

中国电力规划设计协会团体标准宣传系列

T/CEPPEA 5036-2023 《架空输电线路工程黄土地区岩土勘测技术规范》

标准起草单位：西北电力设计院有限公司

陕西省电力设计院有限公司

甘肃省电力设计院有限公司

山西省电力勘测设计院有限公司

黑龙江省电力设计院有限公司

青海省电力设计院有限公司

湖北省电力规划设计研究院有限公司

山东电力工程咨询院有限公司

标准起草人：刘志伟、段毅、岳英民、黄锋、赵栋、贾晋成、苏恩龙、薛远峰、杨生彬、刘常青、彭斌、李漪、樊柱军、程东幸、袁俊、张勇、石盼、饶虎、刘睿、王纪元、高鹏、宋世鑫、王克东、穆红文、李东杰、胡昕、单禹、韩晓萌、张秉来、曹滕平、张玮、王延辉、鄢治华、王红伟、范沛军、毕伟刚

标准审查专家：别传炎、李彦利、余小奎、王国尚、娄俊庆、陆威、马海毅、赵海飞、刘谢伶、杨逢春、陈念军

撰稿人：刘志伟

标准获取通道：协会官网 (<https://www.ceppea.net/>) 首页“中外电力工程技术标准数据管理平台入口”

中外电力工程技术标准数据管理平台离线客户端（会员单位）

一、编制背景

架空输电线路工程勘测设计中经常会遇到大面积黄土分布，岩土工程勘测需要解决塔位选择与稳定性评价、地基条件与黄土湿陷性评价、地下水与地质环境问题、杆塔基础方案与地基处理的选择、防水与排水工程措施等主要工程技术问题。黄土地区不同地貌单元中的杆塔，塔位稳定性为主要的影响因素。近些年来，受降雨量增多、局部地质环境变化、采空区和人类工程活动等因素影响，部分黄土地区出现了大面积的山体滑坡、崩塌等自然灾害，山体斜坡失稳导致杆塔出现地表开裂、基础相对位移、塔材过度受力变形等灾害性事故，发生较为频繁，影响到输电线路的正常运行。通过总结研究既往黄土地区架空输电线路杆塔失稳机理与致灾因素，系统建立勘测方法、选线和选位勘测原则、工作体系、评价方法与技术要点、塔基基础方案和防护治理措施、监测技术运用等成套的杆塔塔基稳定性岩土工程勘测评价体系与防治原则，从而规避黄土地区架空输电线路岩土工程勘测设计风险。在此背景下，编制完成了中国电力规划设计协会团体标准 T/CEPPEA 5036-2023 《架空输电线路工程黄土地区岩土勘测技术规范》。

二、主要内容

本标准的编写是为了在黄土地区架空输电线路岩土工程勘测中做到安全可靠、技术先进、经济合理、节约资源、保护环境，达到提高工程质量的目的。

本标准适用于黄土地区 110kV 及以上电压等级架空输电线路新建、改建工程的岩土工程勘测。

标准正文共设 12 章：范围、规范性引用文件、术语和定义、符号和缩略语、总体要求、可行性研究阶段勘测、初步设计阶段勘测、施工图设计阶段勘测、工程地质调查与测绘、勘探与测试、检验与监测、勘测成果。

资料性附录 A：黄土地貌类型及特征

资料性附录 B：黄土斜坡分类及特征

资料性附录 C：黄土洞穴分类及特征

资料性附录 D：黄土沟谷分类及特征

资料性附录 E：塔基监测项目和监测方法

资料性附录 F：黄土斜坡稳定性半定量评价与主要防治原则

资料性附录 G：黄土地区杆塔基础类型主要特点和适用性

资料性附录 H：黄土地区线路工程地质条件一览表

三、与现行标准比较的技术优势

国家标准《湿陷性黄土地区建筑标准》（GB 50025-2018）第 4 章是对建筑工程勘察的要求，《1000kV 架空输电线路勘测规范》（GB 50741-2012）第 10.1 节“湿陷性土”的 4 个条文和《330kV~750kV 架空输电线路勘测标准》（GB/T 50548-2018）第 17.1 节“湿陷性黄土”的 5 个条文，均是对黄土勘察的总体要求，以上 3 项国家标准都不涉及如何对应执行的内容。

本标准编制过程中，开展了黄土地区架空输电线路科研成果汇总分析及岩土勘测调研、黄土地区输电线路典型事故案例调研、黄土地区采空塌陷问题案例调研等工作；编写了黄土地貌类型和划分、黄土洞穴、黄土冲沟、黄土斜坡、黄土边坡、水环境条件、杆塔基础类型选择、防排水措施、塔基监测等专题报告，其技术优势体现在以下几个方面：

1. 提出了各勘测阶段以及按黄土塬、黄土山地与黄土梁峁、黄土阶地地貌单元划分的勘测技术要求和工作重点内容。

2. 工程地质调查与测绘的工作内容：沿线地形地貌和塔基微地貌的调查与测绘；滑坡、崩塌、泥石流、斜坡、洞穴、冲沟、地裂缝和煤矿采空区等不良地质问题的调查与测绘；地表水与地下水水环境条件的调查与测绘。

3. 勘探方法选用、钻探编录、工程物探、原位测试与室内土工试验的规定。

4. 塔基稳定性监测要素、监测项目和监测方法的选择等技术内容。

5. 黄土地区输电线路工程评价技术核心内容：包括塔基范围区域地质环境稳定性分析与评价、斜坡坡度容许值与稳定性半定量评价、洞穴岩土工程分析与评价、杆塔基础类型（基础形式）适用性与合理选择、杆塔防水及排水措施分析与建议、地基处理分析与建议以及杆塔地基施工问题分析与对策建议等。

四、标准重点关注的几个问题

为方便理解，对本标准重点关注的几个问题说明如下：

1. 架空输电线路工程黄土地貌的划分

查阅各类文献资料，黄土地貌类型的划分各有特点，总体上从黄土地貌的成因、地貌形态、规模及形态组合等方面进行分类。根据架空输电线路的特点，标准中黄土地区地貌类型划分时需要考虑：①按地貌形态和规模划分时，主要考虑大型地貌、中型地貌，对于小型地貌及非主要地貌等，仅对具体塔位考虑其对稳定性的影响；②按地貌成因进行划分时，考虑主要的成因类型，同时结合地貌对工程的影响对黄土地貌的分类进行必要的简化和归类；③黄土斜坡、沟谷、洞穴等对输电线路的影响，应作为塔位周边环境的不良地质问题予以考虑。

根据以上分析，标准中按黄土塬、黄土阶地、黄土山地、黄土梁和黄土峁进行了地貌单元划分（图1～图4），并阐明了其主要特征。



图 1 黄土塬



图 2 黄土阶地



图 3 黄土山地与黄土梁



图 4 黄土崩

2. 注重不良地质问题与水环境条件调查

输电线路工程事故调查表明，黄土地区工程问题主要是大面积山体滑坡、崩塌、斜坡失稳导致杆塔出现地表开裂、基础相对位移、塔材过度受力变形等灾害性事故，以及排水不畅导致的土体湿陷变形、基础沉降或采空区地裂缝对塔基的影响等。标准编制中除对输电线路作业中常见的滑坡、崩塌、泥石流调查进行规定外，还重点对斜坡、沟谷、洞穴等不良地质问题及地表水、地下水环境条件提出了调查与测绘要求。图 5 为某 750kV 线路工程受人类工程活动影响引发黄土斜坡滑塌对杆塔安全造成严重威胁；图 6 为某 330kV 线路工程杆塔处水环境条件变化造成黄土场地湿陷和裂缝形成，影响塔基安全。

1) 黄土斜坡主要分为厚层黄土斜坡、土岩组合黄土斜坡两大类，厚层黄土斜坡的地质结构模型及其主要特征见表 1，土岩组合黄土斜坡的地质结构模型及其主要特征

见表 2。黄土斜坡的坡形主要有直线形、折线形、凸形、凹形和台阶形等，不稳定斜坡工程地质调查与测绘内容包括：①地形地貌、地层岩性、软弱结构面、覆盖层厚度、斜坡的边界范围等；②斜坡坡形、坡度、坡向、地层产状与斜坡临空面的关系及发展趋势；③地下水类型、水位、水量、含水层分布、补给及动态变化情况；④地表水入渗情况、产流条件、径流强度、冲刷作用等。

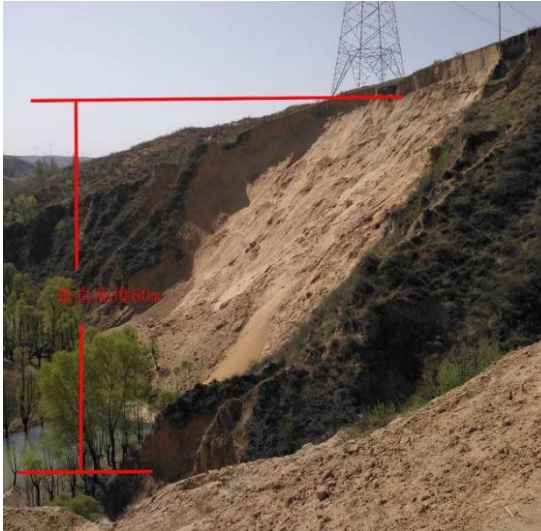


图 5 黄土斜坡破坏



图 6 黄土场地湿陷和裂缝

表 1 厚层黄土类斜坡地质结构模型及其主要特征

斜坡地质结构模型	地层结构	土层构造	水文地质条件	不良地质现象
单一均质黄土结构（I）	主要为风积砂黄土类，广泛分布于西北地区，以兰州新区、陕北白于山区为代表。厚度一般大于 50m，结构均一	原生节理不发育，构造节理不发育，偶见虫孔，黏粒含量少，砂粒含量多，多以粉土类为主	地下水埋藏深	黄土多具湿陷性，斜坡顶部往往有陷穴或落水洞分布，局部存在小型崩塌。黄土梁峁地形为主，沿梁峁两侧串珠状落水洞分布明显，溯源侵蚀严重。地质灾害多以黄土层内滑坡居多，溯源侵蚀现象发育，冲沟切割多呈“V”型，落水洞多呈串珠状发育
新老黄土组合型结构（II）	上部多以 Q ₃ 、Q ₂ 为主的褐黄色或浅黄色黄土，其下多是 Q ₂ 、Q ₁ 棕红色老黄土。厚度 20m~100m 不等。主要分布在陕北、青海海东、甘肃天水、山西等地区，分布较为广泛	原生节理发育，黄土构造节理较发育	地下水埋藏深。局部见有层间湿润带	上部 Q ₃ 、Q ₂ 为主的褐黄色或浅黄色黄土多具湿陷性，斜坡顶部往往有陷穴或落水洞。地质灾害多以黄土层内滑坡居多，其滑动面多在两层黄土界面附近，溯源侵蚀现象发育一般，冲沟切割多呈“U”型，落水洞呈线状、点状发育
台塬黄土型结构（III）	黄土与古土壤多层结构，含古土壤 3 层~9 层，钙质结核较多，偶有钙板层。主要分布在延安、铜川、陇东等黄土塬区，具典型黄土塬特征	原生节理发育，关中地区黄土构造节理较发育	地下水埋藏深，局部见层间湿润带	斜坡坡面剥落较严重，尤其是古土壤剥落严重。黄土塬塬边区域地质灾害以滑坡、崩塌为主，冲沟切割多呈“U”型

表 2 土岩组合黄土类斜坡地质结构模型及其主要特征

斜坡地质结构模型	地层结构	主要分布	水文地质条件	不良地质现象
厚层黄土—基岩斜坡结构（IV）	主体由新、老黄土组成，在坡脚多有基岩出露。黄土与基岩为不整合接触	黄土高原的黄土塬或黄土残塬地区，包括白草原、陇东南部的黄土塬及渭北黄土塬、陕北及山西的黄土残塬等	地下水埋藏深，偶见基岩顶面有地下水溢出	若黄土与基岩接触面有地下水溢出，则斜坡稳定性差，可产生较大规模滑坡；若无地下水，则斜坡稳定性较好
薄层披覆式黄土—基岩斜坡结构（V）	由薄层黄土披覆于基岩山体上，绝大部分厚度不大于 10m	中低山地区，包括子午岭、白于山、黄龙山等黄土台塬过渡至中低山地区，黄土可覆盖在分水岭之上，由于剥蚀强烈，沉积厚度不大		
黄土—冲积层	主要是宽大的高阶地，	黄河主干道及其一、二级支流堆积岸。黄河	地下水埋藏深度	地质灾害相对发育在

一基岩阶地型 斜坡结构（VI）	主要地层上部主要由黄土，中间夹冲积层，其下为基岩的结构。黑方台类型为其主要代表	在六盘山以西发育六级阶地，永靖到兰州段三级阶地尤为发育，形成宽大台地，兰州市一级阶地发育。一级支流渭河、二级支流泾河、洛河在六盘山以东发育五级阶地，一二级阶地发育	不一，有的在冲积层内有地下水，有的无地下水	高阶地边缘，多以滑坡为主
--------------------	---	---	-----------------------	--------------

2) 黄土洞穴按其成因分为地质作用形成的自然洞穴与生物洞穴，然后按其他各种不同因素再加以细分，工程地质调查与测绘内容包括：①洞穴的类型、主要成因、作用介质、形成机理；②分布范围、尺寸、埋藏深度及与塔基的相对关系；③地表水流及地下水对黄土洞穴的冲蚀、潜蚀和湿陷等作用，判断洞穴发育趋势，评价对线路塔基稳定性的影响。

3) 黄土沟谷按照沟谷溯源侵蚀、下切侵蚀和侧向侵蚀作用的不同及横剖面特点分为发育阶段和衰老阶段，提出了黄土沟谷分类及其特征。对塔基有显著影响的是浅沟、切沟、冲沟、干沟（塄沟）和河沟，工程地质调查与测绘内容包括：①沟谷的深度、宽度、沟壁坡度、横断面形态及发育阶段；②沟谷沟壁的岩性特征、黄土下伏基岩的风化程度、各种结构面的产状、充填物质及与沟坡的组合关系；③沟谷沟壁的水土流失与塌落情况；④沟谷内堆积物特征及地表植被发育情况；⑤当地的降雨情况、冲沟的汇水面积、水量大小、最高洪水位、水流对沟底的下切侵蚀作用和对沟壁的冲刷程度；⑥沟谷上游沟坡坡度、松散物质的堆积情况、植被发育状况，并判断发生泥石流的可能性。

4) 黄土地区输电线路需对水环境条件进行调查和详细记录，评估地下水上升、侧向水渗入和地面水汇聚、排泄、下渗对坡体及塔基的影响，并提出工程建议。

地表水环境调查内容包括：①搜集气温、湿度、降水量、蒸发量以及暴雨频率、强度、分布等气象资料；②地形的起伏和地表水的积聚、排泄条件，河流、湖泊、水库、灌溉区等地表水体的分布、动态变化、汇聚、排泄及其与塔基和坡体的位置关系；③洪水淹没范围及其发生规律，坡脚洪水、河水浸泡及水流冲刷、剥蚀情况；④河岸冲刷、水库塌岸的规模、速度及发展趋势；⑤人类活动形成的梯田、填挖方对塔基地表水排泄条件及水环境的影响；⑥坡面冻融破坏情况及冻土深度。

地下水环境调查内容包括：①地下水类型、分布与补给、径流、排泄条件；②泉水、渗水点类型、分布及其出露条件；③土岩边坡坡面地下水出露位置、动态变化，坡体隔水层和软弱夹层分布情况；④地下水位的深度、季节性变化幅度、升降趋势及其与地表水体、灌溉情况和地下水开采的关系，评估地下水上升的可能性和程度。

3. 线路路径选择

黄土梁峁及斜坡地带的杆塔，应对边坡结构、地质构造、洞穴、地裂缝、冲沟、地面汇水条件进行分析，判定塔位地质环境的适宜性和塔基受水稳定性，提出线路路径和塔位选择、地基处理、基础方案、地面防排水的措施或建议。线路路径一般需避开：①不良地质作用强烈发育地段；②黄土洞（坑）穴密集地段；③河流、新建水库、人工湖等水位变化可能影响杆塔稳定的地段；④黄土凹地和地表积水区域及汇水面积较大的低洼地段；⑤现采空区、未来采空区及严重塌陷地段；⑥人类活动及生态环境变化可能严重影响黄土稳定性的地段。

4. 黄土斜坡稳定性评价

处于黄土斜坡处的杆塔，稳定性成为塔基选位的主要影响因素。通常情况下，可结合已有工程经验作出判断，部分塔位条件受限时还需要进行深入细致的工作。输电线路距离长、范围广，往往现场作业时间也很紧张，这时对个别塔位需要进行初步的稳定性分析，标准编制中结合已有科研成果和实践经验，提出了考虑岩土性质、失稳证据、微地貌、斜坡形态、斜坡结构、水的作用、人类活动和地震等影响因素进行评分（表3）的半定量评价方法。依据综合分值分为稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定四级，提出了分别采取常规勘测、重点勘测和评估、专项勘测及监测预警、建议避让的处治原则。

表3 黄土斜坡稳定性影响因素评分表

影响因素		权重 M	评分标准 γ			
			10	7	4	1
岩土性质	黏粒含量	0.050	$\rho < 5\%$	$5\% \leq \rho < 10\%$	$10\% \leq \rho < 20\%$	$\rho \geq 20\%$
	历史滑坡	0.059	经常发生	有发生	很少发生	无发生
失稳证据	现今变形	0.119	迹象明显	迹象较明显	迹象不明显	无迹象
微地貌	沟谷地貌	0.013	切沟	冲沟	干沟	河沟
	沟间地貌	0.013	黄土斜坡	黄土梁坡	黄土崩坡	黄土台塬中部
	黄土洞穴	0.026	暗穴	陷穴	冲穴	生物洞穴
斜坡形态	坡形	0.019	凸形	阶梯形	直线形	凹形
	坡度	0.079	$\theta \geq 45^\circ$	$30^\circ \leq \theta < 45^\circ$	$20^\circ \leq \theta < 30^\circ$	$\theta < 20^\circ$
	坡高	0.035	$H \geq 150\text{m}$	$150\text{m} > H \geq 100\text{m}$	$100\text{m} > H \geq 50\text{m}$	$H < 50\text{m}$
	临空面高度	0.021	$h \geq 100\text{m}$	$100\text{m} > h \geq 50\text{m}$	$50\text{m} > h \geq 10\text{m}$	$h < 10\text{m}$
斜坡结构	地层结构	0.036	黄土-基岩	黄土斜坡	顺层基岩斜坡	切层基岩斜坡
	接触面产状	0.071	顺坡外倾 $>$ 坡角	顺坡外倾 $<$ 坡角	水平	倾向坡内
水的作用	地下水	0.183	黄土+基岩裂隙水	黄土孔隙上层滞水	基岩裂隙水	无地下水
	大气降水量	0.091	$m > 1000\text{mm}$	$700\text{mm} < m \leq 1000\text{mm}$	$400\text{mm} < m \leq 700\text{mm}$	$m \leq 400\text{mm}$
人类活动	排水状态	0.065	无排水	排水一般	排水较好	排水很好
	支挡措施	0.021	无支挡	支挡一般	支挡较好	支挡很好

	渗流影响	0.030	影响很大	影响较大	影响一般	无影响
地震	地震基本烈度	0.069	IX	VIII	VII	VI

5. 杆塔防水及排水

根据场地水文条件、地形特点、黄土的湿陷等级和工程的重要性提出因地制宜设置临时性和永久性杆塔防水及排水措施的建议，相关要求有：①杆塔远离水浇地、有汇水的区域，塔基周边排水通畅；②杆塔远离水渠和水管，处于地形相对平坦的杆塔安全距离不宜小于湿陷性土层厚度的 1 倍且不小于 10m，斜坡地段杆塔应针对潜在渗流问题进行充分分析论证，采取相应措施；③杆塔地表应设置散水，散水设置宽度不应小于上拔土体破坏范围；④当塔位处有地表径流时，塔位周围地面应保证排水通畅，场地不积水，距离基础中心 10m 范围内地面的排水坡度不宜小于 2%；⑤在地基湿陷等级为Ⅲ级、Ⅳ级的自重湿陷性黄土场地，原状土基础可根据塔基微地形和水文条件在基础上部设置隔水层；⑥评价地下水上升、侧向水渗入和地面水汇聚、排泄、下渗对基础的影响；⑦存在大面积挖填方时，应评估挖填方对水环境的影响和湿陷性的变化。

五、应用情况和应用效果

本标准实施以来广泛应用于陕西、甘肃、青海、新疆、宁夏、山西、内蒙等黄土地区数十项 110kV 及以上电压等级架空输电线路工程，下面列举几项具有代表性的重点项目将应用情况和应用效果分别加以说明：

【示例 1】“甘肃-浙江±800kV 特高压直流输电线路工程”

工程起于甘肃省武威市民勤县的送端换流站，止于浙江省绍兴市上虞区的受端换流站。按单回路架设，线路全长约 2370km，途经甘肃、宁夏、陕西、河南、安徽、浙江 6 省区，涉及黄土梁、黄土峁、黄土山地等地形，根据 T/CEPPEA 5036-2023《架空输电线路工程黄土地区岩土勘测技术规范》，确定了避开地段和优选场地的原则：

1) 黄土梁、黄土峁等地貌单元具有地形起伏较大、山体浑圆的特点，部分塔位在定位过程存在塔位位置选取困难，在塔位选择时，重点对影响塔基稳定性的因素进行调查与测绘，并避开下列地段：

- 周围边坡高陡且顶部狭窄的黄土梁、黄土峁地段；
- 滑坡、崩塌及其它不良地质作用强烈发育的地段；
- 深切黄土冲沟的两侧及溯源侵蚀影响地段；
- 黄土漏斗、陷穴、落水洞、湿陷坑及湿陷裂缝等密集且强烈发育的地段；
- 黄土构造台阶、断层崖及构造裂缝（地裂缝）附近地段；
- 地表冲刷严重且坡度较大、坡脚受常年或季节性地表径流影响，及存在开挖且构成影响的黄土斜坡地段。

2) 黄土山地与黄土梁、黄土峁区杆塔塔位优先选择下列场地：

- 黄土山地、黄土梁、黄土峁的顶部宽阔平台；

——黄土山地、黄土梁山脊的中上部位。

根据以上原则，在施工图勘测定位时选择了恰当的立塔位置（图 7），避开了一些危险地区（图 8），保证了塔位的安全。



图 7 黄土山地与黄土梁山塔位优选



图 8 黄土场地洞穴调查

【示例 2】“达拉特—蒙西 1000kV 特高压交流工程”

达拉特—蒙西 1000kV 特高压交流工程起于拟建达拉特 1000kV 变电站（万太兴站址），止于已建 1000kV 鄂尔多斯变电站。全线位于内蒙古自治区鄂尔多斯市内，按两个单回路架设，线路总长约 $2 \times 241.5\text{km}$ 。

线路沿线多为低山丘陵地貌，岩土破碎，降雨量大，地震活动频繁，诸多因素为不良地质作用的发育创造了条件，主要表现为滑坡、崩塌、采空区、冲沟、泥石流、窑洞及落水洞等。

滑坡是本线路路径沿线地质灾害类型之一，黄土滑坡是线路路径区域内主要的滑坡类型（图 9）。受构造运动的影响，以及在流水、风力等多种地质因素和自然因素作用下，沿线沟谷纵横，沟谷形态一般为“V”型，坡度一般在 $20 \sim 40^\circ$ 之间，切割深度一般为 $100 \sim 400\text{m}$ 。线路沿线滑坡基本以单点中小型为主，本工程对沿线已产生滑动的滑坡采取了绕避措施。

黄土崩塌多为倾倒式和崩滑式，一般规模较小，多发育于坡度大于 $50 \sim 60^\circ$ 以上的黄土陡坡、陡崖地段（图 10），也有少数自然边坡由于沟谷水流冲刷掏蚀作用形成，本工程对线路路径范围内规模较大的崩塌灾害采取了避让措施。



图 9 黄土滑坡



图 10 黄土崩塌

线路沿线落水洞多分布于黄土沟谷的边缘部位（图 11）。落水洞的成因主要是流动水体（雨水、农田灌溉水等）沿黄土垂直节理发生长期渗透、冲刷、潜蚀等作用形成竖向空洞或通道，常自地面贯通至出口或黄土层底部，大多呈串珠状，也有独立存在的，规模大小不一。落水洞发育地段地形破碎，黄土被切割、冲刷，常形成地面塌陷，崩塌，严重者可诱发滑坡，勘测工作中进行了详细的工程地质调查与测绘，提出了针对性的工程措施与建议。

冲沟是本线路路径沿线最常见地质灾害类型之一，勘测沿线黄土区段两侧水土流失严重，沟壑纵横，特别是两侧冲沟发育，沟头不断前进、沟岸极具扩张、沟床强烈下切，滑坡一般与冲沟伴随发生（图 12）。线路沿线的冲沟一般由沟口部分向上扩展，在沟头部位形成下切陡坎，随着陡坎受急流侵蚀并发生坍塌，冲沟不断向上游发展，规模和长度不断增加，最终逐步延伸至塔基，进而冲刷、掏蚀塔基基础，危及杆塔安全。勘测工作中采取了避让措施，避开了危险地段，选择地质条件较好的位置立塔。



图 11 黄土落水洞



图 12 黄土冲沟

【示例 3】“哈密—重庆±800kV 特高压直流输电工程”

哈密—重庆±800kV 特高压直流输电工程起于新疆维吾尔自治区哈密市巴里坤哈萨克自治县，止于重庆市渝北区大湾镇。甘肃省天水市、陇南市沿线地形地貌主要为低中山、中山地貌，地质环境较为脆弱，是滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的主要发育区。沿线滑坡类型主要有黄土滑坡（图 13）、黄土-红层滑坡（图 14）、基岩滑坡和堆积层滑坡四大类型。前两者主要分布于陇中黄土高原区，后两者主要分布于陇南基岩山地。黄土滑坡可进一步划分为黄土层内滑坡和黄土接触面滑坡，黄土-红层滑坡可进一步分为黄土-红层顺层滑坡和黄土-红层切层滑坡。

依据 T/CEPPEA 5036-2023《架空输电线路工程黄土地区岩土勘测技术规范》要求，勘测团队对沿线 188 级位于黄土地区的塔基进行了重点勘察。针对武山县、甘谷县等陇中黄土高原区，团队应用无人机、遥感解译等手段，宏观上详细查明黄土层内滑坡和黄土-红层滑坡的分布范围、滑动面位置及初步了解岩土物理力学性质。在掌握这些数据后，设计人员严格遵循规范中“线路应尽量避免开滑坡体，无法避开时需采取专项勘察工作”的思想，一方面，对线路路径进行优化调整，成功绕开 8 处规模较大的黄土滑坡体，确保铁塔基础处于稳定的地质环境中，并提出了针对性的基础开挖风险防范措施分析。在通过详细的工程调绘及井探、钻探取样等手段，充分证实古滑坡已处于基本稳定状态后，才可进一步考虑是否具备立塔条件。同时，严格筛选立塔位置，确保铁塔处于滑坡堆积体中的相对稳定安全区域，并对施工完成后的铁塔展开长期监测和运行维护工作，一旦监测到地质环境出现变化或恶化趋势，威胁塔基稳定性时，立即启动预警机制并采取相应处置措施。塔基运行期间，铁塔周边截排水系统、支挡结构、锚固设施若遭遇人为破坏或功能失效情况，根据规范要求建议第一时间开展修复工作，同步加强变形监测频率，确保塔基安全运行不受影响。

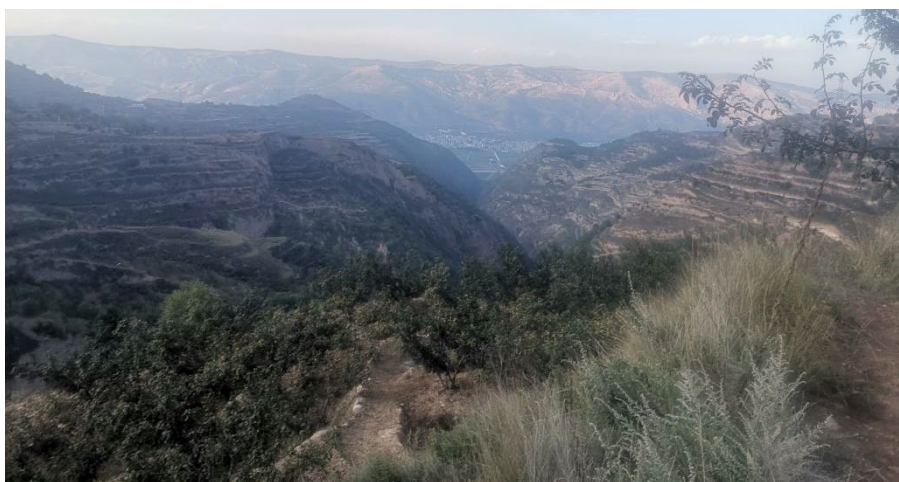


图 13 黄土滑坡



图 14 黄土-红层滑坡

【示例 4】“陕西-河南±800kV 特高压直流输电线路工程”

陕西-河南±800kV 特高压直流输电线路工程起于榆林±800kV 换流站工程（送端），止于开封±800kV 换流站（受端）。陕西省榆林市沿线地形地貌主要为陕北地区典型的黄土梁、峁地貌，仅 1 基为河流二级阶地地貌，黄土梁、黄土峁地貌共涉及 267 级杆塔，黄土梁、黄土峁斜坡地势起伏较大，部分斜坡地段多改造为人工梯田，输电线路沿线发育崩塌、滑坡（图 15、图 16）及冲沟等不良地质作用，严重威胁杆塔稳定性与输电线路安全。

在勘测方法选择上，T/CEPPEA 5036-2023《架空输电线路工程黄土地区岩土勘测技术规范》强调综合勘测手段的运用。工程团队依据规范要求，将工程地质调查与测绘、遥感解译、井探、钻探、静力触探、人工洛阳铲勘探和室内试验等方法有机结合。通过工程地质调查与测绘，对线路全线进行宏观把控，获取地质地貌的基本信息；利用遥感解译技术和无人机技术，从高空视角识别潜在的不良地质区域，为后续实地勘测提供精准方向。利用静探、井探、钻探等勘测手段，获取详细的岩土体物理力学性质参数，为杆塔基础设计提供可靠依据。

针对黄土梁、黄土峁及斜坡地带的不良地质现象发育区域，规范要求对杆塔稳定性影响范围内的不良地质问题进行详细描述。在岩土勘察工作中，对杆塔 30m×30m 范围内每一处不良地质现象的分布范围、类型特征、形成机制、发育趋势及对杆塔稳定性的影响程度展开深入研究和评价。参考本标准中附录 F 的要求，根据本标准中提出的黄土斜坡稳定性半定量评价与主要防治原则，对位于黄土地区的杆塔稳定性进行半定量评价，评价要素综合了岩土性质、失稳证据、微地貌、斜坡形态、斜坡结构、水的作用、人类活动和地震等多方面的因素，对每一级塔基进行多因素权重下的综

合评分，根据评价结果，有 10 级杆塔综合分 N 介于 3.6~5.3（欠稳定）之间，有 5 级杆塔综合评分 N 值介于 5.3~10.0（不稳定）之间，之后与电网专业就线路路径优化进行了多次沟通，最终除 3 级处于欠稳定的杆塔采用加固措施外，其他杆塔均进行有效避让的措施，有效降低了工程建设风险，确保了输电线路在复杂地质条件下的长期稳定运行。



图 15 黄土滑坡



图 16 黄土滑坡

【示例 5】“桥头电厂以大代小 750kV 送出工程”

线路沿线杆塔主要位于黄土梁、黄土斜坡、河流阶地及河漫滩等地貌。除局部地段外，线路沿线均属于黄土丘陵地貌单元，地势总体表现为西高东低的特征，高程在 2500~2800m。丘陵顶部较为浑圆或相对较平坦，沟谷切割较深，切割深度 20~80m，在中上游一般呈“V”字型，下游较宽阔、平展，各支沟除少部分地段有水体外，大部分为干沟，植被稀疏，地质环境脆弱，水土流失严重，沟谷两侧自然谷坡较陡，呈现出黄土高原中期剥蚀地貌特征。个别沟谷见有小型滑坡体分布。该段地层上部为第四系风积黄土，下伏白垩系（K）泥岩。由于工程沿线资料相对较少，因此如何合理布置勘察方案并获取有效的试验数据是本工程的一大难题，在沿线地质灾害较为发育的情况下，通过勘察工作确保塔位安全，是本项目勘测工作的目标。

基于以上情况，根据 T/CEPPEA 5036-2023《架空输电线路工程黄土地区岩土勘测技术规范》第 8.1.6 条“330kV~750kV 线路同一类型地貌单元布置不宜少于 2 个”的探井布置原则，合理布置了工作量，既保证黄土工程性质评价的要求，又不至于过度勘察。根据“9.3 不良地质作用”章节的相关内容，避开了影响塔位安全的大型滑坡，通过与设计专业密切沟通，选取了合适的线路方案，保证了线路安全（图 17、图 18）。



图 17 黄土山地



图 18 古滑坡

这些应用成果表明， T/CEPPEA 5036-2023《架空输电线路工程黄土地区岩土勘测技术规范》在黄土地区架空输电线路岩土工程勘测中做到了安全可靠、技术先进、经济合理、节约资源和保护环境，提高了工程质量，产生了良好的经济和社会效益。