

序

这部教材的编写团队曾多次与我探讨当前地质工程、土木工程等专业人才培养中的现实问题。我越来越感到，教材与课程建设是其中至关重要的环节。一部好的教材，是一门课程、一个课程体系、一套专业人才培养模式改革的起点。为此，教材编写团队在长期授课的基础上，用了近五年时间，潜心研习土力学的理论知识与工程实践，充分吸收国内外现有教材的优点，反复推敲、不断打磨，终成此稿。当我读到这部教材时，深感欣喜。该教材所展现的体系性、实用性与时代性，恰好回应了我们当初讨论的人才培养痛点，也积极响应了当前工程教育对理论基础扎实、实践能力突出、国际视野开阔的新型人才培养的迫切需求。

这部教材的编写体现了鲜明的系统思维。从土的地质成因这一本源出发，到基础理论阐述，再到边坡、地基等工程应用，最后通过综合案例实现知识整合，形成了逻辑严密、层次分明的知识体系。特别值得称道的是，教材采用“知识图谱”的可视化呈现方式，帮助学生构建清晰的知识框架，这种设计在国内同类教材中颇具前瞻性。

不仅如此，这部教材在理论与实践的结合上也做出了积极探索。编写团队不仅系统融入了国内外现行技术标准，还精心配套了完整的试验操作视频资源。这种“纸质教材+数字资源”的立体化建设，既保留了传统教材的系统性优势，又融入了信息化教学手段的便捷与高效，代表了现代教材建设的发展方向。

从内容编排来看，教材准确把握了地质工程、土木工程等专业学生的认知规律。每章开篇的导读、丰富的工程实例、核心知识点，以及精心设计的三个附录，共同构成了一个完整的学习支持系统。这些设计充分体现了以学生为中心的教育理念，使教材既适合教师教学，也便于学生自主学习。

第12章的土力学综合工作坊是本书的一大亮点。这些源于中国典型地质环境的工程案例，将前11章的理论知识有机串联，引导学生完成从理论分析到工程实践的全过程训练，有效培养其工程思维和解决复杂问题的能力。

在工程教育深化改革的背景下，这部教材的出版恰逢其时。它不仅系统传授土力学专业知识，更注重培养学生严谨的工程素养与创新能力。相信这部凝聚了编写团队多年教学与工程经验的教材，将成为土力学教学领域的重要成果，为培养适应新时代需求的工程技术人员提供有力支撑。

中国科学院院士



2025年12月

前言

土是自然界中分布最广泛的地质材料之一，也是人类工程建设中接触最多、性质最为复杂的介质。从远古先民的穴居窑洞到现代城市的地下空间，从千里堤防到万米长隧，人类工程活动始终在与土体进行着深度对话。土力学，正是解读这种对话的关键科学，是连接地质认知与工程实践的重要桥梁。

本教材面向地质工程、土木工程及相关专业本科生，旨在帮助读者系统构建关于土的力学行为及其工程应用的知识体系。编写过程中，我们始终坚持四个核心理念：系统性、前沿性、标准性与易读性。教材从“土的出身”——地质成因切入，构建脉络清晰、逻辑严密的知识网络，建立符合认知规律的知识框架，确保学科体系的完整性与连贯性。全书采用“基础理论—工程应用—综合创新”三层次递进结构：第一部分（第1~6章）夯实理论基础，从土的形成与物质组成讲起，逐步深入至渗透、压缩、强度等核心物理力学性质；第二部分（第7~8章）聚焦边坡工程，将理论应用于土压力计算与土坡稳定性分析；第三部分（第9~11章）着眼地基应力与变形；第12章的综合工作坊则通过5个典型工程案例，系统训练读者从地质识别、机理分析到定量计算与方案设计的完整工程思维，引导读者完成从理论到实践的能力跨越。

在精细阐述经典理论知识的同时，教材注重融入学科新进展与工程新理念，并系统引入了我国现行国家标准（GB）、行业标准（JTG、JGJ等）及国际主流标准（ASTM、AASHTO、BSI等），使读者在掌握基本原理的同时，紧密结合规范依据，培养严谨的工程素养。为强化实践教学，编写团队精心制作了与核心知识点配套的土工试验视频，读者可扫描书中二维码观看学习。这些视频严格遵循国内外相关标准与规范的要求，体系化地呈现了所需理论知识及试验流程与操作细节，能有效提升实验教学的效率与质量。

教材在结构上进行了创新。每章开篇的“内容导读”以平实语言勾勒学习脉络；各章末尾的“核心知识”和“知识图谱”帮助读者巩固要点。特别值得一提的是三个附录的植入——全书知识图谱以可视化形式呈现土力学知识的内在联系；中、英文专业术语提供规范的释义与科学表达；土体参数的典型取值范围则为学习与初步工程判断提供直观、感性的认知和实用参考。这些附录与正文互为补充，形成完整的学习支持系统。

教材由李彦荣担任主编，石文慧和莫平任副主编，何晟迪、张帆宇、吕义清、龙建辉、赵建军、霍俊杰任编委。编写团队长期从事土力学教学、研究与工程实践，积累了丰富的教学经验与工程智慧。编写团队邀请了中国科学院唐辉明院士、中国矿业大学隋旺华教授、太原理工大学白晓红教授担任主审，对教材内容进行了严格把关。教材的编写汲取了众多前辈学者的智慧，也得到了同行专家的大力支持，在此郑重感谢。限于编者水平，

书中难免存在疏漏之处，恳请各位读者批评指正。

愿这本融合了系统理论、标准规范与数字资源的教材，能成为您探索土力学世界的得力向导，陪伴您夯实专业基础，开启您卓越的工程生涯。

编 者

2025 年春

目 录

第一部分：基础理论

序

前言

第 1 章 土的形成	3
1.1 土的形成过程	3
1.2 土的成因分类	9
1.3 土的物质组成	11
1.4 土的结构与构造	11
习题	17
第 2 章 土的物理性质	19
2.1 土的三相组成	19
2.2 土的三相比例指标	26
2.3 无黏性土的密实度	31
2.4 黏性土的物理性质	32
2.5 特殊土的物理性质	41
习题	45
第 3 章 土的工程分类	47
3.1 工程分类体系	47
3.2 土的现场鉴别	62
习题	65
第 4 章 土的渗透性	68
4.1 土的渗透性及达西定律	68
4.2 渗透系数	71
4.3 二维渗流及流网	79
4.4 渗透力与渗透变形	82
习题	87
第 5 章 有效应力原理与土的压缩性	89
5.1 饱和土中的有效应力	89
5.2 土的压缩性	94
5.3 应力历史对压缩性的影响	100

5.4 变形模量与弹性模量	105
5.5 三种模量的比较	110
习题	112
第6章 土的抗剪强度	115
6.1 抗剪强度理论	115
6.2 抗剪强度测试方法	124
6.3 抗剪强度的影响因素	135
习题	137

第二部分：边坡工程

第7章 土压力	141
7.1 土压力分类	141
7.2 静止土压力	144
7.3 朗肯土压力	146
7.4 库仑土压力	150
7.5 朗肯理论与库仑理论的比较	156
7.6 复杂工况下的土压力计算	158
习题	162
第8章 土坡稳定分析	165
8.1 土坡失稳与分析方法	165
8.2 无黏性土坡稳定性分析	168
8.3 黏性土坡稳定性分析	170
8.4 总应力法与有效应力法	187
习题	189

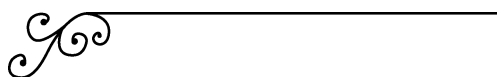
第三部分：地基工程

第9章 土中应力	195
9.1 土中的自重应力	195
9.2 基底压力	197
9.3 地基中的附加应力	203
习题	222
第10章 地基沉降	225
10.1 地基最终沉降的组成	225
10.2 瞬时沉降	226
10.3 固结沉降	227
10.4 次固结沉降	244

10.5 地基沉降与时间的关系	245
习题	267
第 11 章 地基承载力	270
11.1 地基破坏模式	270
11.2 地基的临塑荷载和临界荷载	273
11.3 地基极限承载力	277
11.4 地基承载力特征值的确定	287
习题	292

第四部分：综合应用

第 12 章 典型案例	297
12.1 降雨诱发的浅层土质滑坡	297
12.2 黄土塬边灌溉区边坡稳定性	299
12.3 膨胀土边坡的干湿循环失稳	301
12.4 水位变动下水库岸坡稳定性	302
12.5 滑坡治理的抗滑桩设计推力	304
附录 A 土力学知识图谱	307
附录 B 土力学专业术语	308
附录 C 土的参数参考值	318
习题解析	329
参考文献	345



第一部分：基础理论



第1章 土的形成

※ 内容导读 ※

土的“生命密码”——形成与物质组成

为何不同土体的工程性质差异显著？例如，某些土体承载能力强、稳定性好，而某些土体遇水软化、易发生变形。解答这些问题，需要从土的“生命历程”中寻找答案。本章将追溯土的形成过程：从岩石在冷热交替、风雨侵蚀等作用下的逐渐破碎，到破碎颗粒经水流、风力、冰川等地质营力搬运，在不同环境中沉积成土。进一步地，本章将解析土的物质组成，包括固体颗粒的主要矿物成分，以及这些固体颗粒不同排列方式所形成的多样化的土体结构、构造。

通过对本章内容的学习，可初步建立从“成因历史”到“物质组成”再到“结构特征”的系统认知框架，理解土体工程行为的内在机制。本章内容是土力学知识体系的重要基础，为后续土的性质、分类、工程评价及相关理论的学习提供必要的理论支撑。

1.1 土的形成过程

土（soil）是岩石经风化作用形成的岩屑与矿物颗粒，在原地或经搬运在异地混入自然界中的其他物质后形成的堆积物。土广泛分布于地壳表层，厚度最大可达上千米。土的形成过程是地质循环的关键环节，始于岩石的风化作用，风化产物被流水、风、冰川等营力侵蚀、改造与搬运，最终在条件各异的自然环境中沉积形成土。

1.1.1 地质作用

地质作用（geological process）指由自然动力引起的形成和改变地球物质组成、外部形态与内部构造的各种过程，分为内力地质作用和外力地质作用。内力地质作用（endogenous process）主要发生在固体地球内部，由地球内能（热能、重力能、地球旋转能和化学能等）驱动，具体包括岩浆作用、变质作用、构造作用以及地球各圈层之间的相互作用。外力地质作用（exogenous process）主要发生于地表，由太阳能和太阳系天体间的引力能驱动。它以大气、水体和生物作为介质，发挥对地表的改造作用，具体包括风化作用、侵蚀作用、搬运作用、沉积作用和成岩作用。

内力地质作用与外力地质作用以直接或间接方式共同参与土的形成过程。具体而言，

内力地质作用通过岩浆作用与变质作用控制地壳的岩石类型和矿物组成，为土的形成奠定物质基础；同时，通过构造作用塑造地表宏观地形格局，为土的形成提供环境条件。外力地质作用则通过风化、侵蚀、搬运和沉积作用，直接作用于土的形成过程，控制其物质组成、结构、构造及空间分布。沉积物若后续经历固结成岩作用可形成沉积岩，此环节超出土的形成范畴，本章不予讨论。

1.1.2 风化作用

风化作用（weathering process）指在大气、水及生物影响下，地壳表层或接近表层的岩石，通过与大气、水及生物的相互作用，发物理性状或化学成分变化，转变为松散碎屑物的过程。风化程度越高，岩石强度越小，越容易发生分解和破碎。作为成土过程的起点，岩石风化产生的岩屑和矿物碎屑（统称为碎屑物质）为土的形成提供主要物质来源。

风化作用依据作用机制差异划分为物理风化、化学风化与生物风化三类。物理风化和化学风化主要涉及自然条件下的作用过程，其中物理风化仅导致岩石破碎而不改变其矿物组成，化学风化则通过化学反应改变矿物成分。生物风化指生物活动对岩石的影响，其作用结果常兼具物理和化学风化特征。不同自然条件下，风化作用的主导类型差异显著，例如我国西北干旱区四季分明、昼夜温差大、降水稀少，物理风化占主导地位，化学风化受限；我国东南沿海地区降雨充沛、年均温较高，化学风化占主导；我国华南森林覆盖区常年高温多雨、森林覆盖率高，生物风化作用显著。

1. 物理风化

物理风化（physical weathering）是由物理原因使岩石、矿物破碎、崩解的作用和过程，主要包括碰撞作用、温差作用、冰劈作用、结晶胀裂作用和卸荷作用等。

1) 碰撞作用

岩石表面遭受碰撞作用（rock collision）是最直接的物理风化形式，即动能对岩石的机械性破坏。碰撞作用通常由风、水或冰及其夹带物的撞击或重力作用下的块体运动导致，如雨滴击打、风沙击打、海浪撞击、落石撞击等。

2) 温差作用

温差作用（temperature differential weathering）指岩石在昼夜或季节性温度循环下，发生不均匀热胀冷缩变化，内部产生热应力分布不均匀，进而形成裂隙的物理风化形式。岩石内部的不均匀体积变化主要有两方面原因：一方面，岩石热导率低，导致表层与内部对温度变化的响应不同步，表现为体积变化不一致，常常引发由表及里的逐层剥落现象。另一方面，岩石由多矿物集合体构成，不同矿物的热膨胀系数各异，在相同温度条件下各矿物呈现差异化膨胀或收缩，削弱矿物间结合力，造成内部结构损伤。

单次温度循环对岩石的不利影响通常肉眼难辨，但在经历数千数万次循环后，损伤的长期累积会演化为宏观尺度的相互连通裂缝，最终导致岩石破裂（图 1-1）。

3) 冰劈作用

冰劈作用（frost wedging）是寒冷气候条件下一种强烈的物理风化形式。岩石孔隙水

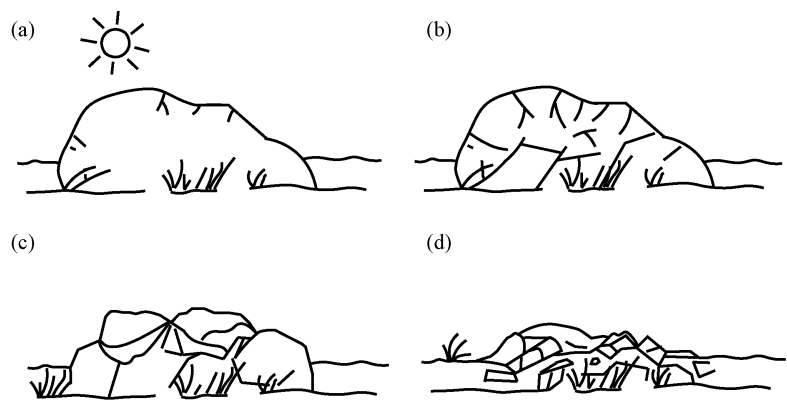


图 1-1 温差作用导致岩石崩解

(a) 内外温差；(b) 表层开裂；(c) 裂隙发展；(d) 碎裂解体

在冰点以下冻结时体积膨胀约 9%，此过程可在冰周产生上百兆帕的压力，导致岩石裂隙扩展（图 1-2）。持续的水分补给、频繁的冻融循环以及岩体内发育的初始裂隙是冰劈作用发生的有利条件。

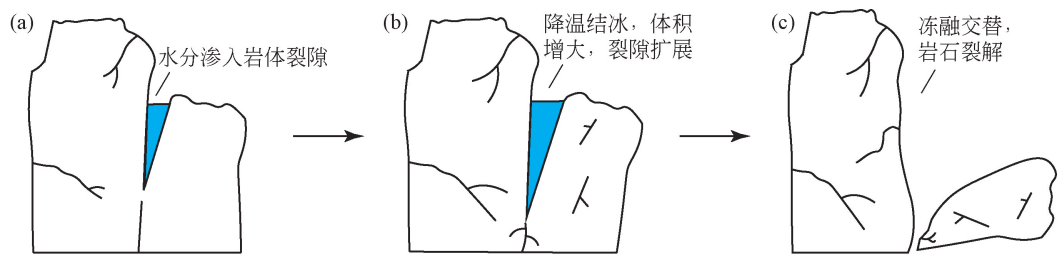


图 1-2 冰劈作用分裂岩石

(a) 裂隙进水；(b) 裂隙扩展；(c) 裂隙贯通

4) 结晶胀裂作用

结晶胀裂作用（swelling of salt crystallization）指岩石孔隙中的溶液，在水分蒸发条件下析出盐类结晶。结晶生长产生体积膨胀，对围岩形成压力，促使裂隙张开及尖端延伸。该作用的发生依赖于潮解性盐类向岩体内部的迁移富集，以及强烈的干湿交替作用，故多发生于干旱-半干旱地区。例如我国新疆地区光照变化显著且昼夜温差大，夜间大气水分在岩表凝结，溶解岩表盐分并向内部渗透；白昼烈日暴晒促使水分强烈蒸发，盐类自孔隙溶液中结晶析出。长期的潮解-入渗-重结晶循环作用导致岩石裂隙持续扩展深化，最终引发岩体破碎。

5) 卸荷作用

卸荷作用（unloading）指岩石的外部约束压力降低或解除时，岩石因回弹膨胀而产生节理和裂隙的过程。卸荷作用产生的影响可达地表以下几千米处，在临空面处表现为岩体的隆起、鼓胀、开裂或崩落。

综上,物理风化作用的产物为粗细不等的碎屑物质,其形状以棱角状和次棱角状为主。

2. 化学风化

化学风化 (chemical weathering) 指地表岩石与空气、水及其溶液发生相互作用,化学成分发生变化,产生新矿物的作用过程,主要包括溶解作用、水解作用、水化作用、碳酸化作用和氧化还原作用等。

1) 溶解作用

溶解作用 (dissolution) 是最常见的化学风化形式之一,指岩石中某些矿物成分在水中溶解并流失的过程。大多数矿物在水中具有一定溶解性,但不同矿物的溶解度差异显著;例如,25℃时方解石的溶解度是云母的一千倍以上。

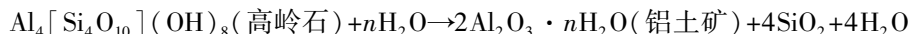
自然环境中,大气降水是岩石中水分的主要来源,其中溶解一定量的 O_2 、 CO_2 等物质,对岩石的溶解能力比纯水更强。此外,当温度和压力增加时,水的溶解能力也会增强。

2) 水解作用

水解作用 (hydrolysis) 是矿物与水溶液接触后,矿物离子与水溶液中 H^+ 离子和 OH^- 离子发生反应,形成新物质的过程。水解作用生成的新矿物通常强度低于原矿物,如钾长石发生水解形成强度较低的高岭石,反应式如下:



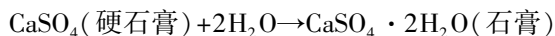
其中,钾长石在水中析出的 K^+ 离子与 OH^- 离子结合,形成易溶于水的 KOH ; 反应产生的 SiO_2 则呈胶体状,易于流失,铝硅酸根离子与一部分 OH^- 离子结合成高岭石残留原地。在湿热条件下,高岭石将进一步水解形成铝土矿,反应式如下:



地壳中的大部分造岩矿物为硅酸盐或铝硅酸盐,属于弱酸强碱盐,易于发生水解作用。水解作用在静水中无法持续进行,只在伴随淋溶、络合、吸附和沉淀过程及不断引入离子的情况下,才能发生。

3) 水化作用

水化作用 (hydration) 指某些矿物与水接触后,水被吸收到矿物的晶体结构中,形成含结晶水的新矿物的过程,如硬石膏经水化作用转变为石膏,其反应式如下:



硬石膏转变为石膏时,理论体积膨胀率最高可达 60%,从而对周围岩石产生压力,导致岩石破坏。此外,石膏相比于硬石膏溶解度更大、硬度更低,前述转化过程会导致岩石后续受溶解作用的影响加强,风化速度加快。

4) 碳酸化作用

碳酸化作用 (carbonation) 指水中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 与岩石中的矿物发生化学反应的过程。如钾长石的碳酸化,其反应式如下:

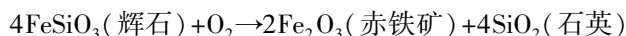


上述反应中,来自大气的 CO_2 溶于水形成 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 夺取钾长石中析出的 K^+ , 结合成易溶于水的碳酸盐 (K_2CO_3) 和黏土矿物 (高岭石)。 K_2CO_3 和 SiO_2 均被水带走, 高岭石残留原地。

5) 氧化还原作用

氧化还原作用包括氧化作用 (oxidation) 与还原作用 (reduction), 分别指岩石中某些矿物被氧化或被还原形成新矿物的过程。

氧化作用对铁氧化物、硫化物和碳酸盐类矿物表现得最为明显, 如辉石的分解, 化学反应式如下:



其中, 参与反应的氧化剂为大气和水中的游离氧。

还原作用主要发生在缺氧岩层中。缺氧的还原环境是由微生物活动和有机质分解形成的。细菌能从有机和无机化合物中获取氧元素。有机质分解过程会消耗环境中处于游离态的氧元素和矿物中处于结合态的氧元素。风化带中最广泛出现的是 Fe^{3+} 氧化物转化为 Fe^{2+} 化合物的还原反应。

综上, 化学风化作用的产物是与母岩矿物不同的次生矿物, 如可溶性盐类和黏土矿物。

3. 生物风化

生物风化 (biological weathering) 是指动植物和微生物的生命活动导致岩石完整性破坏和强度降低的过程, 包括物理扰动和化学代谢。前者如植物的根劈作用和穴居生物的挖掘与筑巢行为等; 后者如生物新陈代谢分泌有机酸和遗体腐烂等。生物风化作用的产物除与物理风化和化学风化一致的物质外, 还有腐殖质。

1.1.3 侵蚀作用

侵蚀作用 (erosion) 指风化产生的碎屑物质被水流、风力、冰川、重力等冲刷和剥离的过程。侵蚀作用将前述风化产物从原位剥离, 利于其进一步搬运, 深刻地影响着土体的类型分异, 根据主导侵蚀的外动力系统差异, 可划分为河流侵蚀、地下水侵蚀、冰川侵蚀、风力侵蚀和重力侵蚀等。

上述各类侵蚀作用中, 河流侵蚀作用在地表的分布最为广泛。河流侵蚀 (river erosion) 指河流流经地表时通过水流动能携带风化后的碎屑物质, 对地表造成破坏的过程。广义上, 片流和洪流侵蚀也可归为此类。河流侵蚀主要包括下蚀、旁蚀和溯源侵蚀, 三者分别导致河谷加深、加宽和加长。

地下水侵蚀, 又称潜蚀 (suffosion), 指地下水渗流过程中对风化带岩石的冲刷和溶蚀过程。地下水侵蚀的典型案例为喀斯特地貌的形成。

冰川侵蚀, 又称刨蚀 (exaration), 指冰川运动过程中通过自身动力和其中冻结的砾石对冰床底部和两侧岩石造成破坏的过程。全球冰川主要分布于高海拔或高纬度地区, 高

海拔冰川从高处向低处运动，高纬度地区的大陆冰川则由冰盖中心向周边运动，二者均可搬运大量碎屑物质。

风力侵蚀 (aeolian erosion)，简称风蚀，指风力作用下，风化作用形成的碎屑物质被吹走的过程，具体包括吹扬和磨蚀两种形式。吹扬是空气流动形成涡流时，产生上举力，使松散堆积的碎屑物质剥离原位的过程。磨蚀是流动的空气及其中携带的物质对地表的摩擦，同样对地表具有破坏作用。

重力侵蚀 (gravitational erosion) 指风化产生的碎屑物质在重力作用主导下，沿坡面移动导致地表遭受破坏，甚至坡面形态改变的过程，如岩石崩塌和坡面碎屑流等。

1.1.4 搬运作用

搬运作用 (transportation) 指风化产物在外地质营力作用下被搬离风化区，而向其他区域运移的过程，根据外地质营力的不同分为水流搬运、风力搬运、冰川搬运等。

水流的搬运作用主要通过推移、跃移、悬移和溶移四种方式实现。推移搬运指粗颗粒物质（如砾石、粗砂）在水流作用下沿河床底部滚动或滑动，该过程直接受流速控制，流速降低时优先发生沉积。跃移表现为中等粒径颗粒（如细砂）呈间歇性跳跃运动，其搬运距离可达推移搬运的数十倍。悬移搬运作用于粉砂和黏粒，这些细粒物质可长期悬浮于水体中，随河流输送数千千米或随洋流横跨大洋。溶移是水流特有的搬运形式，通过溶解离子（如钙、钠、氯离子等）和胶体颗粒进行化学搬运，不受机械沉降规律约束，仅在物理化学条件改变时发生沉积。河流搬运的物质主要源自河床侵蚀产生的碎屑物，以及岸坡崩塌、滑坡和冲刷作用的产物。

风对地表物质的搬运主要通过推移、跃移和悬移三种方式实现。推移和跃移主要用于输送沙粒，而粉砂与黏土颗粒则以悬移形式为主。推移搬运表现为沙粒沿地表缓慢滚动或滑动，亦称蠕移。跃移是风力搬运中最活跃的形式，集中发生于距地表 0.5 ~ 1.5 m 高度范围内，具有较高的迁移速率和搬运效率。悬移作用可将细粒物质输送至远方，搬运距离从数十千米到全球尺度不等，部分微粒可长期滞留于大气中而不发生沉降。

冰川搬运以固体冰为搬运介质，冰的搬运能力较前述的水流和风更强，能够将冰川刨蚀产生的碎屑物以及坠落的岩块（包括巨型岩块）等一并冻结在冰体中整体运移。搬运过程中，除了由于冰体不同部分运动速度差异造成的局部摩擦和冰川与冰床的摩擦外，被搬运物位置相对固定，不能相互作用，基本无形态改变。

值得关注的是，不同地质营力可以“接力”搬运碎屑物质。典型案例如黄土的形成：高山冰川输送的岩屑，经冰雪融水形成的地表径流搬运至中下游河漫滩或沙漠盆地，其中的粉粒与黏粒随后被风力转运至干旱半干旱地区堆积，最终形成黄土。

1.1.5 沉积作用

被各种地质营力搬运的碎屑物质，当搬运介质的动能减弱或物理化学条件改变时，便会停止运移，堆积下来，这一过程称为沉积作用 (sedimentation)。沉积作用是土的形成过

程的最后一个关键环节。

沉积作用包括机械沉积作用、化学沉积作用、生物沉积作用和生物化学沉积作用四类。机械沉积作用受重力支配，通常遵循以下规律：颗粒较大的物质优先沉积，搬运距离较短；反之，颗粒较小的物质，同等条件下搬运距离较长。化学沉积作用受化学反应规律支配，通常遵循难溶物优先沉淀析出、优先沉积的规律。生物沉积作用指生物有机体的沉积过程，如生物骨骼堆积在土层中促进钙化的过程。生物化学沉积作用指生物与化学作用共同引起的物质沉积过程，例如铁细菌通过代谢活动促进溶解态二价铁的氧化，使铁以氧化物或氢氧化物形式沉淀，并在特定沉积环境中为铁矿物的形成和富集提供物质基础。

1.2 土的成因分类

风化、侵蚀、搬运、沉积作用在时间和空间上的动态变化，以及沉积区环境的差异，共同决定了不同地质时期、空间位置上形成的土体存在显著性质差异。土的成因分类作为土力学与工程地质学的重要基础知识，通过揭示土体形成过程及其主导地质环境，为理解不同类型土体的物理力学特性、空间分布规律及工程行为差异提供了理论基础。

依据沉积区与物源区之间的相对位置关系，土可分为两大类：残积土与运积土（图 1-3）。

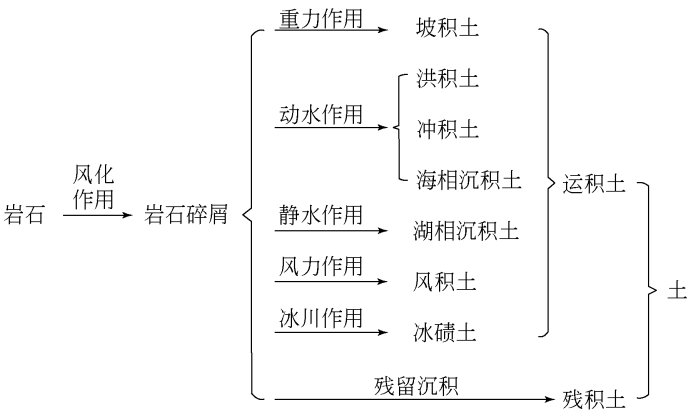


图 1-3 不同成因的土

残积土（residual soil）指岩石风化后碎屑物质未经搬运，遗留在原地形成的土。其特征为颗粒随深度增加由细变粗，通常不具层理，碎屑呈棱角状，土质不均且强度较低。残积土的分布和厚度受地形控制，常见于岩石出露多，风化强，地表径流小的区域，如分水岭、缓坡及剥蚀平原地区。分水岭、缓坡洼地处因侵蚀搬运作用弱，残积土层较厚；陡坡地带残积土层较薄；沟谷底部流水活动频繁区域则通常缺失残积土。

运积土（transported soil）指岩石风化产物经水流、风力、冰川或重力等动力搬运后，在异地沉积形成的土。运积土可根据搬运动力及沉积环境分为坡积土、洪积土、冲积土、海相沉积土、湖相沉积土、风积土和冰碛土等类型（图 1-3）。

坡积土 (colluvial soil) 主要位于山腰与山麓地带, 是较高位置的碎屑物质受外力剥蚀后, 在重力驱动下沿斜坡向下运移形成的, 上部一般与残积土相接, 厚度通常自顶部向下递增。坡积土的搬运距离较短, 组成与残积土相似, 无明显层理, 表现明显的分选现象, 下部多碎石和角砾, 上部多为细小颗粒。半干旱地区植被稀疏, 降水集中, 水土流失严重, 尤其在地壳急剧抬升的区域, 坡麓地带易形成厚层坡积土。湿润地区植被茂盛, 地表风化残积层被根系固结, 不易侵蚀和搬运, 因此坡积土厚度通常较薄。

洪积土 (diluvial soil) 是由暴雨或大量融雪在短期内快速汇聚所形成的暂时性山洪急流所携带的碎屑物质, 在山沟出口处或山前倾斜平原堆积而成的土体, 主要存在于洪积扇中。洪积土表现出显著的分选性特征, 靠近山沟出口处颗粒较粗, 多为块石和碎石; 随距离增加, 颗粒逐渐变细。由于不同期次洪水能量的差异, 洪积土颗粒的粗细程度及其分布位置呈现出不规则的交替层理构造, 并常伴有夹层、尖灭或透镜体等特征。

冲积土 (alluvial soil) 是流水搬运的典型产物, 主要分布在河谷及冲积平原中, 其形成需要流水流速降低的条件。经过长距离搬运, 冲积土颗粒具有良好分选性、磨圆度及明显的水平层理构造。根据形成位置, 冲积土可分为河床相、河漫滩相、牛轭湖相及河口三角洲相。河床相冲积土主要分布于河床及阶地位置, 颗粒磨圆度优于洪积土的砾石层。河漫滩相冲积土是由河水漫溢形成的, 土粒较细, 常夹有淤泥或泥炭等软弱土层。牛轭湖相是在牛轭湖中沉积形成的, 常含大量有机质, 压缩性高、承载力较低。河口三角洲相冲积土形成于河流入湖或入海口处, 多为饱和软黏土, 由于强烈的蒸发作用, 土层最上部常发育硬壳层。

海相沉积土 (marine soil) 指海洋环境中由海洋动力过程形成的沉积土, 其组成颗粒包括陆源碎屑物、海洋生物残骸、火山灰及宇宙尘等。受海水动力条件影响, 沉积物通常表现出较细的颗粒组成和良好的分选特性。由于海水温度显著低于陆地且波动较小, 海相沉积土中矿物转化速率较慢, 胶结作用弱, 土体结构性较差。根据与大陆的距离, 海相沉积可细分为滨海相沉积、浅海相沉积、半深海相沉积和深海相沉积。滨海沉积物主要由卵石、圆砾和砂等粗粒物质组成, 具有近水平或缓倾的层理构造。浅海沉积物主要由细粒砂土、黏性土、淤泥及生物化学沉积物 (如硅质和石灰质) 组成, 存在层理构造, 比滨海沉积物更疏松。陆坡和深海沉积物主要由有机质软泥组成, 成分较均一。

湖相沉积土 (lacustrine soil) 是在湖泊静水环境中形成的土, 常具有水平层理构造并伴随生物化学沉积作用。根据所处位置分为湖滨土和湖心土两类。湖滨地带靠近湖岸, 受周边动水环境 (如波浪) 影响, 主要沉积粗颗粒物质如砾石、砂, 形成透水性较好的土层; 而湖心区域远离湖岸, 沉积环境稳定, 以细颗粒悬浮物质为主, 主要形成淤泥土。

风积土 (aeolian soil) 指风化碎屑物在风力作用下经历搬运后, 在风速降低或地形阻隔的条件下降落形成的堆积物, 通常无明显层理。最常见的风积土为风积砂和风成黄土。

冰碛土 (moraine soil) 是由冰川搬运的碎屑物质堆积形成的土, 无层理, 组成颗粒分选性较差, 大小悬殊, 形状主要为棱角状, 在巨大块石上常见冰川擦痕。