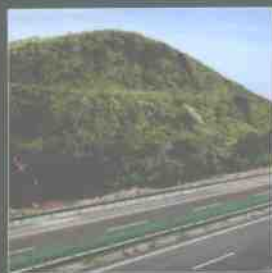
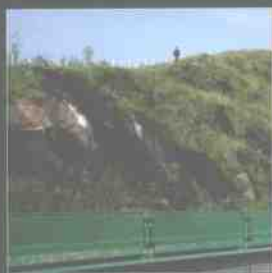
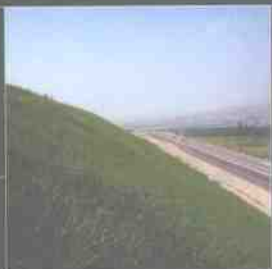


人工坡面植被恢复 设计与技术

顾 卫 江 源 余海龙 沈 毅 等著

DESIGN AND TECHNOLOGY IN
VEGETATION RESTORATION ON
ARTIFICIAL SLOPES

中国环境科学出版社



人工坡面植被恢复设计与技术

顾 卫 江 源 余海龙 沈 毅 等著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

人工坡面植被恢复设计与技术 / 顾卫等著. —北京: 中国环境科学出版社, 2009.6

ISBN 978-7-5111-0003-0

I. 人… II. 顾… III. 边坡—植被—护坡 IV. U418.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 070935 号

责任编辑 丁 枚
责任校对 刘凤霞
封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2009 年 6 月第 1 版
印 次 2009 年 6 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 12.75
字 数 235 千字
定 价 39.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

地球陆地的表面形态万千，既有巍峨的高山，也有起伏的丘陵，还有辽阔的平原。形成这种地表起伏的原因在于地球内营力和外营力的共同作用。构造运动等内营力所引起的隆起、褶皱和断裂，造成了地表起伏剧烈，并由此形成了山地和峡谷，而气候、水文、生物等外营力所引起的剥蚀、搬运和堆积，则令地表的起伏不断平缓，在新的构造运动发生之前，使地表起伏处于一种相对稳定的状态，自然坡面就是在这种条件下表征地表起伏状态的基本单元之一。

这里所说的自然坡面，主要是指由自然因素造成的、处于相对稳定条件下的倾斜地表。如果没有强烈外营力（多数为暴雨）的影响，自然坡面应该是保持重力平衡的。此时，地衣、苔藓等低等生物开始出现，伴随着物理风化、化学风化和生物风化作用的不断增强，土壤逐渐发育，并在坡面上形成了由土壤—植被—动物—微生物等构成的坡面生态系统，如果没有外力的破坏，这种坡面生态系统将沿着自身的规律演化下去，最终达到自我调节、自我更新的一种动态平衡。

然而随着人类活动的影响范围和影响力度不断加大，自然坡面的生态平衡正在被打破。开山采石、修路架桥、拦河筑坝、削坡建房，人类文明所产生的巨大生产力使得一个个自然坡面消失或被破坏，一个个人工坡面诞生或被清除。

人工坡面也可以称为工程创面，它是由人类采用人工或机械的方法在地球表面挖掘或堆积而成，除了在形状上与自然坡面一样都是倾斜体之外，其他方面与自然坡面存在很大差异。人工坡面不再有浑然天成的坡度、自然起伏的地表、肥沃松软的土壤、丰富多彩的植被，原有自然坡面的形成和演替规律受到干扰，原有的土壤层状结构不

再存在,原有的生物多样性基本丧失。

人工坡面的出现,打破了原有自然坡面的重力平衡和生态平衡。它在给人类的生
产、生活带来方便和利益的同时,也带来了危险和灾害。坍塌、滑坡、泥石流、水土
流失等重力不稳定可在短期内威胁到人类生产、生活的安全,而自然景观丧失,生物
多样性破坏、碳库损毁、动物通道受阻等生态不平衡,可在长期内加剧全球环境问
题的严重程度。

人类最早关注的是人工坡面的安全问题。在中世纪(公元 395—1500 年),欧洲人
就曾采用栽植柳树的方法来防护河堤。在我国明朝(公元 1368—1644 年),也出现了
有记载的植物护坡工程——通过栽植柳树来防护河岸。在日本江户时代(1603—1867
年),人们通过人工播种、人工植草、移栽树苗等方法恢复坡面植被,以防止山地水土
流失给村落带来危害。

进入 20 世纪后,道路建设、城市建设等土木工程产生了大量的人工坡面,为了防
止坡面水土流失,欧、美、日等国家围绕人工坡面的植被防护技术,先后投入了大量
的人力和物力,开发出了以机械喷射为代表的种子直播技术和以三维网为代表的种子
载体技术,使坡面植物防护工程的质量和速度取得了显著改进。日本是一个多山的国
家,为了解决道路、城市建设中人工坡面的植被恢复问题,从 20 世纪 50 年代就开始
使用外来草种进行坡面绿化。60 年代从美国引入液压喷播技术,70 年代开发出有机质
喷播技术,80 年代从法国引进连续纤维加筋土方法并加以改造,形成了独特的连续纤
维绿化技术,使人工坡面植被恢复范围从土质坡面扩展到岩石坡面,90 年代又开展了
把各种废弃物转化为坡面绿化基础材料的综合利用研究,扩大资源循环利用率并降低
工程成本。日本在人工坡面植被恢复工程技术不断进步的同时,在植被恢复的基本理
念上也在发生着变化。从初期的依靠外来草本快速实现坡面绿化,到后来采用乡土物
种构建稳定的乔灌草植物群落;从采用播种方法建立人工植被,到依靠入侵直接恢复
自然植被;目前,以创造相关条件促进坡面植被自然恢复的“诱导法”,正在成为日本
21 世纪人工坡面植被恢复技术的主流。

我国的人工坡面植被恢复技术也经历了从传统到现代的变化过程。20 世纪 90 年代
以前,主要是采用人工播撒草种、人工植草皮、人工移栽树苗等方法,90 年代以后,
随着高速公路建设的全面展开,液压喷播、客土喷播、有机质喷播、植生带、三维网
等技术先后被引入我国,在广东、湖南、湖北、四川、云南等南方气候湿润地区开展
应用试验,在提高人工坡面植被恢复的质量和工程速度等方面取得了良好效果。进入 21
世纪以后,这些技术又进一步在陕西、山西、内蒙古、河北等北方半湿润和半干旱气
候地区推广,并在保墒、抗旱等环节上有所改进,使其更具有中国特色。在植物物种
选择上,我国也经历了从草本向灌木、从外来物种向乡土物种转化的过程,但由于技

术上的原因,如何在人工坡面上构建乔灌草相结合的植物群落问题,至今还没有得到很好地解决。

交通部对推动我国人工坡面植被恢复技术的进步起到了带头作用。仅在“十五”期间,交通部西部交通建设科技项目管理中心就组织了 20 多项有关公路环境与生态建设的科研课题,涉及国内多个自然地带和山区、湿地、自然保护区等多种特殊环境类型,开展了环保对策、景观设计、生态工程技术与评价等多方面的理论和技术研究,取得了一系列重要的研究成果。这些成果被广泛应用在公路、铁路、水利、水电、城市建设、生态建设等领域,为减少灾害、保护环境、恢复生态发挥了重大效应。

作者有幸参加了交通部西部交通建设科技项目“西部地区公路建设中的环境保护对策研究”和“公路路域生态工程技术研究”,负责其中子课题“西部地区公路路域生态环境恢复技术体系”和“边坡与中央隔离带植被建植技术”的研究工作,在项目主持单位交通部公路科学研究所的带领以及交通部科学研究所的协助下,较为系统地分析了目前国内人工坡面植被恢复技术的种类、现状、特点和工程案例,并详细讨论了各种坡面植被建植技术的基本原理、设备与材料、工艺流程与技术要点和工程验收标准。作者正在主持的国家自然科学基金项目“我国北方地区岩质工程创面生态恢复机理与方法的试验研究”(30870467)、正在参与的交通部西部交通建设科技项目“半干旱地区公路岩质边坡生物恢复加固技术研究”(200631800087),在各种坡面植被建植技术组合研究方面进行了有意义的尝试。本书就是在这种背景下完成的。

全书共分五章,主要介绍了人工坡面的生态环境特点;人工坡面植被恢复设计;人工坡面植被建植技术;人工坡面植被恢复重建工程案例;人工坡面植被恢复工程的现状与问题的讨论。

本书由顾卫、江源主持编著。主要编写人员为:第 1 章顾卫、江源;第 2 章顾卫、晏晓林;第 3 章顾卫、刘永兵、余海龙、陶岩、姜伟、张春禹、刘杨;第 4 章顾卫、江源、刘永兵、余海龙、陶岩;第 5 章顾卫、沈毅、余海龙、张春禹、邵琪。全书由顾卫、余海龙统编定稿。

在本书撰写和编辑期间,2008 年 5 月 12 日,四川汶川发生了举世震惊的大地震。根据有关资料记载,汶川地震共造成植被破坏 18 997 处,面积约 493 万亩。绝大部分植被受损创面为坡地,滑坡、崩塌、泥石流、坠石等不仅造成植物本身受损,还使得植物赖以生存的自然基础——土壤也受到毁灭性破坏。高山、陡坡、裸岩、无土将成为汶川地震灾区坡面植被恢复重建的主要技术难题,也预示着这将是一个长期、艰巨的任务,不可能一蹴而就。由于受损机理、坡质坡度、环境条件的不同,灾区植被恢复必须要根据受损创面的类型特征、所处位置等因地制宜地选择植被恢复技术,实施植被恢复重建工程。本书的出版,如果也能为四川地震灾区坡面植被恢复提供一些技

术参考的话，将是作者之幸。

本书得以出版首先要感谢交通部西部交通建设科技项目管理中心，正是他们遵循交通部把高速公路建设成为“生态之路、景观之路、环保之路”的理念，热情鼓励、积极支持公路生态建设项目的立项和展开，才使得人工坡面植被恢复技术研究能够取得初步成果。其次要感谢中国环境科学出版社的有关领导和编辑，正是他们对于坡面生态问题的敏锐观察和认识，促成了本书能与读者见面。本书在撰写过程中参考和引用了国内外相关领域的专著、研究论文和资料，在此向各位作者表示感谢！

本书的作者来自不同的专业，人工坡面植被恢复技术对我们来说也是一个新课题，加上作者水平有限，有些技术试验和理论分析结果还有待于时间的检验，所以肯定有疏忽和遗漏之处，值得讨论和商榷的问题也在所难免，衷心恳请广大读者、有关专家和工程技术人员提出批评和宝贵意见。

作 者

于北京师范大学资源学院

2009年2月

目 录

第 1 章 人工坡面的生态环境特点	1
1.1 边坡分类	2
1.2 人工坡面的地质地形特征	2
1.3 人工坡面的土壤特征	4
1.4 人工边坡的小气候特征	8
1.5 人工边坡的植被特征	12
本章小结	13
第 2 章 人工坡面植被恢复设计	15
2.1 人工坡面植被恢复目的	15
2.2 人工坡面植被恢复需要解决的生态问题	17
2.3 坡面基础工程设计	21
2.4 土壤设计	25
2.5 植物群落设计	35
2.6 坡面排水设计	49
2.7 建植技术选择	51
本章小结	57

第3章 人工坡面植被建植技术	59
3.1 人工播种	59
3.2 草皮移植	62
3.3 苗木移植	65
3.4 液压喷播	76
3.5 客土喷播	87
3.6 有机质喷播	102
3.7 植生带与植生毯	114
3.8 植生网垫	124
3.9 植生袋	134
3.10 连续纤维加筋土技术简介	141
3.11 技术适用性评价	144
本章小结	153
第4章 人工坡面植被恢复重建工程案例	155
4.1 北京市百花山旅游公路客土喷播施工案例	156
4.2 山西省太原市绕城高速公路有机质喷播施工案例	161
4.3 青海省西宁市西塔高速公路植生带施工案例	171
4.4 内蒙古赤峰市赤通高速公路植生毯+移栽施工案例	175
本章小结	180
第5章 人工坡面植被恢复工程的现状与问题	181
5.1 人工坡面客土喷播技术的应用现状与问题	182
5.2 人工坡面有机质喷播技术的应用现状与问题	186
5.3 工程创面生态恢复的产业化问题	189

第1章

人工坡面的生态环境特点

坡面是指表面倾斜的土体或岩体，也可称为边坡或斜坡。坡面的形成原因可分为自然成因和人为成因两种。自然成因是指在自然界的各种地质构造运动、火山岩浆运动、侵蚀堆积运动等作用下所形成的地表倾斜，这种坡面叫自然坡面。人为成因是指在人类生活生产中所采取的各种工程措施（挖掘、搬运、填埋）的作用下所形成的地表倾斜，这种坡面叫人工坡面。不论是哪种坡面，不论其现状是否稳定，都可能在重力或其他外力（如风化、降雨、融雪、地下水、地震、土方工程、植被破坏、爆破等）的作用下发生坍塌、滑坡、泥石流以及其他形式的破坏现象。因此，坡面的稳定性与安全性，是人类生产生活中必须关注的问题。

在坡面产生、变化、消失、重建的过程中，坡面生态系统也随之发生了各种变化。例如人工坡面的产生往往要改变地形地貌、扰乱土壤结构、破坏植物群落、影响局地气候、增加水土流失危险性等。在全球生态危机日益严重的今天，坡面生态系统的保护、恢复与重建，不仅关系到坡面自身的安全，也关系到坡面所在地的区域生态系统安全。

在各类生态建设工程中，坡面生态恢复与重建工程具有技术含量高、施工难度大的特点。这是由于坡面生态环境系统比较复杂。本章将从地形、土壤、气候、植被的角度，对坡面生态环境特点进行综合分析。

1.1 边坡分类

从生态恢复与重建的角度研究边坡分类，目的是为了全面了解坡面特点，以便选取适当的生态恢复技术与方法。

关于边坡的分类，国内外提出的方法很多，特别是土木工程领域对边坡的划分非常细致。例如按边坡与工程关系可分为自然边坡和人工边坡；按人工边坡的形成方式可分为填方边坡和挖方边坡；按边坡变形情况可分为变形边坡和未变形边坡；按边坡岩性把未变形边坡统分为岩质边坡、土质边坡和土石边坡；按边坡高度不同可分为超高边坡、高边坡、中边坡、低边坡；按边坡坡度不同可分为缓坡、陡坡、急坡、倒坡等。这些分类大都与坡面生态恢复与重建工程有一定程度的关联，除此之外，边坡表面的起伏程度和岩石风化程度，也与生态恢复与重建工程的难易程度有关。

表 1.1 是依据前人对边坡所进行的各种分类，将其中与坡面生态恢复工程有关的部分进行归纳后所给出的基于边坡生态恢复工程的坡面分类，可作为从生态恢复与重建的角度认识边坡特点的参考。

1.2 人工坡面的地质地形特征

1.2.1 地质特征

人工坡面的地质特征取决于当地的地层条件和地质构造，对生态恢复工程产生影响的坡面地质特征主要是坡面的稳定情况和边坡的坡度。在冲积扇、洪积扇、古河道等地层条件下开挖的边坡，由于坡面组成物质土石相间、粒径不一、破碎松动，坡面稳定性较差；在岩石风化程度较高的地区和膨润土地区，坡面开挖后很容易受雨水侵蚀而失稳；黄土地区的土质边坡如果坡度较陡的话，很容易被流水侵蚀形成沟谷或造成沉陷和崩塌；而在地质构造稳定区域所开挖的边坡，一般情况下稳定性较好，下伏基岩受机械破碎暴露出来后尽管受到物理风化和化学风化作用，但是其时间进程相当缓慢，在短时间内并不会对人工坡面的生态恢复工程产生影响。

由于人工坡面是在原有地面上经过人为挖掘、堆砌、填压等工程措施后所产生的新倾斜面，因此人工坡面的坡度总是要大于原有地表的坡度。一般情况下，边坡的坡度取决于地质结构，岩质坡面的坡度较陡，而土质坡面的坡度较缓。然而除了地质结构之外，人工坡面的陡缓还受工程造价的制约。为了减少土方工程量以节省经费开支，对地质构造比较稳定的地段，挖方边坡通常会开挖得比较陡，特别是一些岩石坡面，

坡度往往都在 60° 以上, 甚至可达到 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 尽管节省了土方工程经费, 但给后期的坡面生态恢复工程带来困难, 并提高了坡面生态恢复工程的造价。

表 1.1 基于边坡生态恢复工程的坡面分类

分类依据	名称	简述
成因	自然边坡	由各种自然原因形成, 按作用形式可分为剥蚀边坡、侵蚀边坡、堆积边坡
	人工边坡	由各种人为原因形成, 按作用形式可分为挖方边坡、填方边坡
坡质	岩质边坡	由岩石构成, 无土壤
	岩质土边坡	由砾石和土混合构成, 岩质土中粒径 $> 2 \text{ mm}$ 的土壤颗粒含量超过 50% 或略小于 50% (几乎不含有机物, 肥力极差)
	土质边坡	由砂土、砂性土、粉性土、黏性土等构成, 土粒径 $< 2 \text{ mm}$ 的土壤颗粒含量达 100% (以生土为主, 有机物含量低, 肥力较差)
风化程度	微风化	坚硬岩石, 浸水后, 大多无吸水反应
	弱风化	较坚硬岩石, 浸水后, 有轻微吸水反应
	强风化	较软岩石, 浸水后, 指甲可刻出印痕
	全风化	极软岩石, 浸水后, 可捏成团
坡高	超高边坡	岩质边坡坡高大于 50 m, 土质边坡坡高大于 15 m
	高边坡	岩质边坡坡高 15~30 m, 土质边坡坡高 10~15 m
	中高边坡	岩质边坡坡高 8~15 m, 土质边坡坡高 5~10 m
	低边坡	岩质边坡坡高小于 8 m, 土质边坡坡高 5 m
坡长	长边坡	坡长大于 300 m
	中长边坡	坡长 100~300 m
	短边坡	坡长小于 100 m
坡度	缓坡	坡度小于 15°
	中等坡	坡度 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$
	陡坡	坡度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$
	急坡	坡度 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$
	倒坡	坡度大于 90°
起伏程度	平整坡	坡面基本平整, 无较大凹凸
	凹凸坡	坡面凹凸不平, 有较大坑穴
稳定性	稳定坡	稳定条件好, 不会发生破坏, 可以直接进行生态恢复施工
	不稳定坡	稳定条件差或已发生局部破坏, 必须处理使之达到稳定后才能进行生态恢复施工
	已失稳坡	已发生明显的破坏, 不能进行生态恢复施工

(引自周德培, 张俊云著《植被护坡工程技术》, 作者略有改动)

边坡植被的恢复虽然能提高边坡的稳定性,但其作用范围有限,因为植物根系和茎叶的作用,更多地表现在减轻降雨和冻融对边坡表层土体的侵蚀,并不能解决边坡深层结构的稳定性问题。也就是说,对于结构性不稳定的边坡,不能靠坡面生态恢复工程解决坡体稳定性问题,不稳定的坡面不适宜进行生态恢复施工;而坡面的坡度越大,生态恢复工程的难度就越高,工程成本也就随之上升。

1.2.2 地形特征

地形对坡面生态恢复工程的影响主要表现在表面形态、坡度、坡长、平整程度等几个方面。

边坡的表面形态可分为直形、凸形、凹形和复合形。不同坡形的土壤侵蚀状况有所不同。直形坡,坡面平直,愈向下坡水流汇集愈多,流速愈快,侵蚀随之加强。凸形坡,坡面上缓下陡,上部侵蚀冲刷较弱,而下部比较强烈。凹形坡,坡形上陡下缓,坡面上部坡长较短径流汇集较少,坡度较大但侵蚀冲刷不强烈;坡面中部坡度居中,侵蚀较强;坡面下部由于坡度减缓,流速降低,坡面水流的挟砂能力减弱,由上部搬运下来的泥沙易在下部沉积。复合形坡,凹凸相间、坡形多变,地形对坡地土壤侵蚀的影响较复杂,一般来说,坡面流路愈长,流速愈慢,水流的侵蚀作用也就愈小。

边坡坡度和坡长会影响降雨形成径流的流速和流量。从理论上讲,坡度越大则流速越大,侵蚀力也越强。但实际研究表明,坡度在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 时侵蚀量最大,超过此坡度时,侵蚀量反而减小。原因是坡度越大,实际受雨面积减小,从而也减少了流量。从坡顶到坡脚,随坡长的增加,流量逐渐增大,侵蚀力逐渐加强,但在侵蚀力不足以克服抗蚀力前,侵蚀不会发生,当坡长增加使水流的侵蚀力超过抗蚀力时,侵蚀量随坡长将逐渐增大。

人工坡面的平整程度与坡面形成方式和组成坡面物质的软硬状况有关。填方边坡的坡面基本是在土石料自然下滑过程中所形成的,因而坡面比较平整,在进行坡面生态恢复施工时,坡面清理比较容易,清坡工作量也比较小。挖方边坡既有用挖掘机开挖的,也有由爆破和挖掘机结合所形成的,因此平整程度差异较大。由挖掘机开挖的边坡(土质边坡、岩质土边坡)其坡面比较平整,清坡容易,工作量大;而由爆破和挖掘机结合所形成的边坡,特别是有一定风化程度(弱风化、强风化)的岩石边坡,坡面往往比较破碎,凹凸不平,清坡时不仅要除去浮石,还要用土填平凹陷,以防止坡面径流向低凹处汇集,也可以使坡面植物根系在向下生长的过程中避免遭遇悬空而影响发育。

1.3 人工坡面的土壤特征

土壤形成过程是地质大循环(营养元素的释放和淋溶过程)与生物小循环(营养

元素被生物吸收积累和释放过程)的矛盾统一,是气候、生物、母质、地形、时间和人类活动等要素共同作用的结果。随着土壤形成过程的进行,土体逐渐发生分异,形成自上向下并有内在联系的土层排列,体现出发生学意义上的土壤剖面层状结构特征。图 1.1 是自然土壤剖面层状结构示意图,由上向下一般可分为枯枝落叶层 (A_0)、腐殖质层 (A_1)、淋溶层 (A_2)、淀积层 (B)、母质层 (C) 和母岩层 (D) (图 1.1a),其中真正可称为土壤的是 A 层和 B 层,而植物的根系主要分布在 A_1 — A_2 层。坡面自然土壤与平地土壤一样,也存在着自上而下的层状结构,只不过各层的厚度随坡向、坡位、坡面形成时间的不同而有所差异。一般来说,坡底部的土层要比坡中部厚,而坡顶部的土层比较薄(图 1.1b)。

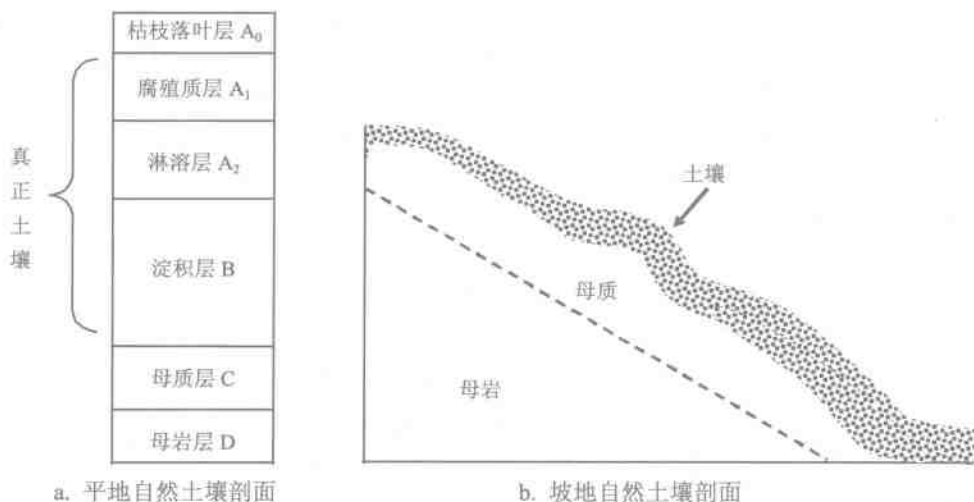


图 1.1 自然土壤的剖面结构示意图

但人工坡面的土壤与自然土壤有所不同。对于挖方坡面来说,除了坡上部还有完整的土壤之外,坡面其他部位的土壤随坡质的不同有很大差异,土壤剖面的层状结构已经部分丧失或完全丧失,土质边坡主要是土壤的淋溶层或淀积层,岩质土边坡主要是土壤的母质,而岩质边坡则是土壤的母岩(图 1.2a)。严格说的话,岩质土边坡和岩质边坡的表面已经没有土壤存在了。对于填方边坡来说,坡面物质是土与砾石的混合物(回填土),没有发生学上的分层结构,属于各项均质土壤(图 1.2b)。填方边坡的土壤与城市土壤很相像,都是人为扰动后的土壤,因此应属于退化土壤。

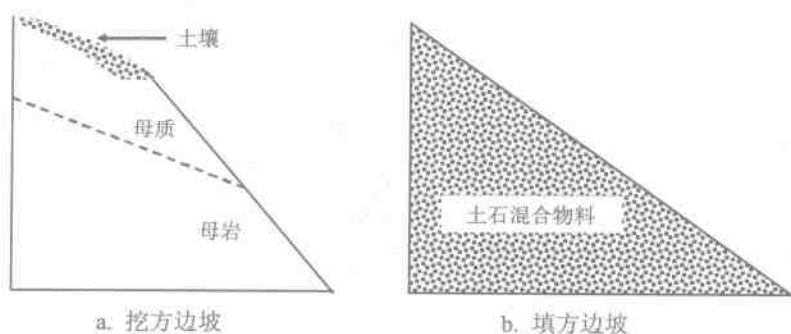


图 1.2 人工边坡土壤剖面结构示意图

人工坡面在形成过程中往往要破坏原有的地表植被，因此土壤与植被之间的平衡关系也就不复存在，这使得人工坡面表土抗侵蚀能力减弱，在雨蚀和风蚀作用下极易发生水土流失和养分流失，致使立地条件不断恶化，植物种子定植困难。同时由于坡度大、渗透性差等原因，坡面表土对降水截流作用较小，保墒能力低，也不利于植物生长。挖方边坡的土壤由于受到机械的挤压、切割作用，一般过于紧实，容重大，孔隙度低，不利于土壤中水分和空气的有效运移以及肥料协调转移，从而限制边坡植物的生长发育；填方边坡的土壤虽然比挖方边坡的表土相对疏松，但由于填压过程造成土壤容重加大，土粒排列紧密，土壤的紧实度还是远远高于自然土壤，此外，回填土中常常有工程废弃物、水泥、砖块和其他碱性物质混入，由此导致钙的释放和土壤重金属污染因素增多，使得填方边坡土壤的 pH 值比周围的自然土壤高，有向碱性的方向演变的趋势。

土壤硬度是反映土壤紧密程度或岩石风化程度的一个指标，硬度小，则表明其质地疏松或风化程度高，有利于植物根系生长发育，反之，则对植物根系发育产生不利影响，使之生长困难。陈宇晖等曾利用土壤硬度计对惠河高速公路沿线进行测量，其挖方边坡土壤（岩石）硬度变化幅度很大，为 $5 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ （表 1.2）。

表 1.2 岩石风化与表面硬度之间关系

岩石风化程度	全风化，呈土状	强风化	中风化	微风化
表面硬度/ (kg/cm^2)	$5 \sim 70$	$100 \sim 500$	≥ 500	∞

日本道路协会曾研究过土壤硬度与植物生长发育之间的关系。当土壤硬度（山中式土壤硬度计）小于 30 mm 时，植物根系尚可在土壤中生长发育；如果土壤硬度超过 30 mm ，植物的生长发育几乎不可能（表 1.3）。

表 1.3 土壤硬度与植物生长发育之间的关系

土壤硬度	植物发育状况
<10mm	土壤松软易干燥, 导致植物发芽受影响; 坡度较大时, 土壤易滑落
黏性土 10~23mm 砂性土 10~27mm	利于植物根系生长发育, 适宜草本植物繁殖, 适宜木本植物栽种
黏性土 23~30mm 砂性土 27~30mm	除了一部分木本植物之外, 植物根系的生长发育受到影响
>30mm	根系的发育生长几乎是不可能的
软岩、硬岩	在岩石表面有龟裂的条件下, 木本类植物的根系生长发育是可能的

人工坡面土壤的养分情况也与自然土壤有较大的差别, 原因在于原有土壤被剥离迁移、母质母岩裸露、缺少生物活动使得有机质积累减少, 因此养分含量非常低。以内蒙古自治区集宁—老爷庙高速公路某处挖方边坡土壤为例, 有机质含量只是自然土壤平均值的 1/28, 全氮含量只有自然土壤平均值的 1/14, 速效钾含量只有自然土壤平均值的 1/3, 速效磷含量只有自然土壤平均值的 1/1.5 (见表 1.4)。

表 1.4 人工坡面土壤与自然土壤的养分含量比较

编号	坡面位置	pH	有机质/%	全氮/%	速效钾/(mg/kg)	速效磷/(mg/kg)
1	表层自然土	7.3	2.19	0.102 3	120.26	13.2
2	表层自然土	7.5	20.50	0.109 3	124.76	6.1
3	表层自然土	7.2	4.13	0.199 8	143.76	6.7
4	坡面石质土	7.4	0.70	0.032 7	39.26	5.7
5	坡上部母质	7.8	0.22	0.005 5	3.00	5.4
6	坡脚处母质	7.5	0.11	0.005 1	41.26	6.6

由于原有地表自然土壤的丧失, 人工坡面土壤基本上不再具有土壤种子库的功能。土壤种子库是指存在于土壤表面和土壤中全部存活种子的总和。植物种子成熟后, 不管以何种方式传播, 最终都会散落到地面上, 有的刚好遇到合适的环境而萌发, 有的被动物摄食掉, 有的失去活力, 而大部分保持活力并进入土壤中, 形成土壤种子库。自然土壤中所保存的植物种子, 其来源之一是本地植物的种子雨, 因此土壤种子库与当地植物群落之间存在着不可分割的内在联系。土壤种子库的存在使得受干扰后的植被能够自然恢复, 这对于恢复当地原有的植物群落非常重要, 而人工坡面土壤由于不具有土壤种子库的功能, 因此人工坡面植被自然恢复, 特别是对于挖方边坡来说, 在

短时间内几乎是不可能的。

除了种子库功能丧失之外，人工坡面土壤中微生物、土壤动物的含量也非常低，研究表明：人工坡面表土中土壤动物类群不及自然土壤的 1/3。由于土壤微生物和土壤动物直接或间接地参与土壤中物质和能量的转化，是土壤生态系统中不可分割的组成部分，土壤微生物和土壤动物的缺乏，不仅影响土壤形成和发育过程，也影响土壤肥力的提高。

综上所述，人工坡面土壤特点可归纳为：

- 土壤层状结构受到破坏或丧失，母质、母岩裸露。
- 质地粗糙，硬度高，有效土层薄甚至无土层。
- 养分贫瘠缺少有机质，pH 偏高，通透性、保水性差。
- 植物种子贫乏。
- 缺少土壤微生物和土壤动物。

1.4 人工边坡的小气候特征

边坡的小气候差异是由地形所引起的，主要取决于边坡的坡向、坡度和坡位。由于不同坡向、坡度的坡面所接受的太阳辐射量和降水量不同，因此产生了光、热、水条件在不同坡向坡面和同一坡向不同坡位之间的再分配，由此引发出边坡的小气候差异。

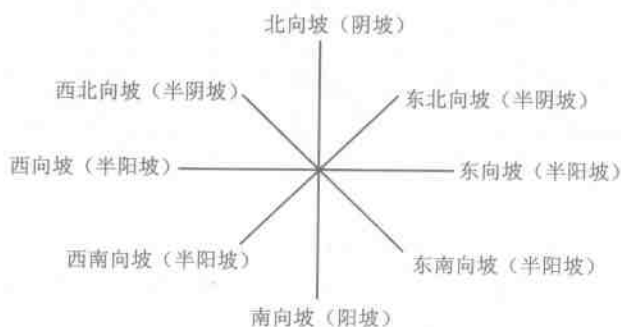


图 1.3 坡向示意图

坡向也就是坡的方位，一般可分为 8 个坡向，即东、南、西、北、东北、东南、西北、西南（图 1.3）。其中南坡为阳坡，北坡为阴坡，其余的坡向为半阳坡（东、西、东南、西南）或半阴坡（东北、西北）。一般而言，阳坡（半阳坡）比阴坡（半阴坡）