/content/2022-08/08/c_1128897518.htm#)
- [9] 云南省人民政府，《2022 年政府工作报告》，2022-01，[https://www.yn.gov.cn/zwgk/zfxgk/zfgzbg/202201/t20220125\\_235204.html](https://www.yn.gov.cn/zwgk/zfxgk/zfgzbg/202201/t20220125_235204.html)
- [10] 中华人民共和国交通运输部，《高速公路交通工程及沿线设施设计通用规范（JTG D80—2006）》，2006-08
- [11] 中华人民共和国交通运输部，《公路路基设计规范》，2015-02
- [12] 山东市场监督管理局，《高速公路边坡光伏发电工程技术规范》，2022-06
- [13] 云南网，《突发！山体滑坡，昆明这条高速临时交通管制！城区有淹水点断交》，2022-09
- [14] 曾云川；严飞，《昆明绕城高速公路杨林隧道出口的边坡稳定性研究》，2014-08
- [15] 世纪新能源网，《七级“大风”？组件全毁，又一屋顶电站被掀翻！》，2023-02
- [16] 冯悦，《高速公路隧道（群）出入口光伏遮阳棚设计关键技术研究》，2022-04
- [17] 张晔，《分布式光伏电站系统在城市轨道交通中的应用分析[J].科技创新与应用》，2017（17）
- [18] 马岫，《论分布式光伏电站技术在轨道交通屋顶资源中的应用》，2021-11-10  
<https://www.fx361.com/page/2021/1110/9409412.shtml>
- [19] 张晔，龙源期刊网，《科技创新与应用》，2017 年第 17 期
- [20] 澎湃新闻，《雄安高铁站光伏项目实现双双“破百”》，2021-04-05  
[https://m.thepaper.cn/baijiahao\\_12059756](https://m.thepaper.cn/baijiahao_12059756)

- [21] 诚康新能源（中国）官网，《“绿色轨道交通”地铁车库屋顶分布式光伏项目》，2022-02-17，<https://cn.cmsolarcn.com/370.html>
- [22] 张国祥，《论光伏发电技术在地铁车辆段中的应用》，2018-09-22，<https://www.fx361.com/page/2018/0922/8295433.shtml>
- [23] 索比光伏网，《超级工程：大兴机场项目领跑分布式光伏新纪元，三位企业代表谈项目背后商业逻辑》，2019-09，<https://news.solarbe.com/201909/30/314876.html>
- [24] 华为官网，《全球最大空港北京大兴机场采用华为智能光伏》，2019-09，<https://solar.huawei.com/cn/news/Huawei-FusionSolar-is-used-in-Beijing-Daxing-Airport>
- [25] KE 科日光伏网，《晶"All"全应用场景系列之一——光伏+机场篇》，2021-11-15，<https://www.kesolar.com/headline/210419.html>
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部，《建筑结构荷载规范》（GB50009-2012），2012-05-28
- [27] 魏斌，《别让防水成为屋顶光伏电站的软肋》，中国建材报第 010 版，2022-04-25
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部，《屋面工程技术规范》（GB 50345-2012），2012-05-28
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部，《光伏发电站设计规范》（GB 50797—2012），2012-06-28
- [30] 昆明市发改委，《昆明市市级行政中心屋顶分布式光伏项目全容量并网投产》，2022-07-11，<https://mp.weixin.qq.com/s/y9HpYA0HGb2XBg-hV7f-6A>
- [31] 零能耗与零碳建筑，《工商业屋顶装光伏的好处居然这么多？》，2022-11-06，<https://mp.weixin.qq.com/s/jEJlcahZYGkZFR4ylI49LA>
- [32] 楚丰头条，《云南钛业“屋顶分布式光伏项目启动会”顺利召开》，2023-01-20，<https://mp.weixin.qq.com/s/AhM9vb0SAopfqhXqUm6QBQ>
- [33] 潇湘日报，《全国首例！昆明铝冶炼用上太阳能》，2022-10-11，<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1746357686570621075&wfr=spider&for=pc>
- [34] 华科微电子，《太阳能路灯工作原理图及安装示意图》，2023-03-18，[https://mp.weixin.qq.com/s/rUVpdXL2BM8z\\_vn9VKSQ6Q](https://mp.weixin.qq.com/s/rUVpdXL2BM8z_vn9VKSQ6Q)
- [35] 中国照明协会，《光伏路灯应用设计规范》，2020-10
- [36] 北京经济技术开发区官网，《走遍新城兴亦路开始安装太阳能物联网路灯》，2022-03-28，[http://kfqgw.beijing.gov.cn/cxyzkfq/yjyydlscq/lxyz/202203/t20220328\\_2640361.html](http://kfqgw.beijing.gov.cn/cxyzkfq/yjyydlscq/lxyz/202203/t20220328_2640361.html)
- [37] 乔飞；王俊生；姚舒涵；郭凯；夏鹏鹏，《光伏声屏障的发展与应用研究》，2020 年 11 期，2020-06-10
- [38] 尹忠莉，《太阳能光伏声屏障的研究》，2010-03
- [39] 王俊生；乔飞；郭凯；夏鹏鹏，《高效光伏声屏障设计研究》，2022-01-06

- [40] 王昱婷,《太阳能声屏障的性能及应用分析》,机电信息,2020年第5期,2020-07-04
- [41] 深圳市市场监督管理局,《深圳市地方标准,道路声屏障建设技术规范 DB4403/T 62—2020》,2020-05-01
- [42] 姑苏晚报,《苏州全国首创高架隔音板“双面发电”》,2015-11-27,  
[http://www.csfcw.com/UserNews/Contents\\_13498.html](http://www.csfcw.com/UserNews/Contents_13498.html)
- [43] 潇湘晨报,《全国首例!嘉兴这个高速服务区的声屏障满是“黑科技”》,2022-11-15,  
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1749492215269274750&wfr=spider&for=pc>
- [44]《十一科技用“光伏树”创造绿色财富》,国际太阳能光伏网,2017-08-22,  
<https://msolar.in-en.com/html/solar-2293416.shtml>
- [45] 全国能源信息平台,《太阳能光伏应用系列场景之“光伏树(PVtree)”》,2020-03-21,  
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1661731085589936563&wfr=spider&for=pc>
- [46] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会,《生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求 GB/T 251679-2010》,2010-09-26
- [47] 王渡;龚淼;陈德珍,《基于灰色决策的太阳能发电系统在垃圾填埋场的应用》,《太阳能学报》第34卷第3期,2013-03
- [48] 王渡;龚淼;陈德珍,《垃圾填埋场封场后的太阳能光伏发电的应用和系统设计》,《太阳能学报》第34卷第1期,2013-01
- [49] 南昌新闻网,《昔日垃圾填埋区变身光伏电站》,2022-10-19,  
[http://www.ncnews.com.cn/nwsp/ycsp/202210/t20221019\\_1886692.html](http://www.ncnews.com.cn/nwsp/ycsp/202210/t20221019_1886692.html)
- [50] 杨大禹,《云南少数民族住屋》
- [51] 国家能源招标网, <http://www.chnenergybidding.com.cn/bidweb/>
- [52] 昆明市人民政府令第160号文件《昆明市农村村民住宅建设管理办法》,2021-07
- [53]《云南省产业用地政策实施工作指引(2022年版)》
- [54] Charlie Dou;左冲;贾彦;姜露;郑丽娜,《中国农村民居屋顶分布式光伏发电的发展潜力分析》,2023
- [55] 徐立波,《渔光互补光伏发电系统设计》,2020-11
- [56] 周润,《光伏农业大棚农光两用结构处置方法研究》,2022-09-25
- [57] 河北省地方标准《农光互补项目设计特殊性》,2018-09-21,  
<https://www.renrendoc.com/paper/221665040.html>
- [58] 国家发改委,《关于2022年新建风电、光伏发电项目延续平价上网政策的通知》
- [59] 四川省发改委,《关于2022年新建风电、光伏发电项目上网电价政策有关事项的通知》
- [60] 国家发改委,《国家发展改革委关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知》
- [61] 贵州省发改委, [http://fgw.guizhou.gov.cn/hdjl/zsk/202205/t20220516\\_74074450.html](http://fgw.guizhou.gov.cn/hdjl/zsk/202205/t20220516_74074450.html)

- [62] 中国南方电网广州供电局有限公司，《广州供电局光伏指导手册》，2017-07
- [63] 河北省能源局，《屋顶分布式光伏建设指导规范（试行）》
- [64] 广州市发改委，《广州市分布式光伏发电项目管理办法》
- [65] 深圳市发改委，《深圳市分布式光伏发电项目管理操作指引》
- [66] 珠海市发改局，《关于印发进一步规范分布式光伏发电项目建设管理工作的通知》
- [67] 中山市发改局，《中山市分布式光伏发电项目建设管理暂行办法》
- [68] 武汉市自然资源和规划局，《关于建筑物顶部建设分布式光伏发电设施规划管理意见的通知》
- [69] 宜昌市自然资源和规划局；市发展和改革委员会；市住房和城乡建设局；市城市管理执法委员会，《关于建筑物顶部建设分布式光伏发电设施规划管理意见的通知》
- [70] 瑞安市发改局，《关于印发瑞安市分布式光伏发电项目管理办法的通知》
- [71] 上海上海交通大学；上海电力设计院有限公司；国网上海市电力公司，《建筑太阳能光伏发电应用技术标准》
- [72] 佛山市禅城区发展规划和统计局，《关于在建筑物楼顶搭建简易结构棚安装光伏发电设备相关规划事宜的公告》
- [73] 南康区人民政府，《南康区分布式光伏发电项目建设规范（试行）》
- [74] 庆元县发展和改革局，《庆元县分布式屋顶光伏发电项目建设规范要求（试行）》
- [75] 遂昌县自然资源与规划局，《关于遂昌县既有建筑屋顶加装太阳能光伏发电系统建设管理的通知》
- [76] 岳阳县人民政府，《岳阳县分布式光伏发电项目管理暂行办法》



## 八、附录

附表 1 工商业屋顶BIPV及BAPV系统经济性测算假设

分项	单位	BIPV 系统	BAPV 系统	备注
安装面积	m <sup>2</sup>	10,000	10,000	
屋顶更换费用	元/m <sup>2</sup>	0	150	
初始投资	元/W	4.68	3.84	
安装情况	/	上海, 25°最佳倾角, 正南向屋面	上海, 25°最佳倾角, 正南向屋面	年 1,179h 有效日照时间
首年发电量	kWh	212.22	176.85	前五年年均降低 1%, 之后年均降低 0.5%
系统年限	年	25	25 年, 期间更换 2 次屋面	
贷款		贷款占总投入 80%	贷款占总投入 80%	年利率 4.9%, 还款期 20 年, 等额本息
税费	万元	增值税 13%, 所得税 25%	增值税 13%, 所得税 25%	
年折旧费	万元	53.35	45.98	直线折旧法, 固定资产残值 5%, 折旧年限 15 年
运维费	元/w/年	0.06	0.06	
维修费	/	总投入 1%	总投入 1%	
电价	/	自用含税 0.73 元/kWh, 上网含税 0.42 元/kWh	自用含税 0.73 元/kWh, 上网含税 0.42 元/kWh	

(以上为《BIPV 蓝海来袭, 分布式光伏风起在即—光伏 BIPV 市场分析》中经济性测算假设)

附表 2 工商业屋顶BIPV系统经济性测算

年份	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
发电量(万 kWh)		212	210	208	206	204	203	202	201	200	199	198	197
累计现金流 (万元)	-168	-148	-129	-111	-94	-77	-61	-45	-30	-15	-1	13	27
累计收益 (万元)	0	142	282	421	559	695	830	965	1,099	1,233	1,366	1,498	1,629
年现金流 (万元)	-168	20	19	18	17	17	16	16	15	15	14	14	14
年收益 (万元)	0	142	140	139	138	136	135	135	134	133	133	132	13
年税费 (万元)	0	26	25	25	24	24	23	23	23	23	22	22	22
年还款 (万元)	0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
年运维费 (万元)	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
年折旧费 (万元)	0	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
年份	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
发电量(万 kWh)	196	195	194	193	192	191	190	189	198	187	186	185	184
累计现金流 (万元)	40	53	65	117	169	220	271	322	391	460	529	598	666
累计收益 (万元)	1,760	1,890	2,020	2,149	2,277	2,404	2,531	2,658	2,783	2,908	3,033	3,157	3,280
年现金流 (万元)	13	13	12	52	52	51	51	50	70	69	69	68	68
年收益 (万元)	131	130	130	129	128	128	127	126	126	125	124	124	123
年税费 (万元)	22	21	21	34	34	34	33	33	45	45	44	44	44
年还款 (万元)	31	31	31	31	31	31	31	31	0	0	0	0	0
年运维费 (万元)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
年折旧费 (万元)	53	53	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(以上为《BIPV 蓝海来袭，分布式光伏风起在即——光伏 BIPV 市场分析》中工商业屋顶 BIPV 系统经济性

测算假设)

附表 3 工商业屋顶BAPV系统经济性测算

年份	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
发电量(万 kWh)		77	175	173	172	170	169	168	167	167	166	165	164
累计现金流 (万元)	-145	-130	-116	-102	-90	-78	-66	-54	-43	-33	-22	-12	-3

累计收益 (万元)	0	118	235	351	466	579	692	804	916	1,027	1,138	1,248	1,358
年现金流 (万元)	-145	15	14	14	13	12	12	11	11	11	10	10	10
年收益 (万元)	0	118	117	116	115	113	113	112	112	111	111	110	110
年税费 (万元)	0	21	20	20	19	19	19	19	18	18	18	18	18
年还款 (万元)	0	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
年运维费 (万元)	0	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
年折旧费 (万元)	0	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
<b>年份</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>
发电量(万 kWh)	163	162	162	161	160	159	158	158	157	156	155	154	154
累计现金流 (万元)	7	16	24	67	109	152	193	235	293	350	408	465	521
累计收益 (万元)	1,467	1,575	1,683	1,790	1,897	2,004	2,109	2,215	2,319	2,424	2,527	2,630	2,733
年现金流 (万元)	9	9	9	43	42	42	42	41	58	58	57	57	57
年收益 (万元)	109	108	108	107	107	106	106	105	105	104	104	103	103
年税费 (万元)	17	17	17	28	28	28	28	27	37	37	37	37	37
年还款 (万元)	27	27	27	27	27	27	27	27	0	0	0	0	0
年运维费 (万元)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
年折旧费 (万元)	46	46	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(以上为《BIPV 蓝海来袭，分布式光伏风起在即——光伏 BIPV 市场分析》中工商业屋顶 BAPV 系统经济性测算假设)

附表 4 云南省各州市光伏电站最佳安装角度、峰值日照小时数、每瓦首年发电量及年有效利用小时数

省份	城市	安装角度 (°)	峰值日照小时数 h/day	每瓦首年发电量(kWh)/W	年有效利用小时数 (h)
云南	昆明	25	4.4	1.271	1,268.74
	曲靖	25	4.24	1.224	1,222.6

	玉溪	24	4.46	1.288	1,286.04
	丽江	29	5.18	1,494	1,493.65
	普洱	21	4.33	1.25	1,248.56
	临沧	25	4.63	1.335	1,335.06
	德宏	25	4.74	1.367	1,366.78
	怒江	27	4.68	1.35	1,349.48
	迪庆	28	5.01	1.446	1,444.63
	楚雄	25	4.49	1.296	1,294.69
	昭通	22	4.25	1.225	1,225.49
	大理	27	4.91	1.416	1,415.8
	红河	23	4.56	1.314	1,314.88
	保山	29	4.66	1.344	1,343.71
	文山	22	4.52	1.303	1,303.34
	西双版纳	20	4.47	1.291	1,288.92

(以上为阳光工匠光伏网测算数据)