

**美国第一太阳能公司碲化镉光伏电池技
术工艺与环境影响评估建议研究报告**

第一篇

美国第一太阳能公司碲化镉 (CdTe) 组件生命周期内的安全性及与其它能源 的比较

目录

0、前言	1
1、碲化镉光伏电池生命周期内的安全评估	1
1.1 碲化镉毒理性分析	1
1.2 碲化镉组件生产的安全性	3
1.2.1 正常运转下的员工安全性	3
1.2.2 突发事件下工作人员的安全性	7
1.3 碲化镉组件使用过程的安全性	8
1.3.1 正常使用下的安全性	8
1.3.2 可预见意外下的安全性	8
1.4 碲化镉组件生命终期处置的安全性	10
1.5 碲化镉组件生命周期的镉排放	12
2、使用碲化镉光伏组件的效益评估	15
2.1 使用碲化镉光伏组件发电是一种有效的控制镉污染的方法	15
2.2 碲化镉光伏组件有大规模应用潜力；	16
2.2.1 碲化镉组件具有良好的碳足迹及能量偿还期	16
2.2.2 质量可靠性良好	17
2.2.3 温度系数较低	18
2.2.4 碲的供应量可满足碲化镉组件的大规模生产	18
3、结论	19
4、建议	20

0、前言

本课题为应第一太阳能（First Solar）公司的邀请和资助，在中国可再生能源协会领导下开展的同行审查。该课题的主要目的为对第一太阳能（FS）公司的CdTe光伏技术进行全生命周期的安全性、发电效益以及环境、健康和安全的(EHS)评估。评估专门小组成员由来自中国科学院电工研究所和中华环保联合会的共五位专家组成。中国科学院电工研究所是国家科研机构，中华环保联合会是国家环境保护部主管的社会团体，小组成员也均未与First Solar之间存在直接利益关系。来自中国科学院电工研究所的两位专家的所属领域为化合物薄膜和晶硅光伏器件及材料研究，来自中华环保联合会的三位专家的所属领域为环境影响评估。

本课题分为第一部分—碲化镉光伏技术的全生命周期安全性、发电效益评估和第二部分—的环境、健康和安全的评估。此报告为第一部分。课题涉及的资料来源仅由两部分构成：

- 1) FS提供的第三方公开发表的关于CdTe和CdTe光伏生命周期的EHS的文献，以及未公开发表的FS公司内部统计数据，内容涉及碲化镉组件生命周期的潜在环境、健康和安全的风险及碲化镉光伏组件的发电特性。
- 2) FS公司马来西亚Kulim 6号工厂的现场参观和与工厂相关负责人的交流，内容包括：
 - 参观CdTe组件的制造和回收流程；
 - 参观组件的质量可靠性实验室；
 - 参观FS公司的污水处理站；
 - 听取FS公司在EHS工作方面所做努力

所有客观数据均来自FS，并由FS保证提供资料的真实有效性。

1、碲化镉光伏电池生命周期内的安全评估

1.1 碲化镉毒理性分析

很长时间以来碲化镉的毒理性都参照其母体元素镉的单质。单质镉为剧毒元素，可引起肝肾等的损害，还可引起身体钙的流失导致“痛痛病”，长期接触还可致癌。碲化镉是镉的一种化合物，但性质最稳定，具有非常强的结合键能，熔

点达到 1041℃，在水中不溶，可能和酸发生反应，在各种酸溶液、各种 pH 值条件下溶解度的数据有限(S. Kaczmar, 2011)。事实上使用所谓的“交叉参照”方法从其单质元素（镉）来判断碲化镉的毒理学是最保守的做法，但不一定符合客观实际，因为实验结果表明碲化镉的物理和化学特性与镉及其它镉化合物非常不同。

碲化镉化合物非常稳定，它和其它几种镉化合物的比较见表 1。除镉外，在镉的几种化合物中包括氢氧化镉、氯化镉都是致癌物，但碲化镉的致癌性还未见研究结果。

Zayed 等人 (Zayed.J, 2009)评估了大鼠吸入和吃入CdTe的毒性，发现半数致死浓度和剂量比单质镉高三个数量级。Chapin (1994)的CdTe对雌性和雄性老鼠的繁殖影响实验结果说明影响未达到可探测级别。S. Kaczmar (2011)对碲化镉的毒性做了较详细的研究，主要结论包括：在细菌回复突变实验中CdTe未发现引起遗传突变的诱变活性，而之前研究中 (Ochi and Ohsawa, 1983; Oberly et al., 1982)发现镉在实验中具有了诱变活性。并且模拟胃酸 (PH值为1.5)环境测试对CdTe的生物利用度进行的评估结果发现每克CdTe产生11 mg的镉，约1%；相比之下，氯化镉的数值为100%。碲化镉对斑马鱼的急性水生动植物毒性研究表明在水饱和度下对鱼没有毒性（致命或间接致命）作用。整体来说，CdTe不同于镉，在以上的几个研究领域内都表现出了很低的毒性。

表 1 几种镉化合物特性对比 (V.M. Fthenakis 2004)

化合物	温度 (熔点, °C)	温度 (沸点, °C)	溶解度 (克/L)	致癌物
镉(Cd)	321	765	不可溶	是
氢氧化镉(Cd(OH) ₂)	300	—	2:6 x10 ⁻³	是
碲化镉(CdTe)	1041	—	不可溶	未知
硫化镉(CdS)	1750	—	1x10 ⁻³	可能性较大
氯化镉(CdCl ₂)	568	960	1400	是

由此可见，碲化镉化合物与单质镉的物理性质和毒理性都有明显区别，应区分对待。另外需要指出的是，关于碲化镉毒理性的研究还无人类相关数据，碲化镉的致癌性也无研究结果。

1.2 碲化镉组件生产的安全性

1.2.1 正常运转下的员工安全性

FS 从投入碲化镉组件生产开始一直奉行“安全第一，以人为本”的企业理念，制定了严密管理措施以防止生产过程镉化合物对员工及环境造成影响。FS 坚持采集检测生产环境空气中镉含量，保证工人工作环境安全性。同时对有潜在暴露于含镉粉尘可能的员工进行定期医学监测，有超过 10 年的生物测试数据，员工血镉和尿镉¹值一直在正常值范围内，并且很低。

CdTe 组件生产过程中可能会造成含镉粉尘暴露在空气中。在马来西亚 Kurlim 生产线实地考察过程中，专家组观察到 FS 采用空气污染控制设备来尽可能的避免镉粉尘在空气中的泄漏，在相关的生产工序附近采取了局部排风处理设施，且配备有严格的高效颗粒过滤器（HEPA）来处置含镉粉尘，同时对工人采用了必要的安全防护装置。针对镉暴露问题，不同国家和机构都设定了职业暴露极限值（OEL²）（表 2）。而 FS 公司执行的内部标准比当地的 OEL 更严，当空气中总镉浓度或小颗粒镉浓度分别达到 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 及 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时必须采取行动。

表 2 不同机构的针对镉的职业暴露极限值（OEL）

	美国	US-ACGIH (美国政府工业卫生学家会议)	马来西亚	First Solar
8 小时 OEL(总镉 ³)	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
12 小时 OEL (总镉)	2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
采取措施级别 (总镉)	2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 8 小时 1.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 12 小时	无	无	1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
8 小时 OEL(小颗粒镉 ⁴)	无	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
12 小时 OEL	无	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

¹ 尿镉水平是检测长期镉暴露结果的主要指标，无法准确指示近期镉暴露结果；相反，血镉水平是检测近期镉暴露结果的主要指标， β -2 微球蛋白水平是次要指标。如果检测出低分子量蛋白质（如 β -2 微球蛋白）排泄物，则说明肾脏功能出现异常。

² OEL（职业暴露极限）：相关机构设定的在一定时间（时间加权平均）内工人可以不带呼吸保护装置可以暴露的镉浓度极限值

³ 所有尺寸的镉颗粒

⁴ 小于 10 μm 镉颗粒

(小颗粒镉,)				
采取措施级别 (小颗粒镉)	无	无	无	0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

马来西亚 Kulim 工厂对厂区内空气中含镉浓度进行了定期监测, 监测内容包括工厂环境样本及员工个人样本。工厂环境样本为在工厂特定位置测试的环境大气含镉浓度, 表征特定区域空气含镉浓度; 员工个人样本为员工随身携带的空气收集泵所测试的大气含镉浓度, 表征员工 8 小时或 12 小时工作期间接触环境的含镉浓度。FS 监测的工厂环境样品的平均含镉浓度长期在 $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下(图 1), 远未达到采取措施的 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 员工个人样品监测数据显示不同工序的镉暴露风险不同, 半导体沉积工序及 CdCl_2 喷涂与烘烤工序的镉暴露风险最大, 可达到近 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 但仍低于 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 FS 公司内部标准 (图 2)。

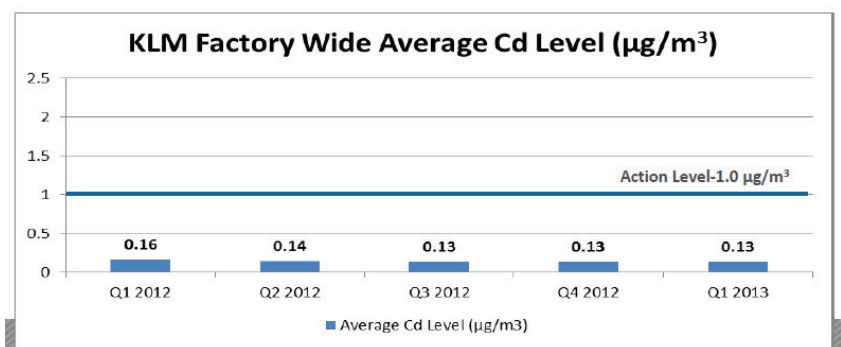


图 1 马来西亚 Kulim 工厂空气中平均镉浓度历史值 (First Solar 公司提供)

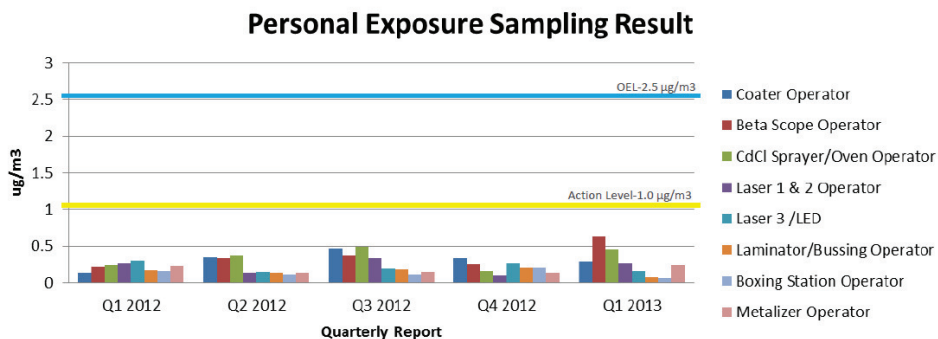


图 2 马来西亚 Kulim 工厂不同工序工人的镉暴露浓度 (First Solar 公司提供)

根据 FS 的记录, 唯一超出 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的制造活动是半导体沉淀设备的维护(John R. Bohland, 2000 年)。FS 高速气相输运沉积工艺的半导体原料利用率很高, 但目前尚不太可能将全部输入原料沉积在玻璃基板上。随着时间的推移, 沉积室部件上会覆盖少量硫化镉和碲化镉半导体, 需要进行清理。清理过程中工作人员穿

着配有高效颗粒过滤器（HEPA）的呼吸保护设备来保护自己，避免在设备维护过程中吸入含镉粉末。

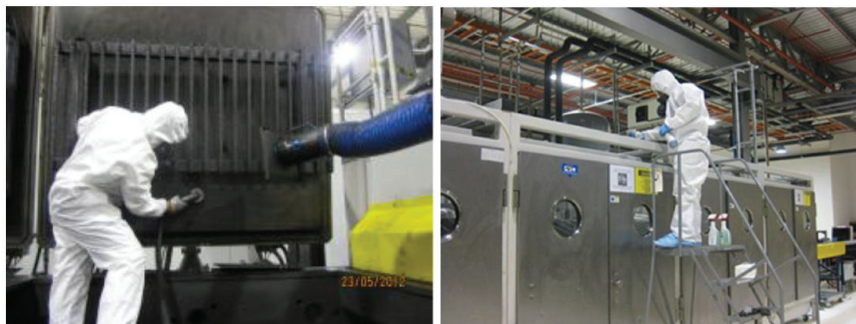


图 3 半导体沉积设备维护时工作照片（First Solar 公司提供）

FS 有超过 5 年的员工生物测试结果，测试由第三方⁵完成。马来西亚国家职业安全与健康标准（OSHA）规定员工体内血镉浓度及尿镉浓度的上限分别为 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 和 3 $\mu\text{g}/\text{g}$ ^[6]。

FS 对企业内所有员工进行定期血镉和尿镉浓度的监测。马来西亚 Kulim 工厂 2007-2012 年连续 6 年对超过千名员工进行血镉和尿镉浓度监测，发现其值远远低于 OSHA 规定的上限值（图 4）。需要说明的是，2011 和 2012 年统计数据仍在处理中，未能提供给本次报告使用。

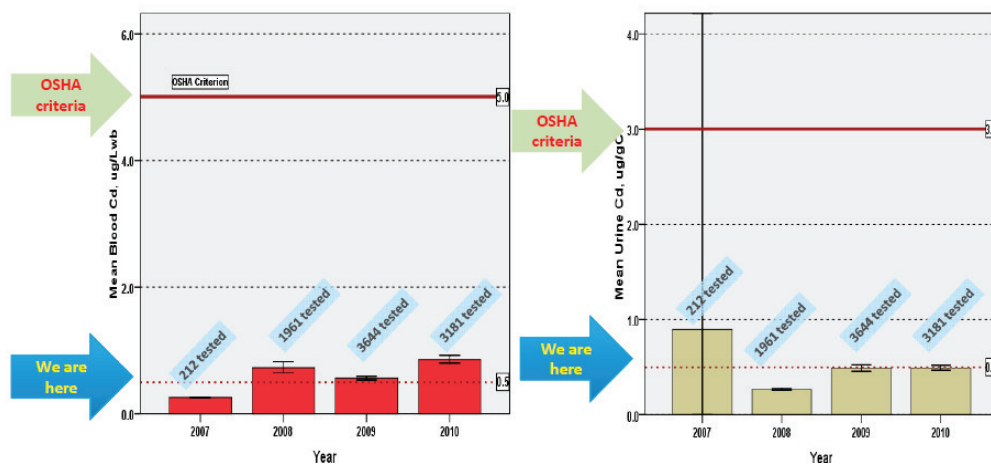


图 4 马来西亚 Kulim 工厂员工连续 5 年平均血镉及尿镉值（FS 公司提供）

如上文图 2 所示，半导体设备维护人员及 CdCl_2 喷涂与烘烤人员的工作岗位属于镉暴露浓度最高的工种，Kulim 工厂挑选出这两个环节的几位员工的血镉及

⁵ Universiti Sains Malaysia Centre for Advanced Analytical Toxicology Services (CAATS)

⁶ 马来西亚正常值范围是：血镉 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ ，尿镉 3 $\mu\text{g}/\text{g}$ （肌酐）。

尿镉个体样本结果显示，这些员工的两个监测结果均低于规定的极限（蓝色虚线）。

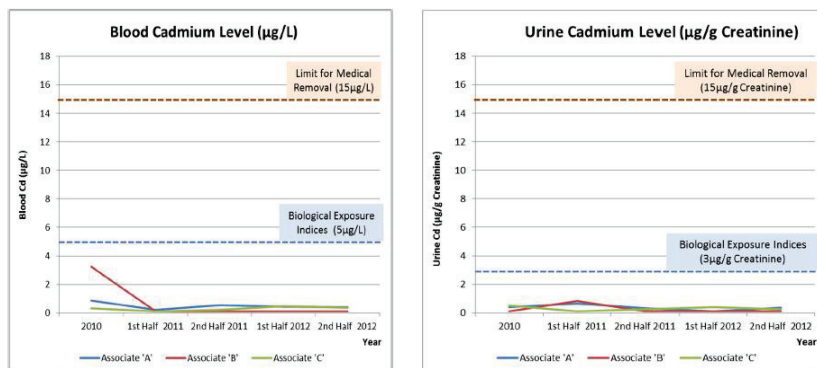


图 5 半导体沉积设备维护工作人员的血镉和尿镉值检测（FS 公司提供），每 6 个月进行一次血镉及尿镉的检查。

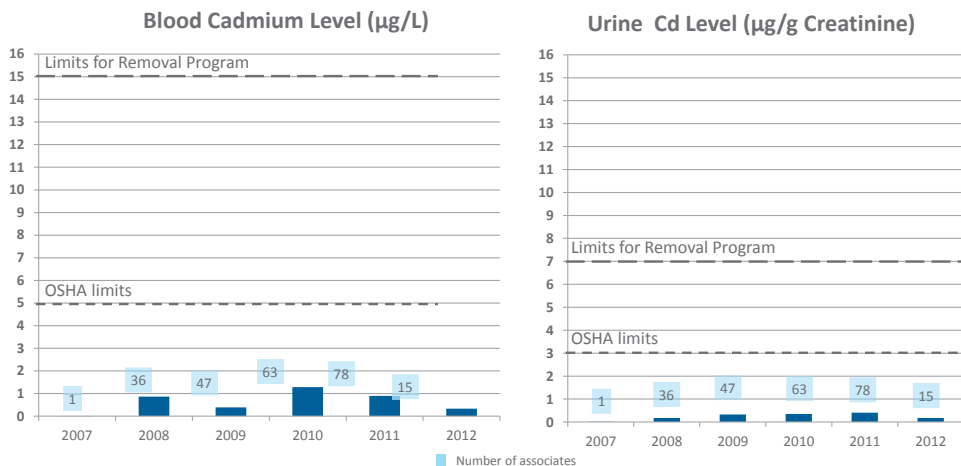


图 6 CdCl₂ 烘烤炉工作人员血镉和尿镉检测值（FS 公司提供），2012 年之前每年检测一次，2012 年开始每 3 年检测一次。

另外 FS 的常年监测发现吸烟也会造成人体镉含量升高。FS 对比了入职前（1253 人）和入职后（2458 人）中吸烟者和不吸烟者的血镉及尿镉值，发现吸烟者的血镉值明显高于不吸烟者，但入职前后员工的血镉和尿镉未发生明显变化。

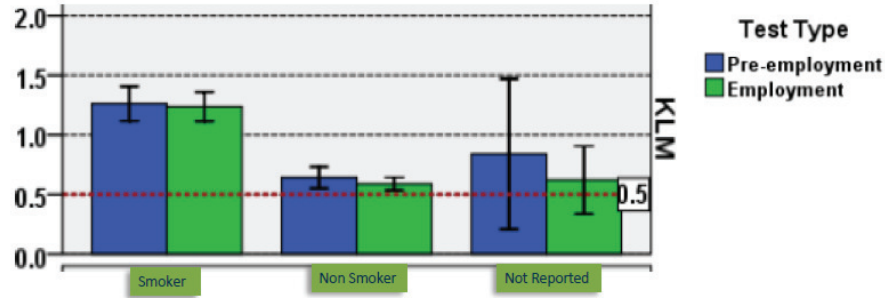


图 7 入职前和入职后吸烟者和不吸烟者的血镉值对比 (FS 公司提供)

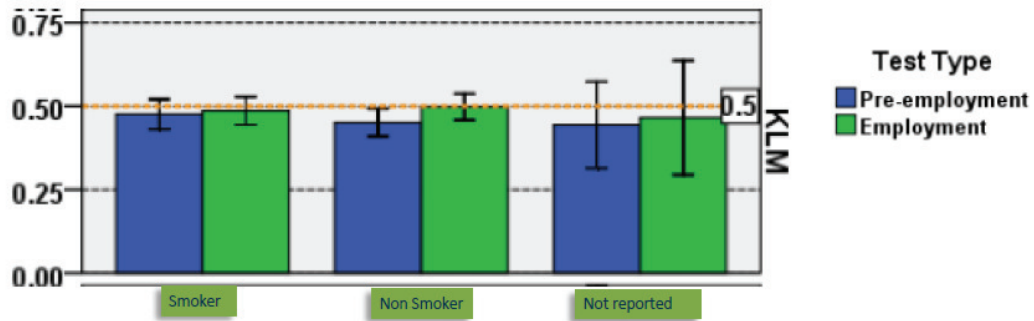


图 8 入职前和入职后吸烟者和不吸烟者的尿镉值对比 (FS 公司提供)

1.2.2 突发事件下工作人员的安全性

FS CdTe 组件生产工厂需引起关注的安全隐患为镉化合物暴露于工作环境中,但由于镉化合物的沉积主要发生在密闭的真空腔体内,从原理上来说,正常生产运行时发生泄露的可能性很小,这是由 CdTe 的物理性质决定的;这也得到了工厂实际检测数据的支持(见图 1 和图 2)。在真空环境中温度高于 300°C 时, CdTe 会升华,从固态直接变成气态;但是温度低于 300°C,或者环境气压升高时升华迅速减弱,直至凝聚,由气态直接变成固态。同时 150°C 时, CdTe 的饱和蒸汽压只有 10^{-11} Pa。在常温、常压下 CdTe 几乎不可能以气态存在。这些物理性质保证了 CdTe 薄膜制备过程中的安全性,一旦设备的真空或高温环境被破坏, CdTe 蒸汽凝结成固体颗粒附着在腔壁或管壁上,不易以气体形式扩散,进而进一步降低了镉暴漏的可能性。FS 同时在所有可能产生含镉粉尘的设备上使用了 HEPA 过滤器将生产环境的 Cd 含量控制在公司内部标准以下。FS 对每个 HEPA 过滤器在使用前都采取检漏措施以确保其正常运行。

对于意外情况,FS 制定了整套镉泄露的处理措施,将可能的镉对人体及环

境的影响降至最低。FS 工厂为确保员工工作安全，针对意外受伤、火灾、用电安全、化学药品管理等制定了管理规范。FS 通过了健康安全管理体系 OHSAS18001 认证。

1.3 碲化镉组件使用过程的安全性

1.3.1 正常使用下的安全性

CdTe 薄膜太阳能电池组件在正常使用时，由于 CdTe 熔点高、蒸汽压低并且不溶于水，因此正常使用条件下，CdTe 组件无蒸汽或尘埃排放。而且 CdTe 组件中所有含镉的化合物都密封在两块 3 mm 厚的玻璃之间，暴露在外界的可能性十分小。因此，碲化镉组件在正常使用过程中不会造成任何镉排放，镉将一直被很好的密封在组件中，直到组件生命终期。而且 CdTe 组件的这种封装结构并非环保的要求，而是基于保持产品性能和稳定性的要求做出的技术选择。

1.3.2 可预见意外下的安全性

在碲化镉组件正常使用过程中镉暴露的可能性主要出现在意外情况下。本报告回顾了针对火灾及组件破裂两种情况下碲化镉组件中镉泄漏的学术研究结果。

布鲁克海文国家实验室研究了一定条件下火灾对双面玻璃结构的碲化镉组件的作用 (V. M. Fthenakis, 2005)。在研究中，组件被划成 25×3 厘米样片，按照美国材料与测试协会 (ASTM) 的“建筑结构和材料的防火测试 E119-98 标准”及美国保险商实验室 (UL) 的“屋顶结构防火测试 UL 1256 标准”进行测试，将样本暴露于 760~1100℃ 温度下 30 分钟至 3 小时。在这些试验中，绝大多数镉留在了熔融的玻璃中 (图 9)，只有极少的 (镉含量的 0.4~0.6%) 镉被释放到空气中 (表 3)。镉释放易发生于上下两块玻璃^[7]熔合前的边缘开口。对实际组件而言，由于边缘长度和面积的比例更低，可能释放出更少的镉，小于镉含量的 0.04%。

表 3 不同温度下测试样品的损耗重量

批次	温度 (°C)	重量损耗 (% 样品)	镉释放		碲释放	
			(g/m ²)	(%镉含量)	(g/m ²)	(%碲含量)

⁷ FS 组件都为双面玻璃结构

1	760	1.9	0.056	0.6	0.046	0.4
2	900	2.1	0.033	0.4	0.141	1.2
3	1000	1.9	0.048	0.5	1.334	11.6
4	1100	2.2	0.037	0.4	2.680	22.5

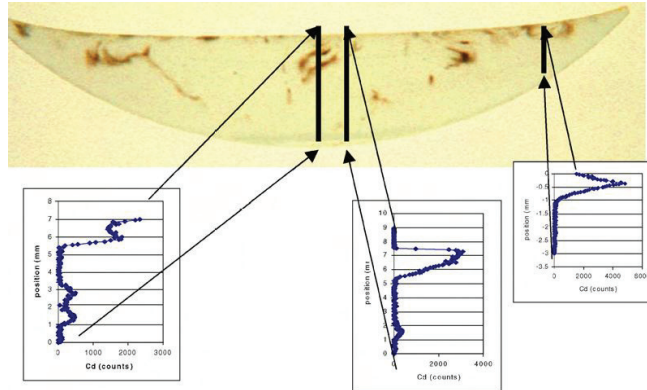


图9. 1100°C燃烧温度下样品中心垂直切片的X射线荧光微探针分析，给出了样品中心和边缘处的镉计数值

Bavarian 环境保护实验室利用 VDI3783 模型计算了火灾中释放镉的分布 (Beckmann and Mennenga 2011)。假设最坏的情况，组件中所有的镉都以镉烟尘的形式释放出来，在极端假设条件下[最大面积 (1000m²)、最大碲化镉含量 (66.4g/m²) (高于目前 FS 组件中镉含量数倍) 和最短排放距离 (100m)]下计算的镉排放浓度为 0.66 mg/m³，该值远低于 AEGL-2⁸的镉评估值。因此研究认为当碲化镉组件置于火灾中时，不太可能对周边人群造成严重的健康危险。

另外，碲化镉组件在25年寿命期内的破损率为1% (平均0.04%/年) (Sinha, P., Balas, R., et al, 2012)，而其中的1/3发生在运输和安装过程中，这部分的破损会立刻被收集并回收。其中80%的破损是由于玻璃的内应力和冲击造成的破损。据 FS 认定，由于组件在两层玻璃之间使用了层压材料，这些破损造成的结果以玻璃裂纹为主，这些裂纹所占整个组件的面积非常小，因此破损情况下镉可能暴露在空气中面积很小。

当然在组件破损时，若发现不及时或回收程序采取不及时，组件中的碲化镉

⁸ AEGL: 急性暴露指导水平。AEGL-2 指在此级别内将引发普通人群不可逆的或严重的身体损害。

也有可能暴露出来,有随雨水进入土壤并随扬尘进入大气的风险。针对这种情况, Sinha P. (Sinha, P., Balas, R., et al, 2012) 通过分析镉的归宿及转移机制, 评价了在商用建筑物应用场合中, 因破损的碲化镉 (CdTe) 薄膜太阳能电池被雨水淋洗而从中释放出镉 (Cd) 造成的潜在暴露风险。按平均0.04 %/年的组件破损几率, 并假设破损组件中所有镉全部释放的最糟情况, 建立了破损太阳能光伏电池渗滤模型, 并采用住宅筛查标准评价了这种渗滤对现场工作人员及周边居民的潜在健康影响。研究结果认为在商用建筑物应用场合中, 因破损的太阳能光伏电池被雨水淋洗而从中释放的镉造成的潜在暴露风险, 几乎不可能对现场工作人员及周边居民构成潜在的健康风险。

1.4 碲化镉组件生命终期处置的安全性

FS 目前针对碲化镉组件的质量保质期为 25 年。碲化镉组件运行超过质保期若干年后达到生命终期正常报废, 以及少部分组件由于各种原因未达到质保期非正常报废, 或者组件生产过程中由于质量不合格报废, 都需要进行合适的处置。可能的处置方式有: 进入垃圾填埋场、进入垃圾焚烧炉或被回收重新利用。

根据美国 EPA 有害元素渗滤试验 (TCLP) 的结果 (Wegmann, 2011 年), 镉浸出量低于 1 mg/L, 可按一般固体废物处置。实验条件为废旧碲化镉组件被破碎成 1 cm 的碎片, 然后浸泡在醋酸/醋酸钠溶液 (pH 值 2.8-4.93) 内, 并不断搅动达 18 小时。需要指出的是, 根据中国的危险废物浸出实验标准, 需要在硝酸/硫酸溶液环境中进行浸出实验。FS 目前尚无中国危险废物浸出实验结果。如果碲化镉组件进入垃圾焚烧炉, 理想情况下可能仅仅 5 g/kg 的镉被释放出来, 剩余的镉被封在熔融的玻璃中对环境不再造成污染 (Marco Raugai, 2012)。

但是 FS 针对到达生命周期结束的碲化镉组件建立了健全的回收机制。FS 建立了业内首个全面的预付费的回收与再利用系统, 在产品 30 年的使用周期结束后, 所有组件将被收回, 玻璃板拆开, 中间的金属取出, 所有材料被重新回收并用于新产品的制造。所有预先支付的金额都由一个独立运作的第三方进行管理, 并负责未来寿命到期组件的拆卸、收集、运输和回收的全部费用。除此之外, 2013 年起回收还可通过回收服务协议实现。在欧盟, 在报废电子电气设备指令 (WEEE 指令) 要求下, B2C 模式下销售的光伏组件的回收可能通过共同责任机制提供回收资金。在共同责任制中, 光伏制造商对共同基金付费来保证收集和回收服务,

并购买保险来预防企业破产对回收造成的影响。值得一提的是，在托管有效融资机制时，WEEE 指令区分 B2C 模式和 B2B 模式。在 B2B 模式中，回收所需资金需通过企业之间签订的合同协议来筹集。我们认为在中国由政府或行业协会来监管的 B2C 更适合中国国情。

在技术工艺方面，FS 已建立比较成熟的回收工艺，其回收流程如图 10 所示。

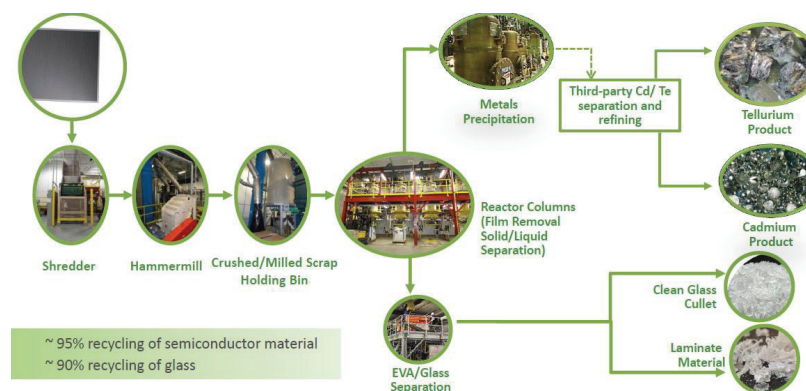


图 10 FS 公司的碲化镉组件回收流程图

- 1) 生命终期组件或生产过程中破碎及不合格组件运往组件回收车间。
 - 2) 粉碎：进入粉碎机将组件粉碎。
 - 3) 锤式粉碎：进入锤式粉碎机将破碎的组件进一步磨碎成 4-5mm 大小的碎片，使组件有足够大的边缘进行下步反应。
 - 4) 贮存罐
 - 5) 反应：破碎后的组件碎片放入筒状滤出反应器中，加入强酸，确保组件中的半导体材料与酸充分反应；同时实现固液分离，液态为富含金属的酸性溶液，固体为 EVA 和玻璃。
 - 6) 金属沉淀：含有大量金属的液体被泵入贮液罐中沉淀，金属在高 pH 值溶液中被分三步沉淀；
 - 7) 第三方处理：沉淀的金属通过压滤成为富含镉、碲的滤饼，被送往第三方处理提纯出镉和碲。最高 95% 的金属被回收实现再次利用。
 - 8) EVA/玻璃分离： EVA 和玻璃分离
 - 9) 玻璃回收：玻璃被清洗去除残留镉及碲，清洗干净后的玻璃干燥后用于第三方回收使用。近 90% 的玻璃可被回收利用于新玻璃的制造。
 - 10) EVA 收集：EVA 被收集按照当地固废处置标准处置。
- 通过组件回收，大部分组件重量都被回收，包括~95%的碲化镉及~90%的玻璃。

金属碲和镉的回收，有效的减少了镉排放对环境的影响，保证了组件在生命终期后仍对环境安全。

FS 的组件回收还具有多重益处，一是可以降低镉对环境的影响；二是减少了填埋对土地的占用和焚烧对环境的污染；三是通过回收有用材料有利于降低碲化镉生命周期的能源消耗和 GHG 排放（Sinha, P., M. Cossette, et al, 2012）；四是在未来碲化镉组件需求增大后有利于缓解对稀有资源一碲的需求（M. Marwede and A. Reller, 2012）。

在组件回收处理过程中，FS 做了完备的安全处理措施，针对大气排放有高效颗粒过滤器（HEPA）及酸性气体喷淋涤气装置。废水统一送入工厂废水处理系统，达到当地排放标准后排放，因此正常情况下回收处理环节也不会造成镉对环境的污染。

1.5 碲化镉组件生命周期的镉排放

与镉有关的碲化镉光伏组件生命周期可分为几个环节：镉的开采、镉的提纯、碲化镉制造、碲化镉组件制造、碲化镉组件运行、碲化镉组件生命终期处置。

根据 Fthenakis（Fthenakis, 2004）锌开采导致的镉排放总量的 0.58%可归属于金属镉。

根据 Fthenakis（Fthenakis, 2004）研究结果，镉提纯和碲化镉制造技术基本均属专利技术，涉及企业数量较少，行业资料显示产生的镉粉尘均经过高效过滤器（HEPA）处理后向大气排放，两环节向大气中的镉排放都为 6g/吨（镉）。

在组件生产和回收环节，FS 采用了大量的措施确保生产过程镉排放远低于国家标准值，确保将生产回收环节可能导致镉污染的风险降至最低。FS 的碲化镉组件制造采用气相输运法（Vapor Transport Deposition）在密闭的腔体内进行碲化镉及硫化镉薄膜的沉积，生产薄膜厚度非常薄，在 3 微米以下，整个组件（0.72 m²）中含有的镉重量仅有 6g（Sinha, P., M. Cossette, et al, 2012）。生产环节产生的含镉废气均经过高效过滤器（HEPA）处置后排放。高效过滤器（HEPA）对最难过滤的 0.3 μm 的粉尘的过滤效率高达 99.97%，因此排入大气中镉的量为 0.4 mg/kg（镉）（Raugei and Fthenakis, 2010）。生产线产生的含镉废水在同一厂址的污水处理厂中处理，使用金属沉淀法与离子交换法将镉离子去除，并每天检测

排放前的含镉废水中镉的浓度，使用 ICP 方法检测。如果达标则可排放，如果没有达标则返回重新处理。正常生产时的排放废水浓度为 0.01~0.015 mg Cd/L，低于马来西亚政府规定值 0.02 mg/L。在固体废物方面，主要产生的危险固体废物为受镉污染的个人防护器具及废弃的过滤片（John R. Bohland, 2000 年）。在大规模生产的工厂，危险固体废弃物还包括废水处理产生的污泥。这些固体含镉废物将统一按国家对危险废物的处置要求处置。沉积腔室维修产生的碲化镉固体废物统一交送第三方处理来回收碲和镉。

1) 大气中镉直接排放量

根据 Fthenakis 的研究结果（Fthenakis, 2004），碲化镉组件全生命周期的大气镉排放见表 4。每使用 1 吨镉来制造 CdTe 光伏组件仅排放 15.25 g 镉，或 CdTe 光伏组件每发 1 GWh (=1 兆度) 电排放 19.8 mg 镉，镉的大气排放量极低。

表 4 碲化镉光伏组件生命周期内镉的大气排放

流程	空气排 放(克镉 /吨镉)	归属 (%)	空气排放		
			(克/吨 (镉))	(毫克/平方 米)	(毫克/GWh)
1. 锌矿开采	2.7	0.58	0.0157	0.0001	0.02
2. 锌冶炼/精炼	40	0.58	0.2320	0.0016	0.3
3. 镉提纯	6	100	6	0.042	7.79
4. 碲化镉生产	6	100	6	0.042	7.79
5. 碲化镉光伏组件制 造	3	100	3	0.021	3.9
6. 碲化镉组件运行	0	100	0	0	0
7. 碲化镉光伏组件生 命周期处置/回收	0	100	0	0	0
全部排放			15.25	0.11	19.8

假设：

1. 锌矿开采每吨矿产生 30 克灰尘。
2. 锌冶炼/精炼每吨锌产生 0.2 克镉。。

3. 锌矿中锌镉含量之比为 200。
4. 锌矿中镉平均浓度为 220ppm。
5. 光伏产品制造尾气流中用 HEPA 过滤器收集亚微米级微粒的效用为 99.97%。
6. 单位镉对应组件发电量计算基于：
 - 7 克镉/平方米组件
 - 光伏产品 10%光电转换效率（2012 年该平均效率达到 12.7%）
 - 美国平均日照（1800 千瓦时/平方米/年）
 - 30 年光伏组件寿命预期，因此
 - 光伏产品整个寿命期内 1 千克镉产生 0.77 吉瓦时（兆度）电能

2) 废水中镉直接排放量

Raugei 等人的研究内容（Raugei and Fthenakis 2010）给出的镉的污水排放量总结在表 5 中。CdTe 组件制造全生命周期内，主要的含镉污水产生在回收阶段。

环节	镉开采	镉提纯、 碲化镉加工、 碲化镉制造阶段	使用阶 段	回收阶 段	总计
废水中镉 排放量	0	0.3mg/m ²	0	1 mg/m ²	1.3 mg/m ²

3) 固体废物中镉直接排放量

现有资料对固废中镉的排放量研究较少。Raugei 等人的研究结果（Raugei and Fthenakis 2010）认为目前还没有碲化镉光伏制造厂将镉排放到土壤中。John R. Bohland 等认为主要产生的危险固废为受镉污染的个人保护设备及废弃的过滤设备，但大规模生产的工厂还需包括废水处理产生的污泥。即便如此，仍然低于 1000 kg/月。

4) 碲化镉生命周期镉排放总量与其它能源的比较

Fthenakis 等（Fthenakis, 2008）的研究结果表明，比较不同能源发电的完整生命周期镉排放（包括直接和非直接镉排放）发现碲化镉光伏发电的镉排放是非常低的，每发电 1 GWh 向空气中排放 0.3 g 镉，远远低于石油发电的 43.3 g，

煤炭发电的3.1g，甚至低于单晶硅和多晶硅的0.9g。其中石油和煤炭的镉排放来源于石化燃料本身所含的镉，而晶硅光伏的排放主要来自使用电网电力通过火电产生的间接排放。需要指出的是，在碲化镉全生命周期中，镉的直接排放远低于间接排放，直接排放由碲化镉的材料提纯、合成、组件生产、运行及回收几个环节的镉排放构成，排放量只有0.02 g/GWh，而间接排放，包括生产玻璃、封装材料、BOS及组件制造过程的耗电造成的间接镉排放，高达0.28 g/GWh。需要指出的是，该文引用的是美国电网配比的数据，其中火电仅占44%；而在中国这个比例比美国更高，结果会稍有不同，但主要影响间接排放。

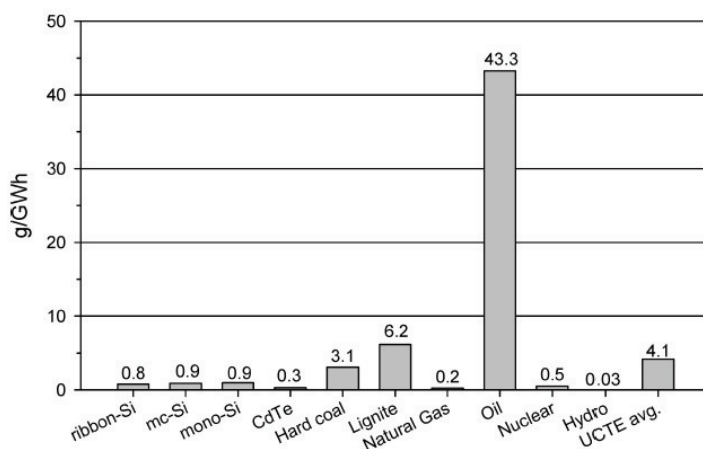


图11 几种发电方式的的生命周期大气镉排放（光伏系统发电量统一按照1700KWh/m²/年、系统效率0.8，寿命30年计算，都考虑了BOS造成的间接镉排放）

2、使用碲化镉光伏组件的效益评估

2.1 使用碲化镉光伏组件发电是一种有效的控制镉污染的方法

镉主要作为锌生产的副产品被生产出来。因为锌的产量很大，所以作为副产品镉的产生量也很可观。这些镉或者需要寻找到有益用途，或者必须按照国家相关规定进行处置，通常的处置方式是用水泥粘合填埋、贮存以备将来使用。最理想的情况是将镉应用于一种低消耗性⁹应用中，既降低镉排放到环境中的风险又产生额外附加值。碲化镉光伏组件可视为一种低风险、可持续的、理想的镉应用方式。原因有三方面：1) 碲化镉光伏组件属于镉的低消耗性应用。镉在使用过程中以稳定的CdTe化合物形式存在，且完全密封，生命终期时可完全回收（FS

⁹ 镉扩散至环境中的程度非常低，产品中的镉可被有效的循环利用

建立了完备的碲化镉组件回收机制)；2) 和其他应用相比对环境的影响更低。在镉的四大用途中(镍镉充电电池：82%，颜料：10%，电镀：6%、塑料稳定剂：1.5%) (UNEP, 2006； ICDA, 2005)，碲化镉光伏组件和镍镉电池都属于低消耗性应用，(镍镉电池至少在原则上可实现百分之百回收)。颜料、电镀和稳定剂属于高消耗性应用，在此类应用中镉会散逸，从而不可避免产生镉污染。和镍镉电池相比，碲化镉组件使用的碲化镉比镍镉电池使用的Cd(OH)₂从溶解性、熔点、沸点来说都更稳定，并且由于体积比较大生命周期结束后比镍镉电池更易于集中处置。3) 最主要的是碲化镉组件还可利用太阳能产生电能；这将有效减少对常规能源的消耗，同时减少常规能源(如火电)发电造成的镉排放。

2.2 碲化镉光伏组件有大规模应用潜力；

2.2.1 碲化镉组件具有良好的碳足迹及能量偿还期

Peng 等 (Peng, 2013) 对历年来多个关于多种光伏发电技术的生命周期研究的研究结果进行了总结,发现所有研究者都一致认为光伏技术的生命周期碳排放比化石能源的要低一个数量级左右。而在五种光伏技术(单晶硅、多晶硅、非晶硅、碲化镉、铜铟硫)中，碲化镉组件的碳排放最低，多篇研究论文给出的范围为 14-35g CO₂/kWh (图 12)，对环境影响最小。同时碲化镉组件具有最低的能量回收期，仅仅为 0.75-2.1 年 (图 13)，因为 CdTe 光伏发电技术对能源需求量较小，而转化效率相对较高。碲化镉与其它光伏发电技术在温室气体排放及能量回收期方面的比较见图 12 及图 13。

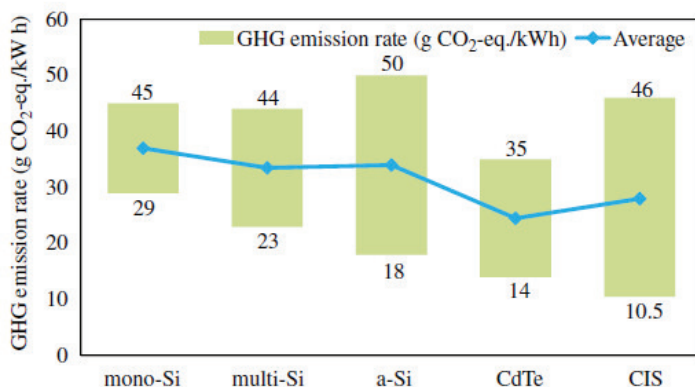


图12 不同光伏系统发电造成的温室气体排放率分析

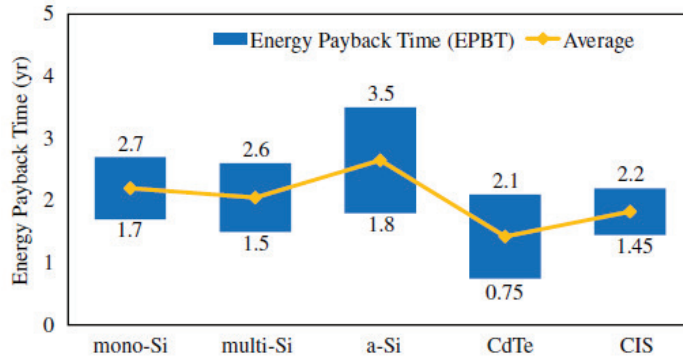


图 13 不同光伏系统能量回收期分析

2.2.2 质量可靠性良好

FS 做了大量工作来确保组件质量的可靠性，组件通过了欧洲的 IEC61646 测试标准、北美的 UL1703 测试标准及中国的金太阳认证标准。

根据 Strevel (2012)，美国国家可再生能源实验室 (NREL) 分别研究了 2000 年以前和这之后安装的五种光伏组件 (非晶硅、碲化镉、铜铟镓硒、单晶硅、多晶硅) 的效率衰减速度，其研究数据表明 (图 14)，FS 通过技术改进及对生产工艺的严格控制在 2000 年后实现了现有薄膜技术中最低的组件衰减率，只有 0.5-0.8%/年，达到了和晶硅接近的衰减率 (Strevel, N, 2012)。NREL 针对位于美国科罗拉多州 Golden 的一套光伏系统长达 17 年的性能追踪指出碲化镉组件长期运行性能衰减率线性拟度值为 -0.53%/年。在接近 20 年的监控观测后，NREL 证实了第一太阳能的组件技术具有卓越的可靠性，系统运行中未出现组件故障。

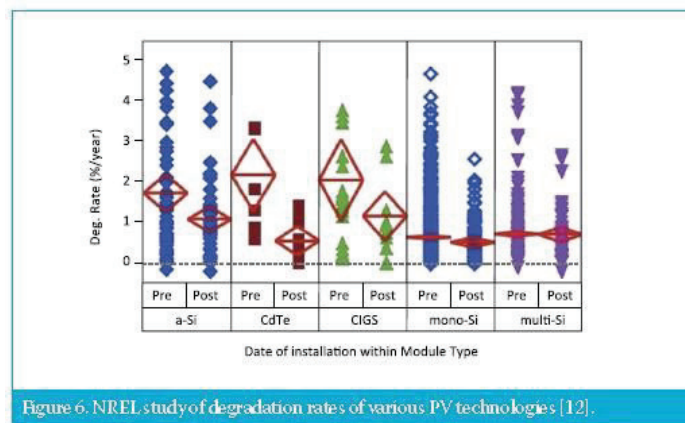


图 14 NREL 对不同类型光伏组件长期性能衰降的研究

2.2.3 温度系数较低

碲化镉组件还具有非常优秀的温度系数。FS 的碲化镉太阳能组件高温条件下性能优于传统的晶体硅太阳能组件，因为碲化镉半导体材料具有较低温度系数¹⁰，通常晶体硅太阳能组件的温度系数为-0.45~-0.5%/°C，而 FS 的碲化镉光伏组件的温度系数为-0.25%/°C，这意味着相对于传统的太阳能组件，同样标称功率的碲化镉组件由于温度上升造成的性能损耗降低了一半。图 15a 是分别安装碲化镉组件和多晶硅（mc-Si）组件的两个光伏电站的直流发电量比较，说明当组件温度上升到 25°C 以上时(图 15b)，碲化镉太阳能组件性能优势逐渐明显。一个大型系统集成商对意大利南部（Strevel, N, 2012）的两种相同功率的光伏电站进行了比较，结果显示碲化镉光伏系统年度发电量比多晶硅的高 5.7%。

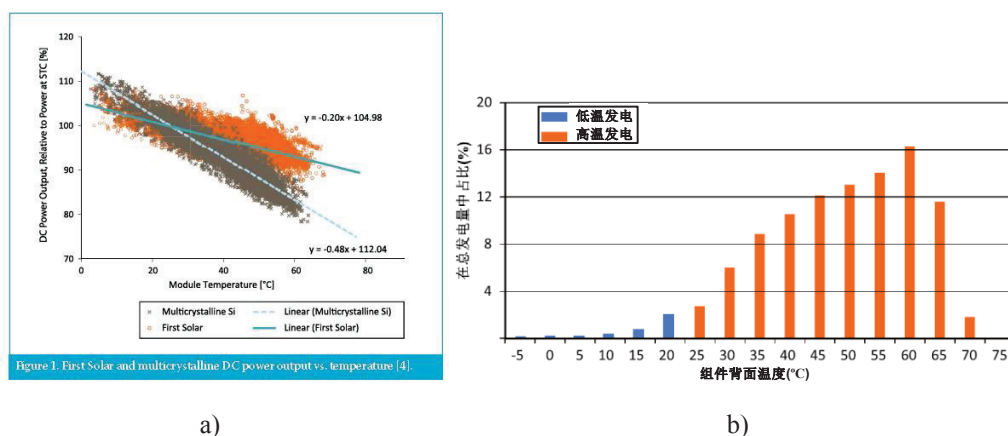


图 15 a)不同温度条件下 FS 碲化镉组件和多晶硅组件直流发电量对比。b) 碲化镉在沙漠地区组件全年发电量产生时的温度分布图(Strevel, N., 2012)。

2.2.4 碲的供应量可满足碲化镉组件的大规模生产

碲是微量非金属元素，尽管其在宇宙储藏量较丰富但是在地壳中却非常稀缺。目前市场上供应的碲都是从炼铜厂的副产品中提纯得到的。碲在地球上的储量还不明确，如果市场对碲的需求持续增长，将会刺激碲储量的探测。目前世界上碲的产量在 500-1500 吨/年，并由于铜需求的增长以 3-5%/年的速度增长。

碲化镉组件对碲的需求为 90-130kg/MW（Zweibel.K. 2010），大约可满足 10 GW/年的产量。但是三个有利因素将消除碲资源对碲化镉组件产量的限制：1）依靠铜需求增大带来的 3-5%/年的增长。同时碲化铋矿及海底富含碲的矿层逐步

¹⁰温度系数指组件效率随组件工作温度的升高而下降的程度，温度系数越低组件效率随温度升高而下降越少。

被探出。2) 组件制造技术在不断进步中, 组件转换效率还有提升空间, 组件中碲化镉层厚度也有潜力从目前的 3 μm 下降到几百纳米, 这将降低单位组件每 Wp 的镉消耗量。3) 随着大量组件逐步达到生命终期, 将有可观的碲通过组件回收被回收回来, 在保守条件下, 2040 年将有 10-50%的碲化镉组件生产所需碲通过生命终期的组件回收满足 (M. Marwede 2012), 在考虑到组件效率提升, 回收技术中碲回收利用率不断提高 (报废组件中 97%的碲被回收并且 90%被提纯为高纯度碲) 情况下, 2038 年生命终期组件中回收的碲将有可能满足整个碲化镉光伏产业的发展 (M. Marwede 2012)。

3、结论

- 1) **碲化镉组件是一种有潜力的光伏发电技术。**碲化镉光伏发电技术具有低成本高效率的潜力, FS 认为其碲化镉组件 2014 年底有望达到 14.9%的组件效率, 达到与目前多晶硅组件接近的水平, 同时碲化镉组件成本还可再下降 10%左右。另外碲化镉具有良好的质量可靠性与优秀的温度系数, 使得碲化镉组件在 25 年生命周期内可以稳定高效的运行。而且碲化镉光伏的全生命周期 CO_2 排放和能源回收期都较低, 大规模应用可有效帮助我国节能减排目标的实现。
- 2) **碲化镉是一种非常稳定的化合物, 相比单质镉毒性更小。**在大鼠身上进行的相关于急性口服和吸入毒性研究表明碲化镉的毒性低于单质镉。碲化镉对斑马鱼的急性水生动植物毒性的研究结果显示, 在水饱和度下对鱼没有毒性(致命或间接致命)作用。碲化镉的溶解性和生物利用度比其他镉化合物要低得多。基本可以认为应该区分对待碲化镉化合物和单质镉的的毒性。另外, 目前为止还没有碲化镉对人类毒性和致癌的数据, 而且缺乏碲化镉的长期毒性实验结果。
- 3) **FS工厂具有保障生产安全性的有效措施。**在组件制造和回收环节, First Solar 一直在执行非常优秀的管理制度、程序和政策来保护环境及工人工作过程的健康和安全性。实际的大气和水镉排放低于马来西亚政府的标准。First Solar 在提高环境安全和降低安全风险方面非常积极主动。First Solar 制造工厂通过了 ISO (9001) 质量, ISO14001 (环境) 和 OHSAS18001 (职业、健康和安全) 标准。

- 4) **组件运行过程对环境和周围人群的影响没有或非常小。**在正常的运行条件下，没有碲化镉从组件中排放出来。在可预见的事故中，已有的学术研究成果表明：1) 在火灾中，碲化镉中的镉几乎全部（99.96%）被封存在玻璃中，仅有 0.04%的镉进入大气中，发生在两块玻璃融合之前。2) 在正常的组件破碎率下（0.04%/年），由于碲化镉薄膜薄、用量小，即使组件中的镉全部释放出来，也几乎不可能对现场工作人员及周边居民构成潜在的健康风险。
- 5) **FS 的回收措施和回收技术确保了组件生命终期的环境安全。**First Solar 已经引入优秀的组件收集和回收机制来确保收集和回收碲化镉光伏组件从用户手中无收费的回收。这将进一步降低组件生命终期的镉污染风险。现有回收技术可以实现~95%的镉和碲被回收。
- 6) **使用碲化镉组件发电是一种有效地缓解镉污染的方法。**镉主要是锌铅等金属冶炼的副产品，即使没有碲化镉光伏组件对镉的需求，每天伴随着这些矿产的开采和冶炼也会造成大量的镉被释放出来。镉被应用于碲化镉光伏组件是一种有效的降低镉污染风险的方法，一方面碲化镉是镉化合物中最稳定的一种，另一方面碲化镉光伏组件被很好的封装在组件中。而且可以在组件生命终期按 FS 的回收机制被 95%的回收。因此相比于其它高消耗性的镉使用，碲化镉组件的环境安全性更高。最重要的是碲化镉组件可以利用太阳能发电，减少了常规能源的使用，从这一角度又减少了用煤或石油燃烧发电带来的镉污染和其它排放。
- 7) 鉴于 2011 年以来碲化镉光伏技术的进步迅速，组件效率提高快，本报告所使用的数据并不保证适用于未来 FS 公司推出的新型高效产品。这种变化趋势可能需要许多更新研究来说明。

4、建议

碲化镉组件是一种有竞争力的光伏发电技术，具有低成本高效率潜力。如碲化镉组件生命周期内针对镉污染的处理措施到位，则可以实现较其他光伏技术和能源形式更清洁、更环境友好的发电。鉴于我国进入镉污染高发期，多地区出现典型镉污染地区，镉污染已引起政府和民众的广泛关注，我们提出以下建议：

- 1) 碲化镉组件是一种有竞争力的光伏发电技术，建议列入我国十三五科技发展规划中，提高我国碲化镉组件的科研及生产技术水平。

- 2) 建议考虑参照欧盟 WEEE 将于 2014 年开始实施的光伏产品强制回收机制，在我国建立完善的光伏部件回收及召回机制。这种回收及召回机制是在我国部署碲化镉光伏组件的必要前提，也是降低镉污染风险的必要条件，同时可增强社会对这种光伏技术安全性的信心。因此建议 FS 在此方面与中国政府配合。
- 3) 由于碲化镉组件的大规模正常报废出现在 25 年甚至更长时间之后，建议 FS 与中国分享碲化镉回收技术，确保在这段时间之后无论出现任何情况，技术上在中国本地进行这种组件的大规模回收都是可行的，消除中国民众和业界的顾虑。
- 4) 建议 FS 针对中国的《危险废物浸出实验标准》进行实验。根据实验结果提示国内相关部门在组件无法回收情况下给出针对性处置方案。
- 5) 鉴于我国酸雨多发，建议针对碲化镉进行不同 pH 值条件下的浸出实验，给出在我国特殊环境下使用碲化镉的环境安全性指导建议。
- 6) FS 加强科普宣传，向公众和学术界公开安全相关的重要数据和文献，引导中国公众区别对待碲化镉和单质镉的毒性和危害，并了解 FS 如何采取措施控制镉排放。

参考资料:

- Beckmann, J., and Mennenga A., 2011. Calculation of emissions when there is a fire in a photovoltaic system made of cadmium telluride modules. Bavarian Environmental Agency, Augsburg, Germany.
- Bohland J. and Smigielski K. First Solar's CdTe module manufacturing experience; environmental, health and safety results. Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, AK, September 2000.
- Bonnet, D. and P. Meyers. 1998. Cadmium-telluride—Material for thin film solar cells. *J. Mater. Res.*, Vol. 13, No. 10, pp. 2740-2753.
- Cha, K., M. Son, Y. Matsuno, V. Fthenakis, T. Hur. 2013. Substance flow analysis of cadmium in Korea. *Resources, Conservation and Recycling* 71: 31– 39
- Fthenakis V.M. 2012. Sustainability metrics for extending thin-film photovoltaics to terawatt levels. *MRS BULLETIN*. Vol. 37: 425-430.
- Fthenakis V.M., “Life Cycle Impact Analysis of Cadmium in CdTe Photovoltaic Production,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 303-334, 2004.
- Fthenakis, V. and H. C. Kim. 2009. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 1465–1474.
- Fthenakis, V., and H. C. Kim. Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 14, pp. 2039–2048, 2010.
- Fthenakis, V., Blunden, J., T. Green, L. Krueger, and D. Turney. 2011. Large Photovoltaic Power Plants: Wildlife Impacts and Benefits. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, WA.

- Fthenakis, V.M., Fuhrmann, M., Heiser, J., Lanzirrotti, A., Fitts, J., and Wang, W. 2005. "Emissions and Encapsulation of Cadmium in CdTe PV Modules During Fires," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13 (8): 713-723.
- Fthenakis, V.M., Kim H.C., and Alsema, E., "Emissions from Photovoltaic Life Cycles," *Environmental Science and Technology*, 42, 6 (2008).
- Held, M., Life Cycle Assessment of CdTe Module Recycling, 24th EU PVSEC Conference, Hamburg, Germany, 2009.
- Houari, Y. J. Speirs, C. Candelise, and R. Gross. 2013. A system dynamics model of tellurium availability for CdTe PV.
- Kaczmar, S., Evaluating the Read-Across Approach on CdTe Toxicity for CdTe Photovoltaics, SETAC North America 32nd Annual Meeting, Boston, MA, November 2011.
- Kaczmar, S., Evaluation of Potential Health and Environmental Impacts from End-of-Life Disposal of CdTe Photovoltaics, SETAC North America 33rd Annual Meeting, Long Beach, CA, November 2012.
- Marwede, M. and A. Reller. 2012. Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. *Resources, Conservation and Recycling* 69: 35– 49.
- Peng et al. 2013. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19: 255–274.
- Peschel, T. 2010. Solar parks – Opportunities for Biodiversity: A report on biodiversity in and around ground-mounted photovoltaic plants. *Renews Special*, Issue 45.
- Raugei, M., and V. Fthenakis., Cadmium flows and emissions from CdTePV: future expectations, *Energy Policy*, 38 (9), 5223-5228 (2010).
- Raugei, M., M. Isasa, P. F. Palmer. 2012. Potential Cd emissions from end-of-life CdTe PV. *Int J Life Cycle Assess*, 17:192–198.
- Sinha, P., A. Meader, and M. de Wild-Scholten. 2013. Life Cycle Water Usage in CdTe Photovoltaics, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 3, Number 1, pp. 429-432.
- Sinha, P., Balas, R., Krueger, L., and Wade, A. 2012. Fate and Transport Evaluation of Potential Leaching Risks from Cadmium Telluride Photovoltaics. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 31, No. 7, pp. 1670–1675.
- Sinha, P., M. Cossette, and J.-F. Ménard. 2012. End-of-life CdTe PV Recycling with Semiconductor Refining. *Proceedings : 27th EU PVSEC*, Frankfurt, Germany, pp. 4653 – 4656.
- Strevel, N., L. Trippel, and M. Gloeckler. 2012. Performance characterization and superior energy yield of First Solar PV power plants in high-temperature conditions. *Photovoltaics International*, August, 2012.
- Turney, D. and V. Fthenakis. 2011. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3261–3270.
- Zayed, J., and Philippe, S., "Acute Oral and Inhalation Toxicities in Rats with Cadmium Telluride," *International Journal of Toxicology*, 28 (4): 259-265.
- Zweibel, K. 2010. The Impact of Tellurium Supply on Cadmium Telluride Photovoltaics. *Science*, Vol. 328: 699-701.
- Wegmann, G. and W. L. Fowler. 2011. Review of Analytical Data, First Solar, Inc. Golder

Associates. February 16. (TCLP浸出结果)



证书编号：国环评证甲字第 1058 号

美国第一太阳能公司碲化镉光伏电池技 术工艺与环境影响评估建议研究报告

环评单位：中环联（北京）环境保护有限公司

China Environmental United (Beijing) ENV. Protection CO.LTD

2013 年 12 月 · 北京

第二篇

美国第一太阳能公司碲化镉光伏电池环境 影响评估及建议研究

目 录

1 碲化镉光伏电池污染物迁移模式分析研究.....	4
1.1 碲化镉光伏电池在水环境的迁移模式分析.....	4
1.2 碲化镉光伏电池在环境空气中的扩散模式分析.....	5
1.3 碲化镉光伏电池在土壤中的迁移模式分析.....	6
2 碲化镉光伏电池累积环境影响分析研究.....	7
2.1 碲化镉光伏电池对水环境的累积环境影响分析.....	7
2.2 碲化镉光伏电池对环境空气的累积环境影响分析.....	7
2.3 碲化镉光伏电池对土地的累积环境影响分析.....	8
2.4 碲化镉光伏电池对生态环境的累积环境影响分析.....	9
2.5 碲化镉光伏电池对气候变化的累积环境影响分析.....	11
2.6 碲化镉光伏电池对社会环境的累积环境影响分析.....	13
3 环境风险分析评估研究.....	14
3.1 环境风险评估.....	14
3.2 事故情况下的应急管理与补救措施.....	19
3.3 对人群健康影响的风险评估.....	20
4 碲化镉电池全生命周期清洁生产评估研究.....	23
4.1 碲化镉电池全生命周期的清洁生产分析.....	23
4.2 总量指标建议.....	25
5 碲化镉光伏电池项目环保措施与建议.....	25
5.1 碲化镉光伏电池项目对水环境影响的减缓措施.....	25
5.2 碲化镉光伏电池项目对环境空气环境影响的减缓措施.....	26
5.3 碲化镉光伏电池项目对土地环境影响的减缓措施.....	26
5.4 碲化镉光伏电池项目对生态环境影响的减缓措施.....	27
6 生产过程与工程实施过程环境监理与管理研究.....	27
6.1 生产过程环境监理与管理.....	27
6.2 工程实施过程环境监理与管理.....	28
7 碲化镉光伏电池项目协调性分析.....	28
7.1 现有政策法规协调性分析.....	28
7.2 提高公众认知度可达性分析.....	30
7.3 现行标准等可达性分析.....	31
7.4 建议.....	32

附图：碲化镉太阳能电池项目生命周期中的镉排放环节分析图

1 碲化镉光伏电池污染物迁移模式分析研究

重金属迁移转化是指在自然环境中空间位置的移动和存在形态的转化，以及由此所引起的富集与分散过程。重金属在环境中的迁移转化受物理、化学、生物等因素的影响和控制。

碲化镉生命周期阶段如下：（1）采矿，（2）镉与碲冶炼/精炼，（3）镉与碲提纯，（4）碲化镉生产，（5）碲化镉组件制造，（6）用后处置。

1.1 碲化镉光伏电池在水环境的迁移模式分析

在原料开采、提纯、合成阶段，以及退役回收阶段，碲化镉电池污染物均有机会进入水体。在生产阶段，碲化镉光伏电池项目污染物随采矿的废水及工艺废水进入水体。采用蒸汽输送沉积物，所有制造和回收操作产生的镉排放是 $0.4\text{mg}(\text{Cd})/\text{kg}$ 。包括光伏组件制造生命周期清单的所有项目在内，可计算出光伏组件中镉的总含量是 $1.3\text{mg}/\text{m}^2$ 。光伏组件在使用阶段几乎没有重金属污染物的排放，因为在碲化镉光伏组件中，性质稳定的化合物（碲化镉和硫化镉）是密封在两块玻璃中。因此使用光伏组件时不会有任何镉的排放。即使在意外火灾中，碲化镉也会绝大部分封存在熔融玻璃中，只有极少量排放到环境中。退役回收阶段，只有当组件出现在城市垃圾填埋场且发生物质沥滤，才会在退役后出现向水环境中释放。然而，碲化镉封装于两块玻璃板之中，在正常条件下不太可能在环境中沥滤。

碲化镉光伏电池项目产生的重金属在水环境中的迁移，按照物质运动的形式，可分为机械迁移、物理化学迁移和生物迁移三种基本类型。机械迁移是指重金属离子以溶解态或颗粒态的形式被水流机械搬运。迁移过程服从水力学原理。物理化学迁移是指重金属以简单离子、络离子或可溶性分子，在环境中通过一系列物理化学作用（水解、氧化、还原、沉淀、溶解、络合、螯合、吸附作用等）所实现的迁移与转化过程。这是重金属在水环境中的最重要迁移转化形式。这种迁移转化的结果决定了重金属在水环境中的存在形式、富集状况和潜在生态危害程度。生物迁移是指重金属通过生物体的新陈代谢、生长、死亡等过程所进行的迁移。这种迁移过程比较复杂，它既是物理化学问题，也服从生物学规律。所有重金属都能通过生物体迁移，并由此使重金属在某些有机体中富集起来，经食物链的放大作用，构成对人体危害。

胶体的吸附作用是使重金属从水中转入固相的主要途径。胶体的吸附作用对水环境中重金属的过程转化及生物生态效应有重要影响。由于胶体具有巨大的比表面、表面能和带电荷，能够强烈地吸附各种分子和离子，对重金属离子在水体

中的迁移有重大影响。在天然水体中，碲化镉及其相关重金属产物的溶解量极低，主要富集于固相中。

1.2 碲化镉光伏电池在环境空气中的扩散模式分析

对于碲化镉光伏电池项目生命周期大气中的镉排放的典型情况可由 Paper one 表 4 表示。表中结果反映出镉以及锌生产中开采，冶炼与精炼过程中镉排放的归属。

Paper one 表 4 中显示全部空气中镉排放的参考估计为 0.02g Cd/GWh 电能。后期评估镉空气排放的主要贡献因素为假设火灾造成镉损失条件下的光伏产品利用。如此前所述，大量试验结果证明火灾并未造成镉释放。此外，评估使用最新数据以确定开采，冶炼/精炼及寿终产品退役过程中的排放。

电站建设及运行期碲化镉薄膜太阳能电池持久耐用，在+80 至-80℃热循环的极端加速老化条件下不会产生任何排放。每代光伏产品，不管其技术如何，均为零排放过程。碲化镉/硫化镉薄层均封装于玻璃或塑料薄板之间。除非将该组件碎成粉末，否则无法产生微粒。碲化镉熔点为 1041℃，蒸发开始于 1050℃。升华开始于更低的温度，但碲化镉在 800℃的蒸汽压力仅为 2.5 托（0.003 大气压）。硫化镉熔点为 1750℃，其蒸汽压力由于升华的原因在 800℃时仅为 0.1 托。因此，正常条件下使用光伏组件不可能排放任何的蒸汽或灰尘。

碲化镉薄膜的两种最佳生产方法——电沉积与蒸汽传送——使用镉的效率非常高。前者过程处置物约为 1%，后者则约为 10–30%。两个过程中的镉均加以收集，可安全处置或回收。控制的（配备 HEPA 过滤器）大气蒸汽排放为 3 克镉每吨镉用量。

碲化镉光伏电池的使用和回收期不会对空气中排放镉。光伏组件预计可用 25–30 年，因为被密封在双层玻璃中间，所以在正常使用阶段不会向大气排放镉。退役期间/期后的大气排放也均为零。即使有数个组件偶然间进入了城市处置物焚化炉，镉将溶解于熔融玻璃中成为固体处置物的一部分。

进入大气中的污染物，受大气水平运动、湍流扩散运动，以及大气的各种不同尺度的扰动运动而被输送、混合和稀释。

风和湍流是决定污染物在大气中扩散状态的最直接和最本质的因子，是决定污染物扩散的决定因素。凡有利于增大风速、增强湍流的气象条件，都有利于污染物的稀释扩散，否则，将会使污染加重。

风对污染物的扩散有两个作用：一是整体的输送作用，二是冲淡稀释作用。风向决定污染物迁移运动的方向，风速决定污染物的迁移速度。污染物总是由上风方被输送到下风方，在污染源下风向，污染要重一些，因此考察一个地区的大

气污染时，一定要了解当地的风向；风速越大，单位时间内污染物混合的清洁空气量越大，冲淡稀释作用就越好。一般来说，大气中污染物浓度与污染物的总排放量成正比，而与风速成反比。

大气除了整体水平运动外，还存在着不同于主流方向的各种不同尺度的次生运动或称为旋涡运动，这种极不规则的大气运动就是大气湍流。大气湍流与大气的热力因子--大气垂直稳定度，近地面的风速以及下垫面等机械因素有关。前者形成的湍流称为热力湍流，后者所形成的湍流称为机械湍流，大气湍流就是这两种湍流综合作用的结果。大气湍流以近地层大气表现最为突出，风速时强时弱，风向不停摆动，就是存在大气湍流的具体表现。大气的湍流运动造成湍流场中各部分之间强烈混合，当污染物由污染源排入大气时，高浓度的污染物由于湍流混合，不断被清洁空气掺入，同时又无规则地分散到其它方向去，使污染物不断地被稀释、冲淡。

分散于大气中的污染物，又通过干沉降和湿沉降的模式，进入到土壤和水体中，遵循土壤和水体的污染物扩散模式。

在 3.1 中将进一步讨论，最不利条件下从 CdTe 阵列火灾的大气扩散，Beckmann and Mennenga (2011),已经建立了模型，周边环境的地面 Cd 浓度低于健康检查水平。

1.3 碲化镉光伏电池在土壤中的迁移模式分析

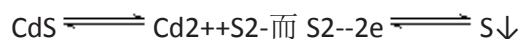
碲化镉生命周期中，镉只在（1）采矿、（2）冶炼精炼过程中直接进入土壤，其他环节通过环境空气和水体间接进入土壤。

镉进入土壤中的存在形态也很多。但总的可分为水溶性镉和非水溶性镉两大类。离子态和络合态的水溶性镉 $CdCl_2$ 、 $Cd(WO_3)_2$ 等能为作物所吸收，对生物危害大。而难溶性镉的化合物 CdS 、 $CdCO_3$ 等，则为非水溶性镉，不易迁移，不易为植物所吸收。两者在一定条件下可互相转化。

土壤中镉的迁移转化受 pH 和 Eh 的影响甚大。当土壤偏酸性时，镉的溶解度增高；反之当土壤 pH 偏碱性时，镉的溶解度低。据研究，土壤 pH 和交换性钙与水稻中镉的含量呈负相关。

日本园田等研究了不同 Eh 条件下土壤对镉的吸附。在氧化条件下(500mV)，土壤和含镉溶液相作用时，其所吸持的镉中有 20%以上处于交换态，同时加入磷酸盐，交换态镉减少，而不溶态镉增多，但可给态镉可达 45%。土壤处于还原条件(200mV)时，加入磷酸盐，可进一步使交换态镉减少，不溶态镉增多，这是由于还原条件对形成难溶性磷酸镉有利。特别当 Eh 降到 0mV，无论施加磷酸与否，都使土壤不溶态镉增加。它不但是形成磷酸盐，而且能形成更稳定的硫

化镉。日本水野等认为水稻吸收土壤中的 Cd 与 Eh 有密切关系。非溶性镉 CdS 一方面参与氧化还原反应：



从而使可给态 Cd²⁺浓度增加；另一方面硫离子氧化为硫酸，使土壤 pH 降低，CdS 的溶解度增加。

对被镉污染的土壤研究证明，Cd 和 Zn、Pb 等的含量存在一定的关系，镉含量高的地方，Zn、Pb、Cu 也相应的高。锌的存在可抑制植物对镉的吸收。因此，镉的迁移转化除受土壤 pH 和 Eh 的影响外，还受相伴离子，如 Zn²⁺、Pb²⁺、Fe²⁺、Cu²⁺、Mn²⁺、Ca²⁺、PO₃⁻等的影响。土壤可给态 Cd²⁺含量高，水稻中镉的含量高的机率也大。

由于表层土壤对镉的吸附和化学固定，使土壤中镉的分布集中于土壤表层几厘米内。同时土壤中镉的污染容量最小，这是土壤镉污染的一个重要特点。因此，只要土壤中镉含量稍有增加，就会使水稻中镉的含量相应增高。因而为控制土壤镉污染所订的环境标准较为严格，不能超过 1.0ppm。

2 碲化镉光伏电池累积环境影响分析研究

2.1 碲化镉光伏电池对水环境的累积环境影响分析

碲化镉太阳能电池项目所引起的累积环境影响分析应当考虑到其他相关的过去、现在、和可预见的未来的项目的累积影响。

根据碲化镉 LCA 产物环节分析可知，在（1）采矿，（2）镉与碲冶炼/精炼，（3）镉与碲提纯，（4）碲化镉生产，（5）碲化镉组件制造，（6）用后处置，均对水环境产生影响。

碲化镉薄膜太阳能电池项目在建设及运行阶段基本不对水体产生重金属污染，在前期的开采、冶炼阶段会对地表水及地下水产生一定的污染。根据相关研究及第一太阳能提供的资料可以看出，在组件制造及用后处置方面会对水产生一定的污染镉。在碲化镉太阳能电池组件生产过程中产生的污水采取污污分流、分质处理，分别监测。进入到水体中的镉经过物理的或化学的作用，一部分继续留在水体中，一部分富集到底泥中，一部分被水生动植物吸收后进入生物链中，对人类及动植物产生一定的健康影响。

2.2 碲化镉光伏电池对环境空气的累积环境影响分析

根据碲化镉 LCA 产物环节分析可知，在（1）采矿，（2）镉与碲冶炼/精炼，

(3) 镉与碲提纯, (4) 碲化镉生产, (5) 碲化镉组件制造, (6) 用后处置, 均对大气环境产生影响。

针对碲化镉薄膜太阳能项目, 在正常的安装及运行期不会对环境增加重金属污染, 在前期的开采、矿石研磨、焙烤、冶炼、提纯阶段会对大气产生一定的镉污染。根据相关研究及第一太阳能提供的资料, 在太阳能光伏组件制造时, 薄膜生产、激光雕刻阶段均会对大气环境带来一定的镉污染。在工艺中排放的含镉废气一般经过除尘处理及酸洗系统达标排放, 尾气中余下的含镉污染物一部分通过呼吸作用进入到人体, 一部分通过干湿沉降的方式进入到水体或土壤中, 继而进入生物链影响人类及动植物的健康。

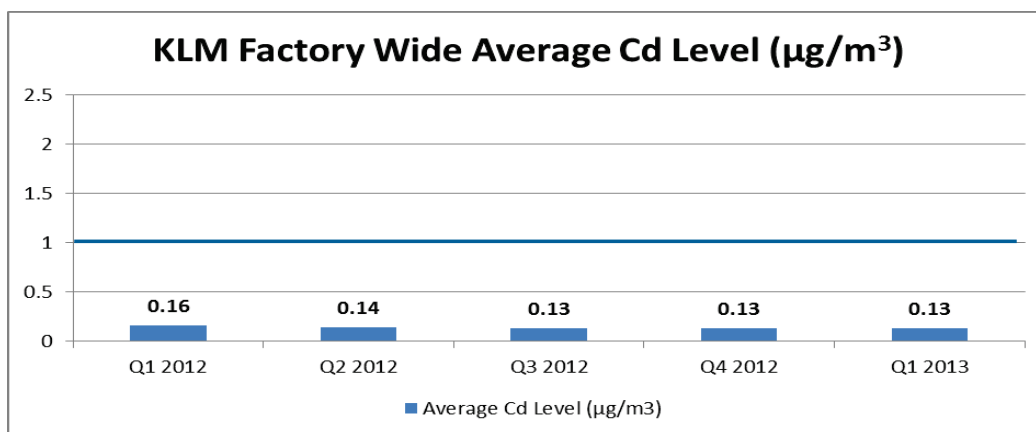


图 1KLM 工厂 Cd 平均水平。

2.3 碲化镉光伏电池对土地的累积环境影响分析

碲化镉在 LCA 六个环节均对土地产生环境影响, 但根据 FS 提供的资料, 仅在组件使用环节进行了研究, 本文仅分析此环节环境累积影响。以下几个章节亦是如此。

Turney and Fthenakis (2011) 研究结果显示, 图 2 计算了运行阶段整个生命周期的土地转化强度和土地占用强度。

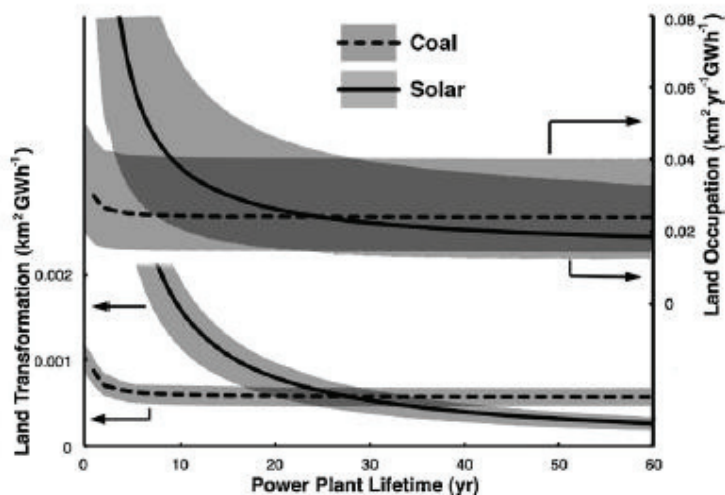


图 2 大型太阳能电站和燃煤发电站土地利用强度指标的比较。

在第 26 年，太阳能电站和燃煤发电厂的土地转化强度相等，而土地占用强度则在第 24 年时表现出一致。土地占用强度是一个更为科学的指标，因为它计入了造成影响后土地恢复所需的时间。一个运行了 30 年的光伏电站占用的土地比运行了同样时长的燃煤发电厂少 15%。随着光伏电站运行年限的增加，与燃煤发电厂相比，其土地利用强度将越来越低。图 2 中的阴影说明了计算的敏感度（取决于输入参数）。太阳能电站和燃煤发电厂单位装机容量的土地转化强度（平方公里/GW）在第 30 年（可能从第 27 到第 40 年）时是一致的。

2.4 碲化镉光伏电池对生态环境的累积环境影响分析

Turney and Fthenakis（2011）研究表明，太阳能电站对野生动植物和栖息地存在一定的影响。

太阳能电站对野生动植物和栖息地的影响主要是由于其将占用大片土地。太阳能电站一般由围栏封闭起来，对野生动物栖息地、捕食、食物的获取都会受到影响。电站也会阻止或清除植物生长，不管是哪种情况，植被的生长都会出现很大的变化，因为 PV 板自身会产生阴影，并改变电站所在地的微气候，对植被造成一定的影响（还未进行研究）。

McCrary 观测了加利福尼亚州沙漠地区 Daggett 附近的太阳能电站 Solar One 死亡的鸟、蝙蝠和昆虫的数量。那里每年会死亡六只鸟，强光每小时能烧死数百只昆虫，但与其他人为原因造成的鸟类死亡和昆虫死亡相比，太阳能电站造成的影响还是比较小的。“艾文帕太阳能发电系统”的环评报告称：该太阳能电站将对当地濒临灭绝的沙漠龟、五种处于特殊状态的动物物种、五种处于特殊状态的植物产生“巨大的影响”。位于加利福尼亚中部草原地区和废弃农田上的

550MWpTopaz 光伏项目制作的环评报告发现，这一电站可能对这一地区的数十种受保护动植物造成巨大的影响。对于上述两个光伏项目实行了一定的减缓措施后，可以将影响减少至可接受程度

对野生动植物可能造成的影响与电站所在地的生物多样性密切相关。光照和水资源条件可以大大改变任何一个生态环境中的生物多样性（两倍），任何一个生态环境中都生存着濒危物种，因此，我们建议对各个太阳能电站周围的野生动植物和生态环境进行独立的研究。例如，查阅美国环评报告。此外，电站对生物廊道的影响也是显而易见的。

此外，光伏项目生物多样性的潜在影响由于使用土地也有有益的一面，尽管工程建设总是扰动现存的动植物群落，太阳能电站可以改善各种动植物生境质量，甚至于产生新的生境。

表 1 总结了取代美国的传统发电站的太阳能电站的生态影响。

表 1 与美国传统的发电技术相比，太阳能电站对野生动植物和栖息地的影响 (Turney and Fthenakis, 2011).

影响	与传统发电技术相比	有利 / 有害	影响程度	注释
有害化学物质				
酸雨：一氧化硫 氮氧化物	减少排放	有利	中等	少排放大约 25 倍
氮、富营养化	减少排放	有利	中等	少排放很多
汞	减少排放	有利	中等	少排放大约 30 倍
其他：镉、铅、颗粒物	减少排放	有利	中等	少排放很多
漏油事故	减轻风险	有利	高	注：BP 深水地平线漏油事故、阿拉斯加港湾漏油事件
实际危险				
冷却水使用危害	减少危害	有利	中等	热电冷却需求减少
鸟类：飞行危害	输电线路	有害	低	太阳能发电需要额外的电力线路

道路与铁路危害	减少危害	有利	低	可能减少道路与铁路事故致死率
栖息地				
栖息地分化	中性	中性	中等	仍需进一步研究和观察
本地栖息地的品质	减少采矿活动	有利	中等	采矿 vs 太阳能电站, 仍需进一步研究
土地转化	中性	中性	中等	仍需进一步研究和观察
气候变化	减少变化	有利	高	少排放大约 25 倍的温室气体

2.5 碲化镉光伏电池对气候变化的累积环境影响分析

Turney and Fthenakis (2011) 研究表明, 太阳能电站对气候变化起到积极的影响, 太阳能电站比传统发电厂减少二氧化碳排放。

太阳能电站的年均发电量为大约 72GWh/平方公里/年。太阳能电站剩余生命周期的二氧化碳排放量为 16 克/千瓦时到 40 克/千瓦时 (日照强度为 1,700 千瓦时/平方米/天), 表 2 的数据说明, 太阳能发电是替代美国传统发电技术的低碳发电方式。

表 2 大型太阳能电站在整个生命周期内排放的二氧化碳

二氧化碳排放量 (克/千瓦时)		
	最佳案例	最差案例
森林丧失的碳封存功能	+0.0	+8.6
土壤有机物的呼吸	+0.0	+1.9
被砍伐有机物的氧化	+0.0	+35.8
生命周期的其他阶段	+16.0	+40.0
太阳能电站二氧化碳排放总量	+16.0	+86.3

避免燃烧化石燃料所减少的二氧化碳	-850.0	-650.0
总计	-834.0	-563.7

甲烷和一氧化二氮也是燃煤发电厂排放的主要温室气体。二氧化碳、甲烷和一氧化二氮的辐射强度分别为 1.7W/平方米、0.5W/平方米和 0.2W/平方米，化石燃料燃烧所占的比重分别为 73%、27%和 8%。建设在森林地区的太阳能电站在整个生命周期内排放的甲烷和二氧化氮可能比化石燃料的低得多，这是从化石燃料发电转变到太阳能发电在减少温室气体排放方面的又一好处。

土地的利用会影响当地的气候、微气候和地表温度，如大都市区域就存在城市热岛。组件的反射率很低，可将大部分日照转化成热量，于是人们开始担心组件可能会影响全球的气候或当地的气候。Nemet 对大面积安装的组件的反射率对全球气候的影响进行了调查，他发现，与其带来的好处——减少温室气体排放量——相比，这点影响可以忽略不计。Nemet 没有考虑当地的气候或微气候。

另据 Fthenakis and Yu (2013)研究表明，太阳能电站阵列上方 5-18 米及周边 300 米范围内温度低于环境温度，模块温度在夜间也低于环境温度，因此不支持热岛效应的论断。

表 3 列出了建在森林地区的太阳能电站的环境影响。如果建在森林地区，大部分影响指标会出现变化，尤其是二氧化碳排放量。我们还需要开展实地研究来确定太阳能电站对当地的气候和微气候的影响。

表 3 太阳能电站对气候变化的影响（与美国传统的发电技术相比）(Turney and Fthenakis, 2011).

影响	与传统发电技术相比	有利/有害	影响程度	注释
全球气候				
二氧化碳排放	减少二氧化碳排放	有利	高	非常有利
其他温室气体排放	减少温室气体排放	有利	高	非常有利
地表反照率的变化	反照率降低	中性	低	这一影响的重要性较低

当地气候

地表反照率的变化	反照率降低	未知	中等	仍需研究和观察
其他地表能量流	未知	未知	低	仍需研究和观察

2.6 碲化镉光伏电池对社会环境的累积环境影响分析

Turney and Fthenakis (2011) 研究表明, 太阳能电站对社会影响有利有弊。

表 4 列举了在森林地区建设的太阳能电站对人体健康和人类福祉的影响。由于燃烧化石燃料所产生的有毒物质大大减少, 因此太阳能电站的大部分影响是有利的。例如, 一项最近的研究发现: 在美国 49% 的湖和水库中, 鱼体内汞的含量超出了安全消费水平。太阳能发电设备直接排放 (0.1 克/GWh) 的汞比传统的发电技术 (15 克/GWh) 少 50 到 1,000 倍。在美国, 湖和水库中沉积的汞中大约有 65% 来源于燃烧的化石燃料。用清洁电力制造的碲化镉组件排放的镉为 0.02 克/GWh, 比燃煤发电排放的镉少 100 到 300 倍。太阳能发电排放的氮氧化物、二氧化硫和其他污染物远远少于传统的发电技术。这些有毒物质以及其他有毒物质 (包括颗粒物) 的排放, 会对人体造成很大的负担。由于气候变化和相关的影晌: 海平面上升、极端气候、食品安全和社会经济变化, 二氧化碳的排放也会对人体健康和人类福祉带来风险。化石燃料发电厂排放的温室气体为全球温室气体排放量所占比重较大, 在剩下的温室气体中, 有相当大一部分来源于石油的使用——一部分可由清洁电力替代。

太阳能电站对环境的美观和休闲场所的影响就没有上述影响那么清晰了。加利福尼亚最近颁布的一项法律禁止太阳能电站使用大片的土地——部分原因是其对环境的美观和游憩资源有所影响, 和出于对生态环境的担心。对环境的美观和游憩资源造成的影响很难去量化, 但是在过去几十年, 美国森林管理局在评估土地开发阶段对自然景观造成的影响方面, 取得了很大的进展。评估太阳能电站对游憩资源造成的影响可采用类似的方法。在游憩资源方面, 请注意: 转而使用太阳能将能减少湖和河中沉积的汞, 从而改善游憩环境和鱼类的生存环境。建设大型太阳能电站可减少或避免在山顶采矿的行为, 从而提供大片的高地森林供人游憩。

表 4 与美国传统的发电技术相比, 太阳能电站对人体健康与人类福祉的影响

影响	与传统发电技术相	有利 / 有	影响程度	注释
----	----------	--------	------	----

	比	害		
有害化学物质				
汞排放	减少排放	有利	中等	少大约 30 倍
镉排放	减少排放	有利	高	少大约 150 倍
其他毒物的排放	减少排放	有利	中等	少很多
颗粒物的排放	减少排放	有利	高	少很多
其他影响				
噪声	降低噪音	有利	低	采矿噪音更低、火车噪音更低
游憩资源	减轻污染	有利	中等	空气更清新、鱼群更健康
环境的美观	与化石燃料发电类似	中性	中等	太阳能电站 vs 露天矿井
气候变化	减少气候变化	有利	高	少排放大约 25 倍温室气体
土地占用	与化石燃料发电类似	有害	中等	见第 4.1 节 Turney and Fthenakis (2011)

3 环境风险分析评估研究

3.1 环境风险评估

由于碲化镉光伏电站的安装和运行在美国加州、俄亥俄州等多地已有较为成熟的实践，国内 2010 年内蒙鄂尔多斯有过类似项目，故美国的环评文件即 EIS 或者 ESA 值得借鉴。在这些环评文件中，该部分环境风险关注点包括两方面，一是各种灾害（包括自然和人为因素引起）如地质、地震、洪水、火灾等带来的灾害风险；二是接触污染或有害物质带来的人体健康风险，其中尤其关注对动植物

生物资源、环境敏感点如学校、医院等对象。

经查阅现有文献并对比国内外碲化镉光伏电站项目的环评文件，按照生命全周期分析，重点对碲化镉电池生产阶段、光伏电站的安装和运行阶段、电站退役处置阶段进行环境风险评估。下文将对碲化镉电池生产阶段，电站的安装、运行和退役阶段的环境风险进行阐述。

(1) 碲化镉 (CdTe) 组件生产阶段

从原材料购置到组件的生产，均在密闭车间内进行。产生的大气污染物一般进入车间通风系统，并配备高效颗粒吸收装置(HEPA，High Efficiency Particulate Air)，该装置对 0.3um 的颗粒物吸收率达 99.97%以上，去除效率高。各工段清洗废水经汇总流入厂区污水处理厂统一处理。因此厂区的废水、废气均得到有效治理，故生产工段的环境风险主要体现在风险物质和风险装置上，并由此带来的可信事故如设备的停开机、检修，环保装置失灵，以及火灾等。

1) 风险源识别。

该部分包括风险物质和的风险单元装置。其中风险物质主要包括有毒、有害、易燃易爆等物质。碲化镉 (CdTe) 组件生产过程中涉及玻璃载体清洗的强酸、强碱类、以及其他有害物质均在此列。由于涉及商业秘密，目前仅明确浓硫酸、氢氧化钠等物质，具体参见后期项目环评。

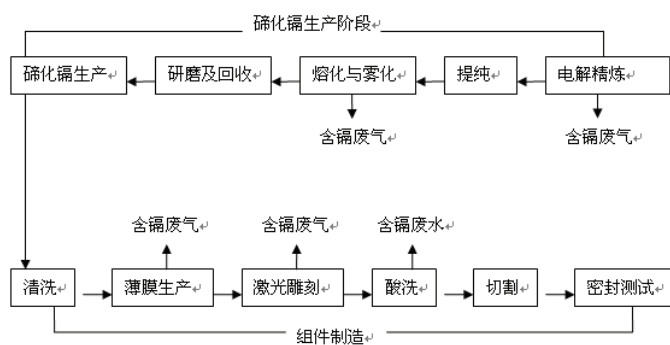


图3 碲化镉太阳能电池组件生产工艺流程图

目前已掌握的资料显示，组件生产过程主要风险物质为浓硫酸、氢氧化钠，其具体风险大小，是否为重大风险源，还将进一步依据使用和储存量加以判断。根据碲化镉太阳能电池组件生产工艺流程，薄膜生产工段、激光雕刻工段和酸洗工段，该工段所含生产设备为风险单元装置。

2) 环境风险可信事故识别

碲化镉太阳能电池组件生产过程环境风险可信事故包括设备维修、停开机、污水处理厂的事故水外排、环保装置失灵、火灾等。其中：

污水处理厂事故水外排：生产清洗废水统一送入厂内废水处理系统，达到相应排放标准后排放。污水处理厂如遇停电、暴雨外溢等极端情况，将对周边水环境带来一定环境风险。因此污水处理厂应具备足够容量，建议对水污染物中如重金属（Cd）、酸碱度（pH）、COD 等进行在线监测，并制定应急计划。例如，FS 在马来西亚和俄亥俄的工厂有污水处理和再循环装置，污水经处理后，达标排放。

高效过滤器失灵。在高效过滤器失灵的情况下，可能会导致大气中镉的泄漏。但由于常温、常压下 CdTe 几乎不可能以气态存，因此一旦设备的真空或高温环境被破坏，CdTe 蒸汽迅速凝结成固体颗粒附着在腔壁或管壁上，不易以气体形式扩散而危害人体。具体风险减缓措施，包括保证过滤器填料的更换频次，做好工作和交割记录，设备用过滤器等方式。

（2）光伏电站安装和运行阶段

光伏电站安装和运行项目中，该项目实施带来的环境风险类别可概述为五点：

1) 产品的使用、储存和处置方式不当导致向水生或陆生环境中的释放，超过一定剂量并对人体健康产生潜在威胁。该部分风险可能发生在基建和运行阶段，具体表现在：

①基础建设期。引发风险的行为可能包括安装场地通道、开挖水井和设立暂时的储水池、场地整平和表面植被的去除、建设排水控制系统、地下构筑物 and 露天开关站、架设输变电路、铺设太阳能光伏电板、构设防火系统等。

通过严格控制管理有害物质，及时清除产生的镉溢出等，建设期突发性灾害的发生和有害物质的释放，一般是短期且可控制在施工现场，其风险水平可以接受。

②电站运行和维护期。引发风险的行为可能包括有害物质或镉产品的日常运输；有害物质、液压用流体、不合理处置。随着项目的运行，还将产生有害物质。

③电站退役期。电站退役采取的封闭措施将产生一定镉物质的释放。

2) 活化自然界土壤或地下水中的污染物，从而使人类或野生动物的暴露量增加，且暴露水平超过阈值而变得有害；

①基础建设期。引发风险的行为包括基础建设中，假设原有场地曾经是污染场地或者农业污灌区，对土壤环境的扰动可能会成为新的污染源，从而加大工地工作人员的暴露量。

②电站运行和维护期。这段时期内对土壤和地下水的扰动，相对于基建时期很小。小范围的更换电池板、变电设备和数字监控系统等，可能会对接触有害物质的工作人员带来一定环境风险。

③电站退役期。该阶段可能会引起土壤和地下水的污染干扰，相关行为包括移除太阳能板及其支架，移除至少 2 英尺深的地下设施，拆除建筑大楼，移除输变电极和导体，关闭和废弃水井和地下油库等。一旦发现有有害物质泄露，应当深挖土壤以保证其环境安全。

3) 工人暴露于污染物或有害物质的浓度水平过量，超过 OSHA 允许量；或导致公众直接和间接接触导致其暴露量增加；

无论基础建设期、运行期和退役期，三个阶段对工人产生的有害物质暴露都是暂时的，工作人员应严格按照 OSHA 要求操作，但并不能避免突发事件的风险，必须严格制定并遵守《环境风险应急预案》。

4) 增加项目居住地的居民的暴露量，或引起重大损失、伤害甚至死亡；

①基础建设期：引发风险的行为可能包括工程活动和设备的使用，会引发损失、伤害风险的增大，甚至是触电、野地火灾导致的死亡。其中火灾与点烟、加油和开车等。

②电站运行和维护期。运行中风险的发生几率与电弧和线路电火花，通过设立挡火墙和消防系统，封闭电子设备等措施，可以减轻环境风险。

5) 火灾。

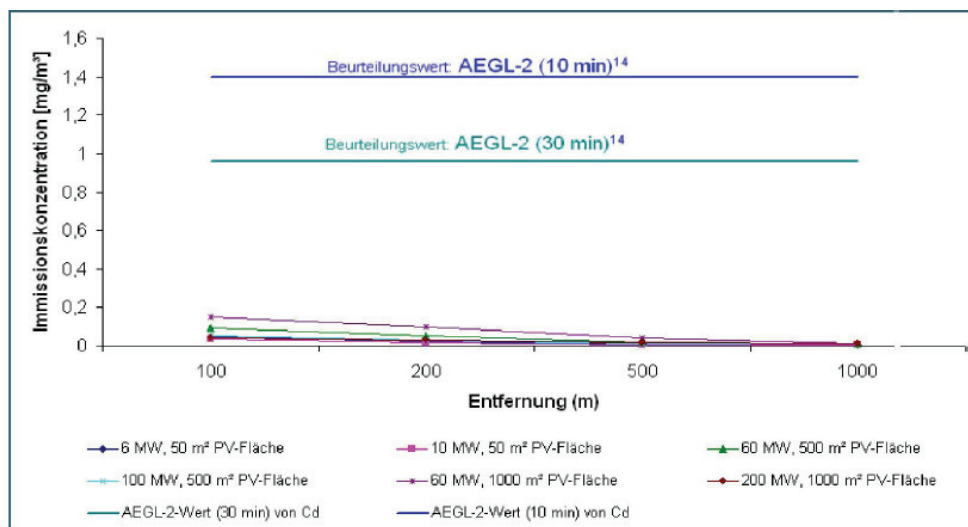
碲化镉薄膜电池是太阳能组件的中心部分，位于两片玻璃之间。该组件含有重金属 Cd 和非金属 Te，我国已明确将 Cd-Te 碲化镉列入危险废物名录，但对太阳能薄膜组件未做明确规定。由于含有重金属 Cd，环境风险评价将其作为重点对象。

Vasilis M. Fthenakis 曾在 2003 年发表的《碲化镉光伏产品生产中镉生命周期影响分析》中分析了光伏电池中重金属镉的常规释放和潜在意外释放，认为正常条件下使用光伏组件不可能排放任何的蒸汽或灰尘，而碲化镉不太可能在意外破损中释放。唯一可预见的暴露情况为火灾烧毁光伏组件，将其中的镉释放入空气之中。

在室内火灾中，火焰温度可达 800–1000°C。在工业火灾在其它燃料存在的情况下，可产生更高的火焰温度。Steinberger 进行的纯碲化镉热重量分析中的报告指出该物质暴露于空气中，直到约 1050°C 都保持稳定，但它在非氧化条件下（缺

少空气) 900°C即开始蒸发。但需注意, 仅有氧化条件才是真实的高温测试, 因为缺少氧气火就会熄灭。有研究认为当火焰温度达到 700°C以上时, 玻璃已发生熔融, 并将碲化镉薄膜包裹在玻璃中实行固化, 因此 99.96% of Cd 将留存在玻璃中。同时前人实验使用的是标准组件中间切下的部分样品, 而实际常规组件四边都留出 cm 宽的空白区没有含镉的材料。这种组件设计是为了防止边缘漏电而做的去边处的 Cd 需要扩散 1 cm 才能到达边缘开口处, 因此实际泄漏机率可能比 Fthenakis 的实验更低。

一般情况下, 玻璃封装的常规 CdTe 组件在火灾环境下的泄漏低到可以忽略不计, 值得注意的是, 在最坏火灾分散模型 (Worst-case Fire Dispersion Modeling) 中, 假设所有的 Cd 全部蒸发, 运用事故释放的模式进行计算, 这里假设屋顶 Cd 排放源强 50 m², 500 m², and 1000 m² 分别对应 14-66 g Cd/m², 以此预测距离火灾发生地不同距离(从 100m 到 10,000 m)的地面 Cd 浓度[mg Cd/m³], 其对应关系见下图。对应镉 (Cd) 的急性暴露浓度指导(AEGL) 10 分钟暴露浓度为 0.96 mg/m³、30 分钟为 1.4 mg/m³ 和职业安全阈值 4 mg/m³, 可见在一定距离内, 其地面镉 (Cd) 浓度将对周边环境敏感目标和消防人员带来环境风险。



Depiction of cadmium emission concentrations depending on the distance from the fire site with average cadmium contents of 14.0 g/m² (Case 1).

图 3 不同距离处与地面 Cd 浓度[mg Cd/m³]对应关系图

减缓措施: 需要通过制定严格的《火灾防范风险应急预案》并加以演练, 并在具体项目的环境影响评价中, 根据实际需要设立环境风险卫生防护距离, 以保证项目周边环境敏感点的安全。另外在具体的消防工作中, 应采取必要措施如防护工具和防护服方可开展营救工作等。

6) 光伏组件破损。

在电站建设初期，光伏电池板的安装阶段很难避免单个电池板的破损。在电站退役后进行电池板固废处理时候，会发生破损和渗漏风险。

对于重金属 Cd 来说，在正常情况下，干燥或中性水环境中组件出现破损，向周边环境浸出镉重金属量可忽略不计。而在可能出现的酸雨环境中，此时 Cd 排放需引起重视。由于中国的特殊国情，部分地区酸雨的侵蚀溶解作用也可能导致组件里的镉溶出。因此建议对该部分组件应进行独立浸出毒性实验加以鉴别。

(3) 退役阶段

目前在美国、欧盟等地区，光伏电池正走入新兴利用，而其生命周期的终期回收利用仍基于自愿原则，常用的废弃物处置办法是回收。由于光伏太阳能板在破损条件下，酸性淋溶下可能产生镉离子，故而存在潜在的环境风险，并对填埋场附近生活的居民带来健康风险，这也是国外随着 Cd-Te 光伏电池的发展，人们关注的重点，国内还未有相关研究。

电池组件退役后进行填埋处置，由于意外破损且发生沥滤，可能会出现镉离子向地下水环境的迁移。然而碲化镉封装于两块玻璃板之中，在正常条件下不太可能在环境中沥滤，但酸性条件则存在风险。退役后破损的电池板如果暴露于酸雨环境中，此时 Cd 排放需引起重视，并对该部分组件应进行独立浸出毒性实验加以鉴别。

Vasilis M. Fthenakis (2004) 认为碲化镉光伏产品的环境风险是最低的。在组件寿命所有阶段中产生 1GWh 电的大气估计排放为 0.02gCd/GWh。碲化镉光伏组件的大规模使用对健康与环境没有任何风险，在组件寿终时进行回收将彻底消除任何环境担忧。

对废弃电池板进行回收再利用，是将其环境风险降至最低并节约资源的最好途径。当然收集交于危险废物处置资质单位填埋处理，现阶段也是可行的。

3.2 事故情况下的应急管理与补救措施

1) 规范有害物料存储、使用和处理处置。

项目涉及有害物质由专人负责，制定《有害物质管理条例》，严格其使用管理，涉及危险废物如应交给资质单位处理处置。

2) 设立消防和事故水池，做好排洪防洪。

针对电池板区域周边设立消防和事故水池，防范火灾。同时充分利用厂区地形，建设好场地排洪水利设施，如区域排水沟、截洪沟等，以应对五十年一遇突发洪水。制定好《建设期和运行期火灾防治措施》、《建设期和运营期洪水防治措施》并落实为制度。

3) 制定《事故环境风险应急预案》。

要求严格按照《危险化学品事故应急救援预案编制导则》要求进行编制。包括危险目标，周围可利用的安全、消防、个体防护设备、器材及其分布；应急救援组织机构、人员和职责；报警及通讯联络；发生事故后的处理措施；人员紧急疏散或撤离；危险区的隔离；检测、抢险、救援及控制措施；受伤人员的救治；现场保护和洗消；应急救援保障；预案分级响应条件；事故应急救援终止程序；应急培训计划；演练计划等。

4) 制定其他计划和防治措施。包括《潜在污染的土壤和地下水指标体系》、SWPP (Stormwater Pollution Prevention Plan) 计划、SPCC(Spill Prevention Control and Countermeasure Plan) 计划，《人体健康和安全计划 HSP》

5) 做好太阳能板的回收再利用工作，杜绝随意丢弃。制定《太阳能单元回收》、《固废回收处理计划》等。

3.3 对人群健康影响的风险评估

1) 镉及碲化镉的生态毒性

镉 (Cd) 是地壳中一种稀有元素，单质镉为银白色或铅灰色软质金属，密度 8.642 g/cm^3 ，熔点 $321 \text{ }^\circ\text{C}$ ，沸点 $765 \text{ }^\circ\text{C}$ (表 1)。镉暴露引起的环境问题，包括镉的生态毒理学、在植物区系和动物区系的迁移转化、生物富集和生物放大引起的生态学问题，以及在人体积累引发的组织损伤、内分泌、紊乱、心血管疾病、生殖器官功能障碍和癌变，成为一个社会焦点问题。日本的“痛痛病”，就是因镉中毒引起。

相比而言，碲化镉 (Cd-Te) 的毒理学数据有限，使得监管机构通常以镉 (Cd) 标准替代。而国外现有研究认为，由于相对稳定，可溶性很小，碲化镉 (Cd-Te) 可能有不同的毒理属性。Joseph Zayed 和 Suzanne Philippe 进行了大鼠碲化镉急性口服和吸入毒性实验，得出碲化镉 (Cd-Te) 半致死浓度确定为 2.71 mg/L ，半致死剂量为大于 2000 mg/kg 。这个数字相对于注册化学物质毒性效应数据库 (The

Registry of Toxic Effects of Chemical Substances data bank) 中提供的镉 (Cd) 的毒性数据, 以 4 小时暴露半致死浓度 0.0031 mg/L 而言, 碲化镉 (Cd-Te) 显然远远低于镉 (Cd) 的生态毒性。而对于水生生物而言, S. Kaczmar (2011) 研究了碲化镉对斑马鱼的急性水生动植物毒性, 认为在水饱和度下对鱼没有毒性 (致命或间接致命) 作用。

2) 人体健康风险实践和评估

该项目从电站运行到电池组件退役中, 正常条件下使用光伏组件不可能排放任何的蒸汽或灰尘。一般认为碲化镉 (CdTe) 只有在被食入、吸入的灰尘, 或者没有适当的处理情形下 (如使用手套不当) 才会对人体产生不良影响。因此, 在美国人体健康风险的潜在风险更多的体现在组件退役后的处理处置, 即对填埋场退役后的人体健康风险更为关注。而生产过程中的人体健康风险关注重点则体现在在员工的职业安全和健康评估上。

Parikhit Sinha 等人通过分析其归宿及转移机制, 评价了在商用建筑物应用场合中, 因破损的碲化镉 (CdTe) 薄膜太阳能电池被雨水淋洗而从中释放的镉 (Cd) 造成的潜在暴露风险。结果表明镉在土壤、空气和地下水等中的暴露点浓度均比保守的 (住宅区土壤、住宅区空气、饮用水) 人类健康筛查标准低 1 到 6 个数量级。在商用建筑物应用场合中, 因破损的太阳能光伏电池被雨水淋洗而从中释放的镉造成的潜在暴露风险, 几乎不可能对现场工作人员及周边居民构成潜在的健康风险。

Swiatoslaw Kaczmar 则对非规范垃圾填埋场处置报废碲化镉光伏组件进行风险评估, 并考虑填埋场未敷设防渗衬里、酸性条件、周边氧化还原条件及土壤吸附等条件下, 对于人体健康和生态的潜在影响。结果显示, 就对人类健康的影响而言, 估计酸性条件和碱性条件填埋场处置方式的致癌风险均大大低于筛查限值 (1.0×10^{-6}), 酸性和碱性条件的非致癌慢性危害指数 (HI) 也都大大低于筛查限值 (1), 这表明以填埋法处置废旧碲化镉薄膜太阳能电池应该不会导致镉渗入地下水或地表的量达到可能危害人体健康的程度。

3) 职业安全和健康评估

碲化镉 (CdTe) 光伏太阳能组建件的生产过程由于相对总镉 (Cd) 暴露浓度较多、时间较长, 应重点关注其带来的人体健康风险, 主要体现在生产车间的

员工职业安全和健康评估上。电站运行阶段和组件退役后随着接触暴露量降低，其安全和职业健康风险也随之下降。在人体健康风险评估中，尿镉水平是检测长期镉暴露结果的主要指标，而血镉水平是检测近期镉暴露结果的主要指标， β -2 微球蛋白水平是次要指标。

（1）镉暴露情形。

碲化镉（CdTe）组件生产过程中不可避免会带来空气中含镉粉尘暴露。根据马来西亚 Kulim 组件制造工厂相关工艺流程和环境监测数据，显示几乎所有生产车间总镉浓度，均低于美国职业健康管理署（OSHA）设定的最高镉含量限值（PEL）8 小时镉含量加权均值 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，唯一超出 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的制造活动是半导体沉淀设备的维护和 CdCl_2 的喷涂上。对此 FS 公司采用高效颗粒过滤器（HEPA）过滤含镉粉尘，同时生产工人必须相关安全防护装置如安全防护服等进行风险防范。

（2）职工健康检测结果。

FS 有超过 10 年的员工生物测试结果，测试由第三方完成。John R. Bohland 和 Ken Smigielski 曾对 FS 美国俄亥俄州公司 700 多名员工中进行健康普查，取得样本 44 个，并测试其工作环境雇员镉暴露，该厂已运行 10 年，具有一定代表性。其检测结果显示血镉和尿镉含量符合相关要求。

以马来西亚的 Kulim 工厂为例，马来西亚国家职业安全与健康标准（OSHA）规定员工身体内血镉浓度的上限分别为 $5\mu\text{g}/\text{L}$ 及尿镉浓度为 $3\mu\text{g}/\text{g}$ 。2007-2012 年 Kulim 工厂连续 6 年对超过千名员工进行血镉和尿镉浓度监测，发现其值远远低于 OSHA 规定的上限值。其中 2011 和 2012 年统计数据仍在处理中。

半导体沉淀设备维护工段和 CdCl_2 喷涂与烘烤工段相对风险较高。针对该部分员工，其中维护人员每 6 个月进行一次血镉及尿镉的检查， CdCl_2 环节工作人员 2012 年开始每 3 年检测一次。结果显示这两个环节员工的血镉及尿镉检测发现员工仍处于安全的工作环境中。

（3）风险减缓措施。

FS 通过以下方式来减缓生产环节带来的健康风险。如加大不同工段车间内的环境监测力度，保证镉暴露浓度符合相关标准；从事设备维护和清理工作中，应穿着防护服，并配有高效颗粒过滤器（HEPA）的呼吸保护设备；密切监视职

工健康检查，并加大对高风险的工段监测频度，如半导体沉淀设备维护人员每6个月进行一次血镉及尿镉的检查；开展员工岗位培训，加强风险防范意识和技能；制定风险应急计划，并定期演练。

4 碲化镉电池全生命周期清洁生产评估研究

4.1 碲化镉电池全生命周期的清洁生产分析

1) 环评中的清洁生产指标体系

评价指标的选取应遵循系统性原则指独立性原则、实用性原则。环评中的清洁生产指标可分为生产工艺与装备要求、资源能源利用指、产品指指标、污染物产生指标(末端处理前)、废物回收利用指标等。其中生产工艺与装备要求、产品指标为定性指标；资源能源利用指标、污染物产生指标(末端处理前)、废物回收利用指标为定量指标。

按照碲化镉光伏电池整个生命周期全过程考虑，清洁生产主要体现在从源头铅锌矿石的采选和冶炼、碲化镉的合成和废旧光伏电板板的处理处置。其中三个阶段建议重点关注指标环节见下表。

表5 碲化镉光伏太阳能组件全生命周期分阶段清洁生产建议指标

生命周期	指标	内容	备注
铅锌矿石的采选和冶炼	生产工艺与装备要求	生产工艺及设备的先进性	参照《 <u>铅锌行业清洁生产评价指标体系</u> 》 (试行)
	资源能源利用指标	资源利用率、水资源耗用率、水资源循环利用率指标、能源耗用率(煤电等)	
	污染物产生指标(末端处理前)	吨产品COD、SO ₂ 和Cd产生量	
碲化镉光伏组件的生产	生产工艺与装备要求	生产工艺及设备的先进性	参比其他太阳能电池板行业
	资源能源利用指标	水资源耗用率、水资源循环利用率指标、能源耗用率(煤电等)	
	污染物产生指标(末端处理前)	吨产品COD、SO ₂ 和Cd产生量	
	镉的回收利用指标	镉的回收利用指标	

废旧光伏电池板处理处置	废物回收利用指标	废旧光伏电池板回收处置率；若回收各项污染物，则需考虑水资源、能源耗用率，金属镉的回收率	建议交予资质单位统一处置或回收再利用
-------------	----------	---	--------------------

2) 基于生命周期的清洁生产及污染物排放情况

(1) 已有文献资源、能源利用概述。

Parikhit Sinha、Amy Meader(2013)等研究碲化镉光伏生命周期内用水情况时，对单位产品的能耗、资源耗用等情况做了个小结。

表6 碲化镉生产中关键LCI参数汇总

生命周期各阶段	参数	数值	每m ² 组件	样本大小
组件（美国、德国和马来西亚工厂的加权平均值）	电	29.7	k w h	3
	太阳能玻璃	8.39	k g	3
	玻璃回火	8.39	k g	3
	板玻璃	8.15	k g	3
	自来水（计入水费）	182.8	k g	3
平衡系统（数据来自加州Topaz 太阳能电站）	低合金钢	10.2	k g	3
	镀锌	0.63	m ²	3
	自来水[5]	89.1	k g	3
	500千瓦逆变器	0.00022	-	3
	铜	0.88	k g	3
回收利用阶段（数据来自美国工厂）	电	4.38	k w h	3
	过氧化氢——水溶液浓度为50%	0.57	k g	3
	运输——荷载量低于3.5 t的厢式货车	1.62	t - k m	3
	运输——荷载量高于16 t的货车	8.67	t - k m	3
	去离子水（仪表读数）	5.42	k g	3

表7 碲化镉光伏生命周期中的直接和总取水量（L/m w h）

生命周期各阶段	直接（现场）	总量
组件	31	224
平衡系统a	15	106-150
回收利用	1	51
总量	47	382-425

由上表计算，碲化镉光伏在整个生命周期中的取水量约为 382-485L/MWh，在碲化镉电池 LCI 生命周期的统计数据中，还可以得出每m²光伏组件生命周期内能耗为 34 kWh 标煤，水耗 277 L。

(2) FS 公司运行实例中各项污染物产生指标

以马来西亚的 Kulim 工厂为例，生产过程 m² 各项污染物排放情况见表 8。由于各项指标变化波动较大，仅作为清洁生产指标的类比参考依据。

表 8 光伏组件生产过程单位面积电能各项污染物排放情况

Final Discharge Parameters	Regulatory Final Discharge Limit	Waste stream from manufacturing/others (min-max)	KLM1 WWTP Actual Final Discharge (min-max)	KLM2 WWTP Actual Final Discharge (min-max)	KLM3/4 WWTP Actual Final Discharge (min-max)	KLM5/6 WWTP Actual Final Discharge (min-max)
pH	5.5-9	1 - 10	6.6 - 7.6	6.9 - 7.6	6.9 - 7.6	7.0 - 7.7
COD (mg/L)	200	90 - 450	1 - 64	1 - 47	0 - 20	1 - 54
Cadmium (mg/L)	0.02	15 - 80	0 - 0.005	0 - 0.005	0 - 0.005	0.005 - 0.010
Iron (mg/L)	5.0	10 - 20	0 - 2	0 - 0.09	0 - 0.16	0 - 0.15

4.2 总量指标建议

根据《国家环境保护“十二五”规划》，“十二五”期间国家对 COD、SO₂、NH₃-N、NO_x 四种主要污染物实行排放总量控制计划管理，故建议污染物产生指标可计算以上四种常规污染物排放总量。

另根据《全国重金属污染综合防治“十二五”规划》（2011 年），其中首次提出重金属总量控制，并规定汞、铬、镉、铅和类金属砷 5 种重金属为重点监控与污染物排放量控制目标。规划在全国范围内划分出重点区域和非重点区域实施。所称“重点区域”，包括内蒙古、湖南、广西、青海等 14 个重点省份和 138 个重点防护区。故建议污染物产生指标计算重金属镉的排放总量。

5 碲化镉光伏电池项目环保措施与建议

5.1 碲化镉光伏电池项目对水环境影响的减缓措施

开采阶段，重金属废水主要由井下排水、废石场淋滤废水、采矿生产用水矿井地下涌水组成。减缓措施主要有设置集中收集池经处理后回用或外排、使用先进的选矿及采矿工艺、尽量减少地下涌水等措施，以减小对地表水及地下水的影

响；合理选址，选择光照条件好、人口密度小，环境有一定容量的区域进行碲化镉太阳能电厂的建设及运行；碲化镉粉的生产及光伏组件的制造阶段，应严格执行废水的循环利用，尽量减少污水外排；回收利用阶段如进入填埋场则应严格注意填埋场的防渗，设置渗滤液搜集及处理系统；制定完善的工程管理方案及应急机制，实施全过程管理及先进的污染物控制技术；完善的培训机制及人员岗位责任制的制定及执行。

5.2 碲化镉光伏电池项目对环境空气环境影响的减缓措施

工程产生的废气污染物主要有井下通风废气、扬尘。井下通风废气主要来自井下爆破、凿岩、装卸等。采用喷雾洒水降尘，工人采用个体防护，可有效改善井下工作环境，减少粉尘对工人的影响。废石、矿石的露天堆放以及汽车运输将产生扬尘，应采取专人、定期对废石堆场、矿石堆场进行喷水抑尘，废石场分区使用及时覆土复垦，尽量减少扬尘对环境空气的影响；冶炼及精炼过程应选用先进的气体回收及处理回用工艺系统，同时做好工作人员的安全防护；制定完善的工程管理方案及应急机制，实施全过程管理及先进的污染物控制技术；完善的培训机制及人员岗位责任制的制定及执行。

在光伏电站建设期间，每天几次洒水能够有效控制灰尘，降低车辆速度也是控制扬尘的有效措施。扬尘也来自于建筑材料露天堆积和混合操作。避免大风天气作业和减少露天建筑材料堆积是控制扬尘的有效方式。

5.3 碲化镉光伏电池项目对土地环境影响的减缓措施

根据碲化镉 LCA 产物环节分析可知，在（1）采矿，（2）镉与碲冶炼/精炼，（3）镉与碲提纯，（4）碲化镉生产，（5）碲化镉组件制造，（6）用后处置各环节，均对土地利用环境影响。

为提高土地利用效率，减少碲化镉光伏电池项目对土地环境影响，开采过程中减少土地使用，尽量采用地下开采；其他环节尽量少占用土地。工程建设对土地的影响主要表现在施工期的临时占地和项目建成后的永久占地，施工临时性占地破坏的土地，工程结束后，闭矿期将利用废石回填采空区，而后需覆盖表土，抚平，压实。闭矿后，将拆除矿山所有生产、生活设施，对废石临时堆场进行覆土平整土地，进行自然生态恢复。

在光伏电站建设期间，因为土地平整、砂石覆盖、土壤稳定等活动，保护了裸露地表和水土流失最小化。为保护随意堆放的土方、砂石等土壤流失，简单防护是可行的措施。防风设备和防尘网被用作临时土方上。土堆洒水抑尘，开挖后

回填减少土方量，竣工后临时建筑应拆除，施工废物应运至允许堆放处。

5.4 碲化镉光伏电池项目对生态环境影响的减缓措施

根据碲化镉 LCA 产物环节分析可知，在（1）采矿，（2）镉与碲冶炼/精炼，（3）镉与碲提纯，（4）碲化镉生产，（5）碲化镉组件制造，（6）用后处置各环节，采矿和组件制造对生态影响较大。

在开采环节中减少临时占地，减少植被破坏，在开展复垦工作时，将表土有序回填，使高原上十分珍贵的表层腐殖土得以保存和利用，提高植被恢复成功率，加强对矿山已绿化、复垦场地的抚育管理。

运营期严禁工作人员碾踩植被和土壤，尽量避免因人为活动对植被和土壤造成的不利影响；加强对生产人员进行环境保护知识教育，提高生产人员的环境保护意识。严禁生产人员捕杀周围野生动物。

项目产生的生态影响的防护和恢复应按照“避免→消减→补偿”的顺序最大限度地减少人为开发活动对自然资源和生态环境的破坏，以实现“开发中保护、保护中开发”的目标。

6 生产过程与工程实施过程环境监理与管理研究

6.1 生产过程环境监理与管理

项目在生产运行过程中为保证环境管理系统的有效运行应制定环境管理方案，环境管理方案主要包括下列内容：

（1）组织贯彻国家及地方的有关环保方针、政策法令和条例，搞好环境教育和技术培训，提高公司职工的环保意识和技术水平，提高污染控制的责任心。

（2）制定并实施公司环境保护工作的长期规划及年度污染治理计划；定期检查环保设施的运行状况及对设备的维修与管理，严格控制“三废”的排放。

（3）掌握公司内部污染物排放状况，编制公司内部环境状况报告。

（4）负责环保专项资金的平衡与控制及办理环保超标缴费工作。

（5）协同有关环境保护主管部门组织落实“三同时”，参与有关环保方案的审定及竣工验收。

（6）组织环境监测，检查公司环境状况，并及时将环境监测信息向环保部门通报。

（7）调查处理公司内污染事故和污染纠纷；组织“三废”处理利用技术的实验和研究；建立污染突发事件分类分级档案和处理制度。

(8) 努力建立全公司的 EMS (环境管理系统), 以达到 ISO14001、ISO9001, 和 OHSAS18001 的要求。

(9) 建立清洁生产审核计划, 体现“以防为主”的方针, 实现环境效益和经济效益的统一。

6.2 工程实施过程环境监督与管理

从工程实施的全过程而言, 地方环保、水利、交通、环卫等部门是工程实施期环境监督的主体, 而在某一具体或敏感环节, 银行、审计、司法部门及新闻媒体也是监督体系的重要组成部分。

(1) 建设单位与施工单位签定工程承包合同中, 应包括有关工程实施期间环境保护条款, 包括工程实施中生态环境保护(水土保持)、施工期间环境污染控制, 污染物排放管理, 施工人员环保教育及相关奖惩条款。

(2) 施工单位应提高环保意识, 加强驻地和施工现场的环境管理, 合理安排施工计划, 切实做到组织计划严谨, 文明施工, 环保措施逐项落实到位, 环保工程与主体工程同时实施、同时运行, 环保工程费用专款专用, 不偷工减料, 延误工期。

(3) 施工单位应特别注意工程实施中的水土保持, 尽可能保护好矿区沿线土壤、植被, 弃土、弃碴须运至设计中指定地点弃置, 严禁随意堆置。

(4) 各施工现场、施工单位驻地及其他施工临时设施, 应加强环境管理, 施工污水避免无组织排放, 尽可能集中排放指定地点; 扬尘大的工地应采取降尘措施, 工程实施完毕后施工单位及时清理和恢复施工现场, 妥善处理生活垃圾与施工弃碴, 减少扬尘; 施工现场应执行《建筑施工现场环境噪声排放标准》(GB12523-2011)相关标准。

(5) 认真落实各项补偿措施, 做好工程各项环保设施的施工监督与验收, 保证环保工程质量, 真正做到环保工程“三同时”。

7 碲化镉光伏电池项目协调性分析

7.1 现有政策法规协调性分析

根据《外商投资产业指导目录(2007年修订)》, 外商投资产业目录中鼓励第三类“制造业”的第(二十一)小类“通信设备、计算机及其他电子设备制造业”中第18项“高技术绿色电池制造: 动力镍氢电池、锌镍蓄电池、锌银蓄电池、锂离子电池、大容量全密封免维护铅酸蓄电池、太阳能电池、燃料电池、圆柱型

锌空气电池等”。

2013年2月产业结构调整指导目录（2011年本）（修正）

第一类 鼓励类

五、新能源 1.太阳能热发电集热系统、太阳能光伏发电系统集成技术开发应用、逆变控制系统开发制造。

十九、轻工 18.先进的各类太阳能光伏电池及高纯晶体硅材料（单晶硅光伏电池的转化效率大于17%，多晶硅电池的转化效率大于16%，硅基薄膜电池转化效率大于7%，碲化镉电池的转化效率大于9%，铜铟镓硒电池转化效率大于12%）。

根据刘向鑫（2013）等，美国和欧盟均对CdTe光伏产业持积极态度，但对于镉的使用和危害很严格。美国Brookhaven国家实验室和美国能源部已申请将碲化镉列入国家毒理学计划(NTP)，作为人体长期暴露研究的对象，收集客观数据。欧盟对含镉的电子产品有严格的限制，要求其中镉在材料中的含量不得超过0.01%（即100 ppm）。2005年8月生效的欧盟WEEE则要求含有受限之列元素产品的厂家提供资金用于召回并回收报废的产品。欧盟要求2014年起，27个成员国回收处理废电池板。

First Solar公司的碲化镉电池板以及其成功的回收处理保险策略而得以在德国等主要欧盟市场被广泛接受。目前建立第三方保证的回收机制已成为全球各CdTe光伏组件厂商进入市场的必备条件(European Union, 2012, Directive 2012/19/EU)。

2010年6月，欧盟议会环境委员会分别将可再生能源产品和光伏组件分别从RoSH与WEEE的禁运清单中排除出去。这将使得CdTe和CIS等含镉的光伏产品不再是被禁止的对象。

欧盟关于镉的管理政策已经对其他国家和地区起到了有力的示范作用，并使得类似的政策在中国、韩国、日本以及美国加利福尼亚州得以实施。以中国为例，目前中国对含镉产品采取的限制标准与欧盟的RoHS相同。其管理模式是通过制定《电子信息产品污染控制重点管理目录》，若含有危害元素的产品，其替代产品在技术和经济上已经可行，则放入目录进行限制。进入该目录的产品需要通过“中国强制性产品认证制度”认证方可入市。不在目录所列的产品，或出口和军工产品则不受限制。最新颁布的《目录》暂未将含CdTe和CdS的光伏产品列入此目录中。但是CdTe材料已经被列于《中国严格限制进出口的有毒化学品目录》（2012年）中，其进口和出口需向中国环境保护部申请。

表9 《中国严格限制进出口的有毒化学品目录》（2012年）

序号	化学品名称	别名	海关商品编号	计量单位
65	碲化镉		2842902000	千克

综上所述，中国对于太阳能发电和太阳能电池持有鼓励态度，但同时也向欧盟和美国一样，对于有毒重金属镉的使用有所限制，碲化镉列入了《中国严格限制进出口的有毒化学品目录》。

7.2 提高公众认知度可达性分析

近年来，我国相继发生了一些环境群体性事件，从上海磁悬浮项目到厦门PX项目，从什邡钼铜项目到启东污水排海项目，参与人数越来越多，涉及范围越来越广，影响程度越来越大。这些群体性事件无一例外都与环境保护，特别是环境影响评价有着或多或少的联系。

这些环保群体性事件中，公众采取合理合法的手段，积极维护自身权益，影响到单个项目甚至更高层面的环保决策。公众作为社会的主体，政府之外自下而上的力量，不断成长和强大，是社会民主和进步的体现，更给人警示，催人反省。

我国非常重视信息公开和公众参与。2008年5月，《政府信息公开条例》与《环境信息公开办法(试行)》颁布实施，有利于人民群众的环境知情权、监督权和参与权。2006年3月，《环境影响评价公众参与暂行办法》实施，明确规定环境影响评价过程中要开展公众参与，并公布了公众参与程序、内容和方式。这是我国行政审批环节第一个，也是目前唯一一个真正意义上的公众参与规范。《环境信息公开办法(试行)》和《环境影响评价公众参与暂行办法》的实施，是我国行政审批环节信息公开和公众参与的一个重大突破。

引入环境公众参与环境影响评价，有助于公众行使环境知情权、参与权和监督权，提高公众的环境意识，共同推动我国环境问题的解决，推进环境保护新道路建设；有助于公众参与环境决策，促进决策民主化，降低决策风险，提高决策科学性；有助于建立政府和民众的沟通交流平台，使决策部门及时、真实了解民意，缓解社会矛盾，促进社会和谐与进步。

环境影响评价制度在所有发达国家和部分亚洲国家已实现法制化，并将公众参与作为环境影响评价中的一个内容。对于具体项目而言，我国《环境影响评价公众参与暂行办法》中第六条规定“应当征求公众意见的建设项目，其环境影响报告书中没有公众参与篇章的，环境保护行政主管部门不得受理”。

在具体项目中引入公众参与机制，正确引导公众，有助于掌握主动权，提前考虑环境社会不利影响，成为项目能否顺利实施和运行的关键因素。

具体项目中，应通过相关专家评估、座谈、媒体宣传等多种方式，使公众了解碲化镉光伏电池项目对环境的影响程度，接受本项目。具体为：

- 1) 组织专家充分论证，力求结论科学、公正；
- 2) 及时主动公开项目信息，如在环评阶段按规定执行两次公告，运行期在公司网站上发布年度环境信息公告等；
- (3) 组织听证会或座谈会使公众了解项目信息，排除公众疑虑，运行期如有必要，可主动邀请公众参观厂区；
- (4) 对于公众提出的疑问及时回应；
- (5) 项建书、可研、环评等各个阶段充分征集公众意见，实行公开、透明原则。

7.3 现行标准等可达性分析

我国现行标准中也镉排放和允许浓度的有大气污染物综合排放标准（GB16297-1996）、地下水环境质量标准（GB/T14848-93）、地表水环境质量标准（GB3838-2002）、污水综合排放标准（GB8978-1996）、土壤环境质量标准值（GB15618-1995）等。

表 10 水环境各级标准值

	项目	I类	II类	III类	IV类	V类
《地下水环境质量标准》（GB/T14848-93）	镉(mg/L)	≤ 0.0001	≤0.001	≤0.01	≤0.01	>0.01
《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）	镉(mg/L)	≤0.001	≤0.005	≤0.005	≤0.005	≤0.01
《污水综合排放标准》（GB8978-1996）	总镉(mg/L)	最大允许浓度≤0.1				

表 11 大气污染物综合排放标准

序号	污染物	最高允许排放浓度 (mg/m ³)	最高允许排放速率(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
			排气筒(m)	二级	三级	监控点	浓度 (mg/m ³)
11	镉及其化合物	0.85	15	0.050	0.080	周界外浓度最高点	0.040
			20	0.090	0.13		
			30	0.29	0.44		

			40	0.50	0.77		
			50	0.77	1.2		
			60	1.1	1.7		
			70	1.5	2.3		
			80	2.1	3.2		

表 12 土壤环境质量标准值

级别	一级	二级			三级
土壤 pH 值项目	自然背景	<6.5	6.5~7.5	>7.5	>6.5
镉 (mg/kg) ≤	0.20	0.30	0.60	1.0	

在美国没有全国统一规定的水域功能区分类标准，在进行全国范围的水质评价时，依据《清洁水法》305b 条款水质评价相关规定，统一考虑8 类水域使用功能。河流功能可达性评价类别分为4 个类别。在每两年一次的全国范围河流水质评价中，美国各州统计每一水体功能对应每一功能可达性类别的河段长度，上报EPA统一汇总。

在对河流水质进行功能可达性评价的基础上,对除水域使用功能完全满足要求以外的其它3 种功能可达性评价类别，进一步识别水体受损的水质指标，分为3 种类型：关键、中度、轻度影响指标(major stressor)。中美两国的水环境标准体系具有较大的差异。美国的标准体系更为灵活，总体能满足中国标准的要求。

马来西亚的环境标准相对严格，污水中镉排放限值为0.02mg/L，中国的排放标准为0.1 mg/L。

此外根据中华人民共和国环境保护部、中华人民共和国国家发展和改革委员会2008年第1号令《国家危险废物名录》：

第四条 未列入本名录和《医疗废物分类目录》的固体废物和液态废物，由国务院环境保护行政主管部门组织专家，根据国家危险废物鉴别标准和鉴别方法认定具有危险特性的，属于危险废物，适时增补进本名录。

第五条 危险废物和非危险废物混合物的性质判定，按照国家危险废物鉴别标准执行。

根据FS提供的资料尚不能判断碲化镉太阳能电池废弃物是否属于危险废物，建议尽快开展毒性浸出鉴别试验。

7.4 建议

- 1、尽快鉴定碲化镉是否属于危险废物。根据我国危险废物鉴别标准-浸出毒

性鉴别（GB 5085.3—2007），尽快鉴定是否属于危险废物，如属于危险废物，则应遵循危险废物填埋污染控制标准及修改清单（GB 18598-2001）要求处置。

2、尽快制定碲化镉相关污染物排放标准。鉴于我国尚无针对碲化镉的相关污染物排放标准，且镉属于有毒重金属，为确保使用和生产过程中的安全性，应尽快制定碲化镉相关污染物的排放标准。

3、鉴于第一太阳能在全球包括欧、美、日已经安装应用了7Gw碲化镉薄膜，运行安全良好，为引进其先进技术，可先在国内安全可控的检测实验地点安装适度规模的碲化镉薄膜光伏系统，进行运行及环境影响检测评估，为决策提供坚实的可靠的依据。

4、根据《国家环境保护“十二五”规划》，“十二五”期间国家对COD、SO₂、NH₃-N、NO_x四种主要污染物实行排放总量控制计划管理，故建议污染物产生指标可计算以上四种常规污染物的每平米/功率太阳能板产生量。

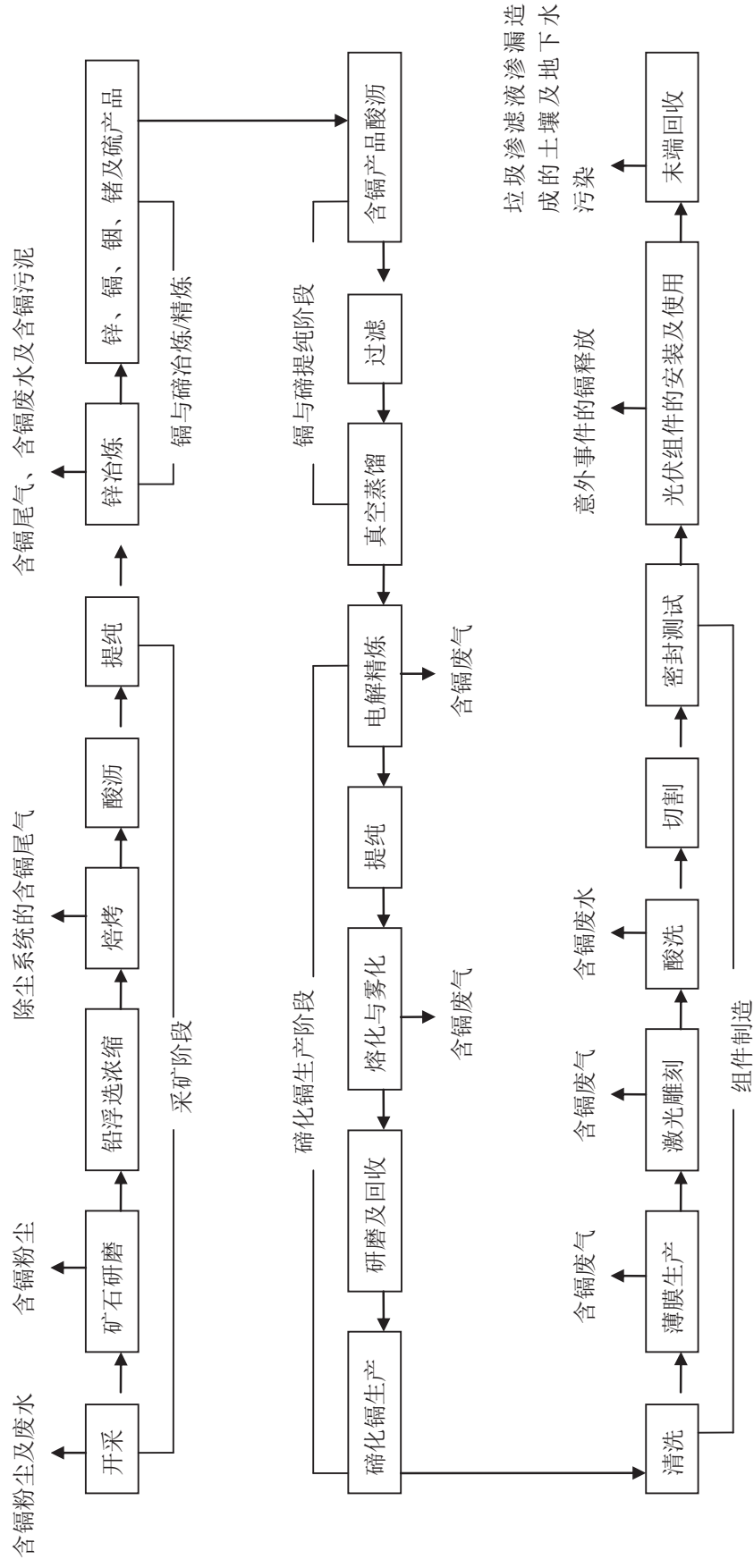
5、另根据《全国重金属污染综合防治“十二五”规划》（2011年），其中首次提出重金属总量控制，并规定汞、铬、镉、铅和类金属砷5种重金属为重点监控与污染物排放量控制目标。规划在全国范围内划分出重点区域和非重点区域实施。所称“重点区域”，包括内蒙古、湖南、广西、青海等14个重点省份和138个重点防护区。建议将镉作为特殊污染物，计算每平米/功率太阳能板镉的产生量，碲化镉太阳能电池产业布局时应充分考虑当地情况，结合我国重点生态功能区划，不触及生态红线，选择有发展潜力、环境容量大的区域进行项目的建设。

6、严格做好工厂工人的个人防护工作，设置合理的工作时间及轮岗制度；设置合理的安全防护距离。

参考资料:

- Beckmann, J., and Mennenga A., 2011. Calculation of emissions when there is a fire in a photovoltaic system made of cadmium telluride modules. Bavarian Environmental Agency, Augsburg, Germany.
- European Union. 2012. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast). Official Journal of the European Union.
- Fthenakis, V., and Y. Yu. 2013. Analysis of the Potential for a Heat Island Effect in Large Solar Farms. 39th IEEE PVSC, Tampa, FL.
- Fthenakis, V.M., Kim H.C., and Alsema, E., "Emissions from Photovoltaic Life Cycles," Environmental Science and Technology, 42, 6 (2008).
- Fthenakis V.M., "Life Cycle Impact Analysis of Cadmium in CdTe Photovoltaic Production," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8, 303-334, 2004.
- Kaczmar, S., Evaluation of Potential Health and Environmental Impacts from End-of-Life Disposal of CdTe Photovoltaics, SETAC North America 33rd Annual Meeting, Long Beach, CA, November 2012.
- Raugei, M., and V. Fthenakis., Cadmium flows and emissions from CdTePV: future expectations, Energy Policy, 38 (9), 5223-5228 (2010).
- Strevel, N., L. Trippel, and M. Gloeckler. 2012. Performance characterization and superior energy yield of First Solar PV power plants in high-temperature conditions. Photovoltaics International, August, 2012.
- Sinha, P., A. Meader, and M. de Wild-Scholten. 2013. Life Cycle Water Usage in CdTe Photovoltaics, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 3, Number 1, pp. 429-432.
- Turney, D. and V. Fthenakis. 2011. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 3261–3270.
- AV Solar Ranch One Final Environmental Assessment
- Campo Verde Solar Project Final Environmental Impact Report
- Desert Sunlight Solar Farm Project Final Environmental Impact Statement
- Maryland Solar Farm Environmental Review
- Stateline Solar Farm Environmental Impact Report

- Silver State South Solar Project Environmental Impact Statement
- 刘向鑫, 杨兴文.中国国情环境下 CdTe 光伏的全周期镉排放分析.
- GB3095-2012,环境空气质量标准.2012.
- GB3838-2002,地表水环境质量标准.2002.
- GB/T14848-1993,地下水质量标准.1993.
- GB15618-1995,土壤环境质量标准.1995.
- GB 18598-2001,危险废物填埋污染控制标准及修改清单.2013.
- http://www.cheminfo.gov.cn/zxzx/page_info.aspx?id=409532&Tname=hgyw



附图 碲化镉太阳能电池项目生命周期中的镉排放环节分析图

