

地质环境因子对水土保持工程稳定性的作用机制

潘以业

广西任企工程咨询有限公司 广西 南宁 530031

【摘要】：水土保持工程作为防治土壤侵蚀，保护土地资源的重要基础设施，受到多种地质环境因子影响，主要分析岩土体工程特征、地质构造特征、地形地貌特征、水文地质特征四个方面。岩性决定了成土母质的力学性质和抗蚀性，影响工程基础稳定；地质构造通过节理、断层等结构面影响岩土体的完整性和强度；地形地貌通过坡度、坡长控制径流动能和侵蚀强度；水文地质特别是地下水是造成边坡失稳和工程破坏的首要因素。各个因子之间存在耦合放大作用，岩性为基、构造为架、地形为表、水文为脉，影响工程稳定性。水土保持工程的规划设计与后期管理需充分认识地质环境，因地制宜采用多因子的控制，才能保证工程的长期稳定。

【关键词】：地质环境；环境因子；工程稳定性；水土保持

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.082

引言

水土保持工程（梯田、淤地坝、谷坊、截流沟、护坡等）是治理水土流失、改善生态的重要工程，受地质环境的影响而长期稳定性的日益受到重视。与土木工程不同，水保工程大都为复杂的地质地貌单元，规模小、分布广、标准低，对地质环境敏感，失稳，不仅前期投入失效，还可能引发新的水土流失及地质灾害。地质环境是岩石、土体、地下水、构造、地形地貌等的综合系统，工程和地质环境具有复杂的互馈关系：工程改变地表、改变岩土体、改变地下水流、改造地质环境，地质环境又反过来影响工程的长期服役性能，这种双向作用使地质环境因子成为工程稳定性评价的基础。但目前，大多数研究关注于植被配置、设计参数和效益评价，对地质环境因子的作用机制研究较少。厘清地质环境因子的作用机制对科学规划工程布局、优化设计方案、采取有效维护管理有重要意义。

1 岩土体工程特性对工程稳定性的控制作用

1.1 岩性对土壤抗蚀性的控制作用

土壤抗蚀性是土壤抵抗水流分散和搬运的能力，是表征水土保持工程防护对象的稳定性指标之一。岩性通过影响土壤颗粒组成、团聚体稳定性、有机质含量等影响土壤抗蚀性的大小，江西红壤区研究表明红砂岩、花岗岩、第四纪红黏土三种岩性发育的红壤，其团聚体稳定性和抗分散能力差异显著，不同岩性成土母质影响土壤的抗蚀性变化特征。北盘江中游地区研究表明，岩性对土壤抗蚀性的影响程度仅次于土壤石砾含量，在各影响因子中排名第二，甚至超过土壤有机质、坡度和土地利用类型。土壤抗蚀性差异的内在机理为成土过程中产生的颗粒级配及胶结特性差异，花岗岩风化形成的土壤砂粒含量高，颗粒间胶结作用弱，抗蚀性差；碳酸盐岩风化形成的土壤黏粒含量高，有机质容易积累，团聚体稳定性高，抗蚀性好。3种典

型岩性发育的土壤理化性质与抗蚀性指标对比数据见表1。

表1 江西红壤区不同岩性红壤理化性质与抗蚀性对比

岩性类型	有机质含量 (g/kg)	>0.25mm 水稳性团聚体 (%)	结构破坏率 (%)	抗分散系数	土壤容重 (g/cm ³)
红砂岩发育红壤	12.36	45.28	32.15	0.58	1.32
花岗岩发育红壤	10.85	38.42	41.33	0.71	1.38
第四纪红黏土发育红壤	18.64	62.57	21.46	0.41	1.25

数据来源：江西农业学报，2024,36(5):基于王旭等对江西红壤区不同岩性土壤抗蚀性变化特征研究数据整理。

从表1可以看出，第四纪红黏土发育的红壤有机质含量最高（18.64g/kg），>0.25mm的水稳性团聚体含量62.57%，结构破坏率为21.46%，各项指标都优于红砂岩和花岗岩发育的红壤，可见岩性影响土壤抗蚀性的因素为有机质、团聚体、结构稳定性。

1.2 岩土体力学性质对工程结构稳定性的影响

水土保持工程挡土墙、淤地坝、护坡等工程直接作用于岩土体上，因此首先影响地基岩土体的力学性质。岩性决定了岩土体的内摩擦角、黏聚力、压缩模量、渗透系数等，其优劣直接影响水土保持工程的抗滑、抗倾覆和抗沉降能力。

1.2.1 岩土体强度参数的工程意义

内摩擦角是土体颗粒间的摩擦阻力,黏聚力是土体颗粒间的胶结强度,对于梯田田坎、淤地坝坝坡等土质边坡,抗滑稳定性直接取决于这两个参数的大小,土体内摩擦角每降低10%,边坡安全系数约降低12%至15%;黏聚力每降低10%,边坡安全系数约降低8%至10%。岩土体力学参数受母岩岩性所影响,花岗岩风化土砂粒含量高,内摩擦角大但黏聚力小,边坡易发生浅层滑动,泥岩风化土黏粒含量高,黏聚力大但内摩擦角小,遇水软化,长期稳定性差。

1.2.2 岩土体结构特性的稳定性效应

岩土体力学性质的差异还表现为各向异性、非均质性等,这也是由于岩性结构构造特征决定的。黄土垂直节理的广泛分布,是造成黄土各向异性、强水敏、易侵蚀的根本原因,黄土结构孔隙中的孔隙集中带、垂直管状通道也是原生垂直节理形成的微观结构基础。这种岩性结构特征使得黄土地区的水土保持工程的稳定性问题是垂直节理能够为水流提供更快速的通道,加剧潜蚀和管涌发生的风险,也削弱了整体性,更易发生崩塌和滑坡。淤地坝等拦蓄工程坝基岩土体的渗透稳定性是影响工程安全的控制因素,水土保持工程要充分考虑岩性条件,避免布设在力学性质较差的岩土体。

2 地质构造格局对工程稳定性的改造效应

2.1 结构面对工程岩土体强度的弱化效应

节理、断层等地质结构面会把完整岩土体切割成小块,减小了岩土体整体强度和变形模量。结构面是岩土体力学性质最薄弱的部分,其抗剪强度低于整体岩石,是边坡滑动、坝基渗漏、地基失稳的潜在破坏面。黄土塬区研究表明,黄土节理的形成演化对塬边侵蚀有控制作用,垂直节理的普遍发育使黄土边坡更易在降雨和水流下溯源侵蚀和崩塌。

2.1.1 结构面产状与边坡稳定性的关系

结构面的空间展布特征(产状、密度、张开度、充填等),决定结构面对工程稳定性的影响。结构面的倾向与边坡倾向相同,且倾角小于坡角时,是最不利结构面组合,最容易导致顺层滑坡。怒江大断裂控制区域地形地貌与地质灾害分布,地质灾害发育集聚,沿断裂及其次级断裂呈条带式发育,且地质灾害发育分布规律与地形坡度、工程地质岩组、水土流失程度等孕灾条件有较好关系。该规律表明区域性地质构造不仅可以削弱岩土体强度,还可以通过地形地貌、水土流失格局间接影响水土保持工程的稳定。

2.1.2 构造破碎带的工程危害

断裂带及其带内岩体破碎严重,呈现不同程度的构造破碎

带。该断裂带岩体破碎程度相当严重,且透水性强,力学参数大幅降低。水土保持工程跨越或邻近构造破碎带,会引起地基不均匀沉降、渗漏增大和边坡失稳等。对于岩质边坡的防护工程,锚杆、锚索等加固措施必须穿过可能的滑动面,锚固在稳定岩体上,若锚固段在构造破碎带内,锚固力将大打折扣甚至完全失效。

2.2 构造活动对工程稳定性的动力影响

除静态结构面弱化外,新构造运动、地震活动对水土保持工程稳定性均存在动力作用。活动断裂的缓慢蠕滑可使工程结构产生积累变形,产生坝体开裂、渠道断裂、挡墙倾斜等现象;地震动荷载可引起瞬间边坡失稳发生大规模滑坡、崩塌。地震活跃区水土保持工程设计必须考虑地震动力作用对工程构造的动力影响,梯田、水平阶坡面工程在地震作用下易出现田坎坍塌和阶面推移;淤地坝、拦沙坝受到地震惯性力与动水压力叠加作用,坝体应力状态急剧变化,可导致液化失稳;三峡库区发现库水位年际大幅波动可对边坡稳定性造成显著威胁,这种水动力作用叠加地质构造背景加剧了库岸再造和滑坡风险。水土保持工程在震区应贯彻“避让优先、适当加固”的原则,避开活动断裂带和地震易发生滑坡的陡坡地段。

3 地形地貌条件对工程侵蚀荷载的调控作用

3.1 坡面地形因子对工程侵蚀荷载的影响

坡度坡长是影响坡面径流动能的重要地形因子,坡度、坡度越高汇流面积、流速越大,冲刷力越强,侵蚀量呈线性。梯田、水平沟等工程坡度越陡,径流冲刷越多,田坎稳定性越差。26°-35°坡面梯田水土保持效应最高,但田坎稳定性困难最大,陡坡梯田易在降雨和自重作用下发生滑塌沉陷。陕南土石山区坡改梯研究表明梯田稳定性取决于土层厚度、田坎坡度和田面宽度,坡改梯后田坎维护是长效运行核心,坡长使径流能量沿程累积,对坡脚工程冲击严重,因此常以截流沟、地埂“截短坡长”分段消能。此外,微地貌浅沟、洼地控制径流微观汇集路径,浅沟汇水易冲毁横跨工程,田面洼地积水浸泡田坎土体软化,水土保持工程布设需统筹宏观坡度坡长和微观地貌特征,平整土地、填洼补缺消除隐患。

3.2 沟道形态对拦蓄工程稳定性的制约

沟谷地貌是水土保持工程重点治理地区,淤地坝、谷坊、拦沙坝等拦蓄工程修筑于沟谷之中,沟道纵比降、横断面形态、沟床组成物质等因素会影响拦蓄工程的淤积速度、泄洪能力及结构安全,沟道纵比降越大,水流势能转换成动能的比率越大,洪峰流量、流速越大,对坝体溢洪道和消力池冲刷破坏越严重。沟道横断面为“V”形,沟谷两岸陡峻,坝肩与岸坡结合处是稳定薄弱环节,容易发生绕坝渗漏和接触冲刷,沟床为松散堆积

物,水流淘刷下发生深切侵蚀,坝前护坦被掏空,导致坝体倾覆。黄土高原沟壑区的水土保持实践表明,不同地貌部位水土流失规律不同,需要采用不同的治理模式,即在梁峁顶部建设水保林和草灌带,在坡面中部修筑梯田和水平阶,在沟道底部修建谷坊和淤地坝。这种分地貌单元施策的理念,实际上是对地形地貌因子作用的科学反应。沟道治理工程的稳定性不仅与工程结构有关,还与沟道形态参数所决定的来水来沙条件有关,只有将工程布设与沟道形态特征相协调,才能实现拦蓄效益与结构安全的有机统一。

4 水文地质条件对工程稳定性的驱动与调控

4.1 地下水位变化与地表-地下水联合作用

水文地质条件是影响水土保持工程稳定性最敏感的因素。地下水通过孔隙水压力改变岩土体应力状态,地下水位的增高带来了孔隙水压力增大、有效应力减小,滑面抗剪强度降低、安全系数减小。黄河上游苏达尔沟敏感性分析给出了定量证据,基于强度折减法给出不同黏聚力、内摩擦角和地下水位条件下覆沙坡沟安全系数变化规律(表2)。

表2 不同影响因素下覆沙坡沟安全系数变化

黏聚力变化率 (%)	安全系数	内摩擦角变化率 (%)	安全系数	地下水位抬升幅度 (m)	安全系数
-20	1.12	-20	1.08	0	1.38
-10	1.25	-10	1.22	2	1.31
0	1.38	0	1.38	4	1.21
+10	1.52	+10	1.54	6	1.06
+20	1.65	+20	1.69	8	0.92

数据来源:水电能源科学,2020,38(9):146-149,基于王之君等对苏达尔沟坡沟稳定性因素的敏感性分析数据整理。

表2可知,土体黏聚力和内摩擦角增大,坡沟安全系数增加,而地下水位上升持续降低稳定性,水位上升8米时安全系数降至0.92,边坡失稳。覆沙坡沟对黏聚力变化最敏感,体现了力学参数的基础作用。除静水压力外,地下水渗流产生渗透

力引起管涌、流土破坏结构完整性;碎石土边坡研究表明,排泄管网遭破坏后降雨入渗水位上升,孔压和水力梯度升高,稳定性急剧下降。实际土壤地表水冲刷和地下水入渗成“外冲内弱”,降雨为主要诱因,雨后滞后失稳特征。黄土塬区固沟保塬工程结果证明,地表水疏导不当、地下水位上升是致灾重点因子,提出拦-蓄-排-固控水模式,统筹地形拦蓄、水文疏导与岩性加固,多因子协同治理。

4.2 地质环境因子耦合机制与工程调控策略

水文地质条件与岩性、构造、地形相互依存、共同发育。岩性决定地下水的赋存、径流、构造断裂储运,地形控制补给-径流-排泄。构造抬升区地形陡峭、裂隙密集、地下水丰富,多因子叠加使得工程失稳风险升高,怒江大断裂带地质灾害条带状聚集最为典型。因此,水土保持工程稳定性调控要从系统角度建立多因子协同机制:在选址时结合四类因子组合特征,避开构造抬升强烈、岩体破碎高风险区段;在设计时依据地质环境类型匹配工程型式、参数,强透水地基采用防渗排水措施,黄土节理发育区放缓坡比并加强坡脚排水;在运维时建立关键因子监测机制,及时了解岩土变形和水位变化。以“选址-设计-监测”的全周期地质环境适应性管理方法,保障工程长效稳定运行。

5 结语

本文从岩土体工程特性、地质构造特征、地形地貌条件和水文地质动态四个方面,研究了地质环境因子对水土保持工程稳定性的影响机制,并论述了多因子耦合下的调控方法。分别论证了:岩性对土壤抗蚀性与岩土体力学性质的基础控制;构造通过结构面弱化和活动性对稳定性的改造;地形地貌对侵蚀荷载的调控;以及地下水位变化对边坡稳定性的定量调控。四类因子并非独立存在,而是形成“岩性为基、构造为架、地形为表、水文为脉”的层级耦合关系,单一因子变化会通过链式响应放大对工程的影响。维护水土保持工程稳定性需遵循“选址—设计—监测”的全周期地质环境适应性管理模式:选址阶段综合评价四类因子组合特征;设计阶段根据地质环境类型选择工程型式和参数;运行阶段监测关键因子变化。因地制宜采取多因子协同调控,才能确保工程长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 潘放,黄少雄,陈贵峰,等.路内路外:水土保持与地质灾害防治的责任边界探析[J].中国公路,2026,(02):72-73.
- [2] 潘伟康,岳炜,樊建华.山体边坡建筑水土保持与地质灾害治理技术研究[J].建筑机械化,2025,46(10):122-127.
- [3] 单元磊,刘英娟,霍光杰,等.多因子协同的南太行地区地质环境生态适宜性评价[J].地质与勘探,2025,61(05):1073-1082.
- [4] 彭建兵,兰恒星,略论生态地质学与生态地质环境系统[J].地球科学与环境学报,2022,44(06):877-893.
- [5] 曹国建.大源渡航电枢纽工程地质环境质量与水土保持[J].湖南水利水电,2002,(04):12-14.