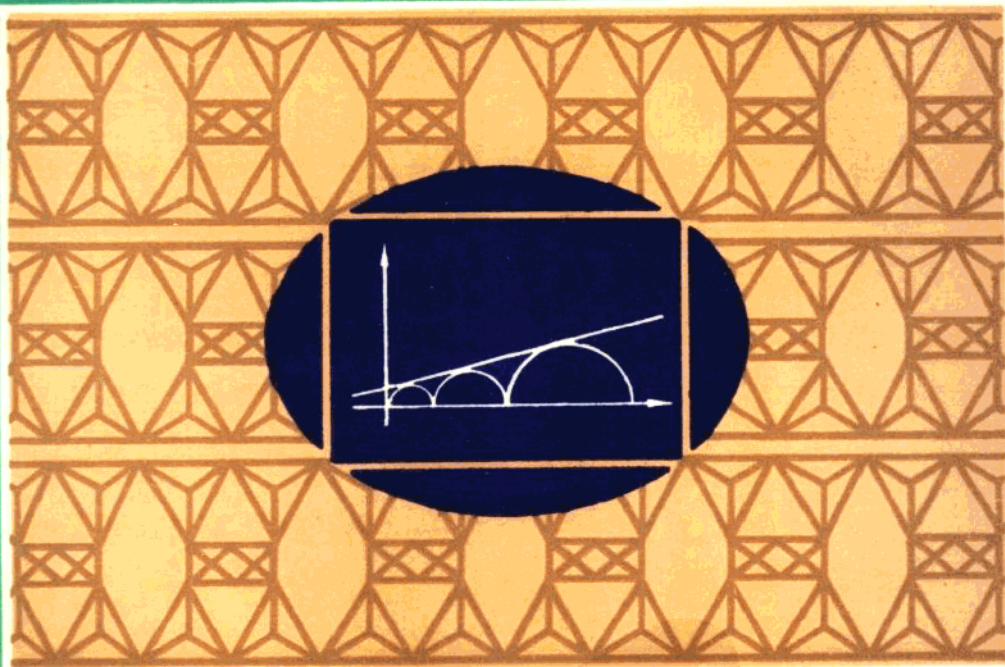


滇池泥炭土

地质·工程

蒋忠信 著



西南交通大学出版社

滇池泥炭土

地质·工程

蒋忠信 袁宝印 黄俊 等著
蔡贤才 徐英辉

西南交通大学出版社

(川)新登字 018 号

内 容 简 介

泥炭土的工程地质和路基加固,国内外罕见系统研究和成熟经验。本书是铁道部第二勘测设计院等单位对滇池地区泥炭土工程地质特性和路基加固研究成果之结晶,实为国内有关泥炭土地质和工程的第一本专著。全书系统论述了滇池地区第四纪地质、泥炭土工程地质、泥炭土路基加固和软基加筋土挡土墙等系列研究成果和工程试验总结。内容全面,资料丰富,观点新颖,突出了地质理论与工程实践紧密结合的特点,诸多内容具有开拓和创新性。本书可供从事第四纪地质、工程地质、岩土工程、路基工程和软基处理的科研、教学、勘察、设计人员参阅。

滇 池 泥 炭 土

地质·工程

蒋忠信等 著

*

西南交通大学出版社出版发行

(成都 九里堤)

新华书店经销

西南交通大学印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 9.375

字数: 210 千字 印数: 1—1000 册

1994 年 11 月第一版 1994 年 11 月第一次印刷

ISBN 7—81022—748—3/P·021

定价: 7.50 元

前 言

滇池盆地第四纪沉积深厚,软土尤其是泥炭和泥炭质粘土(合称泥炭土)分布广泛,对昆明市的经济建设带来了许多问题。近几年来,随着昆明市城乡建设的飞速发展,软基工程处理日益广泛和复杂化。特别是为了疏解过境车流和开发晋宁磷矿,于1988年相继动工兴建滇池的昆明市南过境干道一级公路(简称南干道)和中谊村至宝兴铁路(简称中宝铁路),使泥炭土路基加固问题更为突出。鉴于对厚层泥炭土路基的加固,国内外罕见成熟经验,由昆明市南过境干道建设指挥部出资,委托对南干道西段进行设计、施工总承包的铁道部第二勘测设计院进行软土路基加固的工程试验。同时开展对滇池地区第四纪地层和沉积相的分析研究,以满足软基加固工程设计之需要。此外,考虑到基础地质与工程加固之间缺失工程地质这一重要环节,尤其是泥炭土工程地质系统研究还近于空白,因此1990年初由铁道部第二勘测设计院立项进行泥炭土工程地质特性的研究。同时以昆明南干道软土地基上兴建加筋土挡土墙为工程对象,立项开展软基加筋土挡土墙的研究,以便为在沿海和内陆盆地日趋密集的软土路基探寻一种节省土方和用地的新型路肩墙型式。这样,以滇池地区泥炭土为对象,以昆明南干道为依托而进行的以上四项研究,构成了由基础地质、工程地质、软基加固和软基加筋土挡土墙所组成的泥炭土地质和工程的系列研究,合称“滇池地区泥炭土工程地质特性和路基加固研究”。

该研究由铁道部第二勘测设计院三分院和科研所主持,参加协作的单位分工为:中国科学院地质研究所第四纪室负责滇池地区第四纪地层及其沉积相分析,铁道科学院铁道建筑研究所负责软基加固试验路段现场测试设备的埋设与初期测试,西南交通大学铁道工程系承担试验工程的部分计算和现场测试,昆明市南过境干道指挥部负责试验工程施工的组织实施。承担分析试验的单位和人员是:中国科学院周昆叔进行孢粉分析,中国科学院地质所叶素娟进行古地磁测量,地质矿产部王强进行介形虫鉴定,中国科学院成都分院土壤室进行有机质成分分析,西南交通大学进行电镜和泥炭土力学特性试验,铁道部第二勘测设计院地质处完成孔压触探试验,其余均由铁道部第二勘测设计院三分院和科研所完成。研究工作至1991年底完成,历时4年,耗资33.5万元,研究成果于1992年6月通过了云南省科委组织的鉴定。以铁道科学院周镜研究员为主任、成都地质学院孔德坊教授为副主任的鉴定委员会认为,本项研究取得了一系列有创新和开拓性的成果,达到国内先进水平,其中把地质工作和道路工程的研究密切结合的思路和采用的方法,居国内领先地位。

该课题由铁二院蒋忠信、蔡贤才主持进行工作,主要研究人员还有徐英辉、黄俊、丁立道、袁宝印、陈建华、梁钟琪、李源寿、郑应斗、王华永、申明星。本书即为该研究成果的总结。全书分五章,分别论述滇池地区第四纪地质、泥炭土工程地质、软土路基加固工程试验、软基加筋土挡土墙试验研究、孔隙水压力测试和孔压触探试验。内容突出了从泥炭土基础地质研究到路基工程加固的系统性和地质与工程的密切结合。主要内容包括:根据孢粉、

古地磁、介形虫、 ^{14}C 和历史资料而对滇池地区进行的晚第四纪分期、沉积相划分, 突出了泥炭和滇池发育史; 根据 X 光衍射、电镜与差热分析, 论述滇池泥炭土的物质成分、结构特征及其对土体性质的影响; 据 500 多组试验样本的统计, 归纳出滇池地区软土性质的统计特征、不同时代和地区土性的差异规律, 以及土性指标间的相关关系; 基于三轴、蠕变试验, 阐述泥炭土的动强度、蠕变和压缩特性; 通过昆明南干道工程试验获得的采用振动沉管碎石桩、袋装铜矿渣排水井加固泥炭土路基的设计、施工、现场测试经验; 根据对软基加固试验路段 7 种手段、为期 3 年的现场沉降变形测试资料, 论述泥炭土地基沉降的时空特征、影响因素和分层规律, 以及沉降的计算、预测和设计参数确定; 通过试验和测试所取得的在未加固软基上兴建加筋土挡土墙的工程经验, 及其压缩沉降规律; 基于大量的孔隙水压力测试和孔压触探试验, 探讨孔压的变化规律和孔压消散曲线特征, 及其在计算固结参数时的应用; 用有序样品的最优分割法划分孢粉式和孔压触探地层的方法, 以及有限元法、曲线拟合在岩土工程中的应用。

参加本书初稿编写的人员和分工是: 袁宝印、蒋忠信第一章, 黄俊、蒋忠信第二章, 蔡贤才、丁立道、徐英辉、李斌第三章, 徐英辉、黄俊、蒋忠信第四章, 徐英辉、申明星、黄俊第五章。在初稿基础上, 由蒋忠信进行补充、修改和材料组织, 重新统一撰写定稿。由黄俊、王华永协助定稿工作, 赵立红、左俊、刘劲华清绘图件。定稿中采纳了周镜研究员、孔德坊教授等在鉴定会上提出的宝贵修改意见, 谨此致谢。

蒋 忠 信

1992 年 10 月 31 日

目 录

第一章 滇池地区第四纪地质

第一节	区域地貌特征与滇池发育史	1
第二节	孢粉分析与晚第四纪古气候	4
第三节	绝对年龄测定与地层划分	17
第四节	晚第四纪沉积环境与沉积相	22
第五节	晚第四纪泥炭沉积	29

第二章 滇池地区泥炭土工程地质

第一节	物质成分和微结构特征	32
第二节	滇池地区软土的物理力学性质	40
第三节	滇池地区泥炭土的强度特征	50
第四节	滇池地区泥炭土的压缩特性	55

第三章 昆明南干道软基加固工程试验

第一节	试验路段工程地质特征	59
第二节	振动沉管碎石桩加固泥炭土地基的工程试验	63
第三节	袋装铜矿渣排水井加固泥炭土地基的工程试验	70
第四节	实测沉降与变形分析	81

第四章 昆明南干道软基加筋土挡土墙试验研究

第一节	加筋土挡土墙方案研究	93
第二节	工程设计与施工工艺	94
第三节	沉降观测研究	98
第四节	问题讨论	113

第五章 孔隙水压力测试和孔压触探试验

第一节	孔隙水压力测试	114
第二节	孔压触探试验	117
第三节	孔压测试资料的应用	126

参考文献	132
------------	-----

第一章 滇池地区第四纪地质

滇池是云南省最大的湖泊,发育在昆明盆地中。滇池地区系指盆地内湖泊沉积区。滇池地区人口密集,百业兴旺,经济建设迅猛发展。因此,近几年来,中国科学院⁽¹⁾、地矿系统⁽²⁾先后对滇池和昆明盆地的晚新生代地质和沉积环境进行了系统研究。本章在此基础上,着重论述与工程建设密切相关的晚第四纪地质和泥炭土地质。

第一节 区域地貌特征与滇池发育史

昆明盆地是新生代断凹盆地,南北向的西山断裂带构成盆地的西缘。滇池发育在昆明盆地西侧,平均水位 1886.36 m,面积 300 km²,最大水深 10.16 m。滇池出口河流称海口河,最后汇入金沙江。滇池控制水位为 1887.5 m。

滇池周围各种地貌类型大体呈环状分布(图 1-1)。注入滇池的河流环湖形成冲积平原和三角洲平原,再外环布台地和山地。最大的入湖河流盘龙江、宝象河在滇池北岸堆积了宽 15 km 的三角洲平原,昆明城即坐落在平原中部。三角洲前缘呈锯齿状,发育砂嘴,称为海埂。河流阶地仅见高 2 m、宽可达 2~3 km 的堆积阶地。山地发育高 100 m、200 m 的两级夷平面。

滇池南岸三角洲较小,通过沿西山断裂带发育的南北向狭窄谷地与玉溪盆地相连。其间垭口为高约 30 m 的低缓台地。

滇池东岸发育宽 5~10 km 的冲积平原,沿山边分布上新世湖相沉积构成的台地。台地由山边向湖滨区倾斜,高度由约 100 m 降低为 10~20 m。

滇池西岸,西山强烈抬升,山顶高程 2438 m。山脊逼岸,三角洲狭窄。山坡东陡西缓;山地见两级夷平面,高 100 m 与 300 m,顶部覆盖厚层风化壳,且向西倾斜。西山以西地区普遍发育三级河流阶地。I 级为全新世堆积阶地,高 2 m;II、III 级为基座阶地,高 25 m、40 m,其上有强烈风化的厚 2~5 m 河流沉积物。

控制滇池地区地貌发育的主要因素是昆明盆地各断块的差异构造运动。各断块的西部下沉东部翘起,相对沉积区形成滇池,并在昆明盆地北部形成 4 个沉降中心:普吉、松华、草海和九甲。滇池南部也有两个沉积中心。新生代沉积的最大厚度超过 1000 m。

从在海口镇以北和晋城以南发现老第三纪河流相砾岩堆积,推测现今高 300 m 的夷平面大约形成于白垩纪晚期,与华北北台期夷平面相当;老第三纪初的构造抬升,形成了横穿滇池地区的河流,堆积砾石层,砾石排列方向指示河流流向西北。老第三纪末期,滇池地区地壳稳定,普遍发育现今高 100 m 的夷平面。中新世初期,印度板块与欧亚板块碰撞,云南高原随青藏高原隆起而抬升,构造运动活跃,西山断裂发生强烈差异运动,形成大型的昆明盆地,并积水成湖,为古滇池。滇池形成后,大致经历了以下 5 个发育阶段。

1. 新第三纪古湖阶段

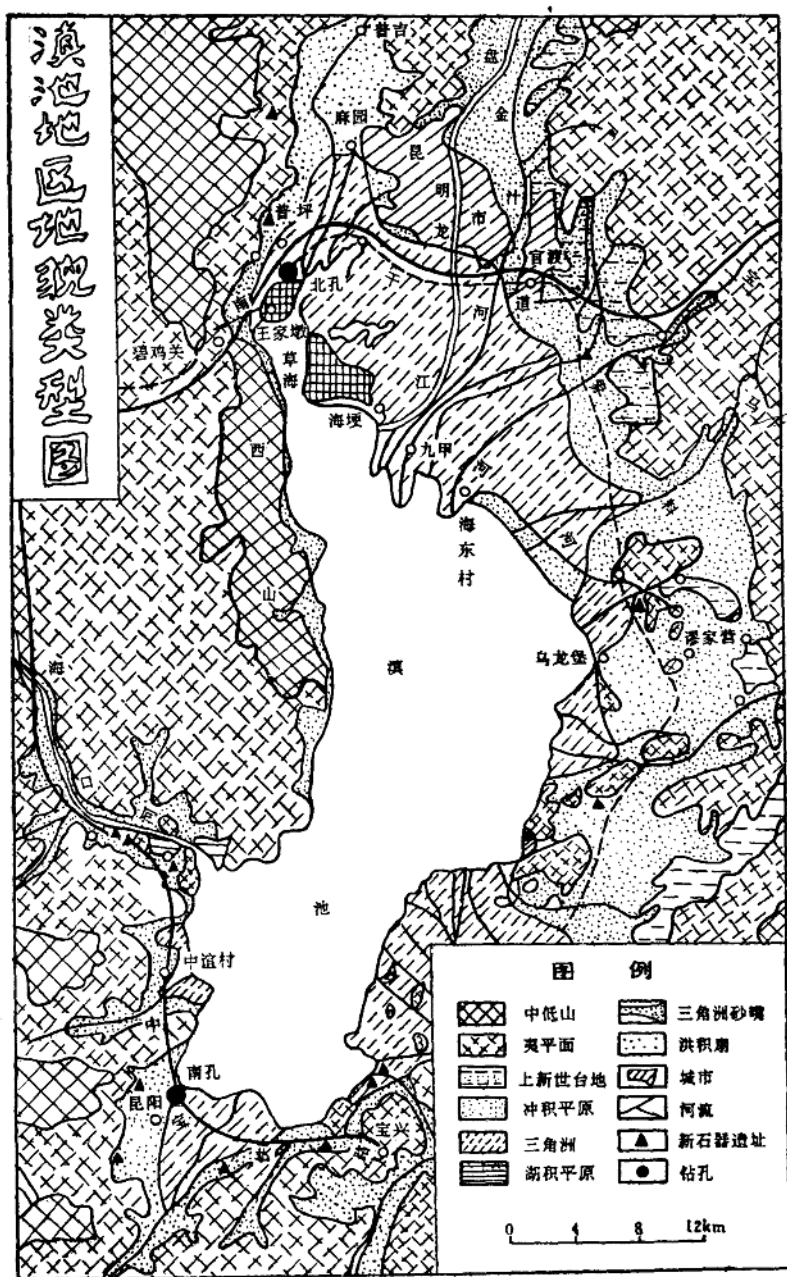


图 1-1 滇池地区地貌类型图

范围比今大 4~5 倍, 东岸达普照村、洛龙河、缪家营、万溪冲、小营、晋城一线, 北至松华坝地区, 南至昆明以南。湖面曾相对稳定, 堆积了厚层的中、上新世湖相沉积, 如普吉盆地中新世小龙潭煤组。古湖西侧沿断裂发育了出口河流, 即今海口河。现今高 40 m 阶地上的河流沉积可能为古海口河当时的堆积物, 并表现出完好的宽谷地形。

2. 下更新世古湖阶段

由于上新世末、更新世初的茅山运动, 西山断裂又发生差异活动。古滇池东部明显翘起, 上新世湖相沉积被抬升露出水面, 然后又继续抬升和接受侵蚀, 形成向西倾斜、现今高 60~110 m 的台地面。海口河下切形成现今高 40 m 的阶地。昆明城区钻孔底部基岩上的砾石层, 深约 40 m, 推测也是这一切割期的产物。由于海口河下切, 水流通畅, 滇池水面剧烈收缩, 远比现今滇池小。

3. 中更新世以来古湖阶段

由于西山断裂持续活动, 西侧明显抬升, 使海口河隆起, 通水不畅, 东部则相对下沉, 致使已收缩的古滇池逐步扩大, 至元代达最大范围, 但仍未达到上新世古湖的规模。由于湖面不断扩大, 滇池周围很难找到第四纪湖相沉积露头和古浪蚀遗迹。海口河 I 级阶地在中游段柴场、中庄一带高达 5~6 m, 向上、下游均降低至 2 m 左右。可见, 海口河地区在全新世仍明显隆起, 这是导致湖面上涨的主要原因之一。

滇池沿岸众多新石器时代遗址中发现大量带棘刺的螺蛳壳。这些遗址的时代约为距今 3000 年*。当时古人类捕螺为食, 遗址应位于当时湖滨。普坪乡王家墩遗址是 1958 年围湖造田时抽干湖水后发现的, 说明该遗址是距今 3000 年以来被淹没的。元代晋城西约 3 km 的金沙渡“滇泊浩渺, 烟木香霏”, 为当时湖岸, 而在比金沙渡更靠近滇池的河泊所遗址中螺蛳壳堆长 500 m、宽 150 m, 表明 3000 年前湖面比元代要低。唐代樊绰记载说: “碧鸡山在昆池西岸上, 与拓东城隔水相对”^[3]。昆池即今滇池, 拓东城即今昆明。可见唐代滇池已成浩大之势。

当然, 在湖面扩大的总进程中, 由于构造变动和气候变化, 也间有收缩阶段。滇池水面主要受出口海口河控制, 而海口河水位又受控于构造运动。地壳抬升期, 海口河隆起, 滇池扩张; 地壳稳定期, 海口河通畅, 滇池缩小。距今 2.6 万年左右, 末次冰期开始, 气候干冷, 降雨减少, 湖面明显收缩, 草海一带一度成陆, 遭受风化并形成钙质结核层。距今约 1.5 万年气候开始变暖, 滇池水位上升, 至 1.2 万年前达到较高水位。由于滇池存在出口, 故从未长期处于深水湖条件, 沉积以浅湖相、滨湖相、湖沼相和三角洲相为主。

4. 近代古湖阶段

元代初年, 滇池水位最高。1254 年, 蒙古大将兀良哈台见到“城际滇池, 三面皆水, 既险且坚”。元代文人王升在《滇池赋》中曰“千艘蚁聚于云津, 万舶蜂屯于城垠”^[3]。夏季暴雨时节湖水上涨直抵昆明城墙。由于雨季发生水患, 从元代至清朝, 几次大兴对海口河的疏浚工程, 使湖水位下降, 湖面收缩, 露出良田数万亩。湖面收缩还与人类活动加剧、水土流失严重有关。因为入湖河流含沙量增大, 堆积旺盛, 湖滨形成冲积平原和锯齿形三角洲, 使湖水后退。

在北岸和东北岸, 盘龙江、宝象河共同堆积了宽 15 的三角洲。13 世纪中叶, 官渡位于湖滨, 现今宝象河三角洲从官渡向前延伸了约 6.5 km, 年均约 8 m。盘龙江三角洲围

* 据云南省博物馆张增琪介绍。

成的湖湾北端,元代初年在麻园、马街、普坪一线,现今只剩北起大观楼宽不足1 km的狭长残留湖湾。盘龙江三角洲每年延伸约7.5 m,昆明南过境干道公路所经地区是约260年前才成陆。由于波浪作用微弱,北岸形成了两条砂嘴。一条是从盘龙江入湖处向西发育的三角洲前缘砂嘴,俗称海埂,长约4 km,前端宽50~100 m,清雍正年间黄士杰撰写的“六河总分图说”的插图中尚未有海埂出现,说明海埂形成时间距今只有200多年。另一条在宝象河以南,从海东村向东南方向至乌龙堡,为一古河口三角洲砂嘴,早期的地形图上这条砂嘴还十分清楚,近代才因淤积而与陆地连成一片。

明代滇池南岸在昆阳城边,其北的三角洲是400年以来形成的。

5. 现代湖泊阶段

现代通过海口河人工控制滇池水位,使之不高于1887.5 m。仅由于三角洲延伸和1958年的围海造田,湖面仍有逐步缩小之势。

第二节 孢粉分析与晚第四纪古气候

为研究滇池地区晚第四纪,在北岸的昆明市南过境干道公路西段董家村附近和南岸中宝铁路所经昆阳农场内各钻一孔,孔口标高分别为1886.45 m和1888.20 m,孔深分别为81 m和42 m(下面简称北孔和南孔)。

一、北孔孢粉分析结果

北孔共采孢粉样品57块,分析得孢粉9826粒,分属83个植物的自然科、属、种。孢粉式的宏观特征如图1—2所示:

(1) 裸子植物花粉明显占优势,被子植物花粉次之,蕨类植物孢子最少。剖面自上而下,木本花粉增多,草本花粉减少。

(2) 乔木花粉中,针叶植物花粉多于阔叶植物花粉。前者以松最多,深74.8~77.9 m有冷杉多量出现。阔叶植物花粉以暖温带、亚热带成分为主,深73~30 m阔叶花粉占优势,尤其在深48~53 m含量明显增长。

(3) 灌木及草本植物花粉中,多为禾本科、蒿属、菊科、狐尾藻、莎草、石竹科等。深44 m以下针叶花粉含量较多,最高可达90%;44 m以上草本花粉明显增多,深20~35 m膜蕨类大量出现,深15 m左右草本及蕨类显著增多。

北孔孢粉式中,虽多以针叶类木本花粉为主,也有旱生、中生、湿生及水生的草本植物,反映当时堆积区地貌状况与现今类似,既有山岳、丘陵、台地、平原,也有溪流及各种水体,沉积环境以河流、湖泊、沼泽等为主。剖面上孢粉种类、数量的变化,反映了沉积环境的变化和古气候冷暖、干湿的波动。

二、南孔孢粉分析结果

南孔采样30个,除7号样不含孢粉和8、11号样含孢粉少之外,其它均含丰富孢粉,计获木本花粉27个类型,草本花粉14个类型,蕨类孢子13个类型,藻类3个类型,共57个类型(图1—3)。据孢粉式可将剖面定性划分为7个孢粉带:

(1) 松、栎、桤木孢粉带,孔深0~12.56 m,含1~9号样品,

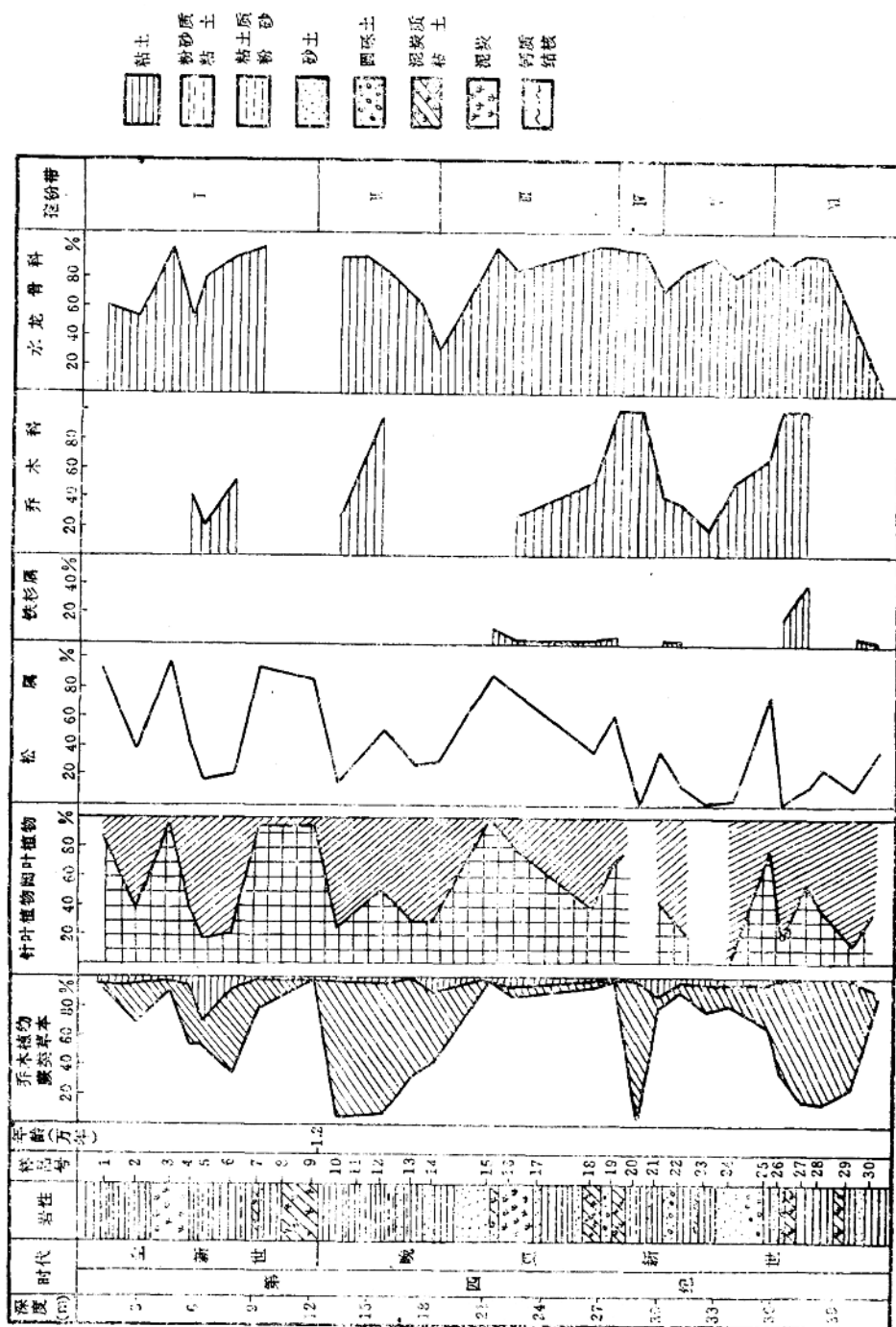


图 1-3 南孔岩芯植物式

- (2) 水龙骨带, 孔深 12.56~21.0 m, 含 10~14 号样品;
- (3) 松、栎带, 孔深 21.0~28.20 m, 含 15~19 号样品;
- (4) 水龙骨带, 孔深 28.20~29.50 m, 含 20 号样品;
- (5) 栎带, 孔深 29.50~36.20 m, 含 26~29 号样品;
- (6) 水龙骨带, 深 36.20~40.90 m, 含 26~29 号样品;
- (7) 松、栎带, 深 40.90~42.0 m, 含 30 号样品。

上述 1、3、5、7 四个孢粉带中, 云南松为暖性针叶树种, 栎为亚热带常绿阔叶林的主要成分, 桫欏木长于湿地或稍凉气候区。这些孢粉带代表了亚热带常绿松阔混交林或以栎为主的阔叶林植被。阔叶林除栎外, 还有栲、山核桃和木兰等。2、4、6 三个孢粉带中以水龙骨为代表的蕨类孢子占绝对优势, 是由于气候变恶劣所致。

三、孢粉式的最优分割

孢粉式的分带以往多凭经验。当分带规律性不够明显或考虑较多孢粉类型时, 凭经验划分孢粉式较困难。鉴于孢粉式是沿钻孔连续取样分析所得, 可借用有序样品的最优分割法^[4]进行分带。

(一) 孢粉式的最优分割原理

钻孔孢粉式是一个有序样品序列。设样品 I 的个数为 n , 含有 k 个具指相意义的孢粉类型, 每个样品中每个孢粉类型的指标值采用其占该样品孢粉总量的百分含量值 x 。则可列成孢粉类型含量值的 n 行 k 列矩阵:

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{pmatrix}$$

最优分割的目标是将这 n 个样品按顺序分割成 g 带, 使各带内部样品之间的差异尽可能小, 而各带之间的差异尽可能大。为此, 用距离系数 D 来刻画同一类样品之间的差异:

$$D(ij) = \sum_{\alpha=i}^j \sum_{\beta=1}^n [x_{\alpha\beta} - \bar{x}_{\beta}(ij)]^2 \quad (1-1)$$

式中 $\bar{x}_{\beta}(ij) = \sum_{\alpha=i}^j x_{\alpha\beta} / (j-i+1)$

$D(ij)$ 称为孢粉样品带 $\{i \cdots j\}$ 的直径。同时, $D(ij)$ 为主对角线元素等于 0 的 n 阶对称矩阵:

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{nn} \end{pmatrix}$$

且 $D(ii) = 0 \quad (i=1, \cdots, n)$

设有一分割法将 n 个样品分割成以下 g 带: $\{1, \cdots, p\}$ 、 $\{p+1, \cdots, q\}$ 、 $\cdots$ 、 $\{v+1, \cdots, n\}$ 。

则最优分割乃使各带样品直径的总和 S 达到最小值。

$$S = D(1, p) + D(p+1, q) + \dots + D(v+1, n)$$

以 (n) 表示被分割样品的数目, (g) 表示分割成的带数, j 表示分割点的样品号, 则

$$\begin{aligned} S_{\{g\}}^{(n)} &= \min S_{\{g\}}^{(n)} \\ S_{\{g\}}^{(n)}(n) &= S_{\{g-1\}}^{(n-1)}(j) + D(j+1, n) \end{aligned} \quad \} \quad (1-2)$$

将 n 个样品分割为如下 g 带: $\{1, \dots, I_1\}, \{I_1+1, \dots, I_2\}, \dots, \{I_{g-1}+1, \dots, n\}$ 。此即为最优分带。

(二) 南孔孢粉式的最优分割

南孔孢粉式由 27 个样品组成。孢粉类型中木本、草本、蕨类植物是生态环境有较大差异的三大类别 (表 1—1), 最优分割首先采用这三种指相类型进行, 可称为有序样品的三元最优分割。据此, $n=27, k=3$ 。分割计算结果以各样品带直径之和 S 表示, 如表 1—2 和图 1—4。图中 $S-g$ 曲线的明显转折点对应的 g 为最优分带数。从图 1—4(a) 可见, 将孢粉式划分为 7 个孢粉带较合适, 结果如表 1—3 和图 1—5(右)。

表 1—1 南孔各孢粉类型之百分含量

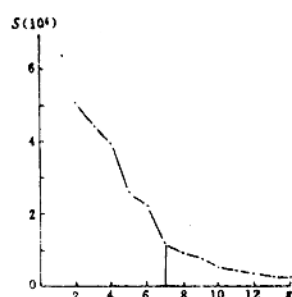
样品编号	取样深度 (m)	木 本	针叶林	阔叶林	草 本	蕨 类	水龙骨科	其它蕨类
1	1.35	92.5	81.1	11.4	2.8	4.7	3.8	0.9
2	3.00	68.6	24.8	43.8	5.7	25.7	13.3	12.4
3	4.75	92.1	90.4	1.7	0.9	7.0	6.1	0.9
4	5.75	54.2	31.6	22.6	4.6	41.2	3.9	27.3
5	6.45	54.8	8.9	45.9	29.8	15.3	12.1	3.2
6	7.95	34.2	6.8	27.4	6.8	59.0	55.6	3.4
7	9.30	79.1	76.1	3.0	0.0	20.9	20.9	0.0
9	12.15	97.5	93.2	4.3	2.5	0.0	0.0	0.0
10	13.35	3.9	0.6	3.3	2.2	93.9	86.1	7.8
12	15.80	7.1	3.6	3.5	2.7	90.2	75.9	14.3
13	17.35	35.3	10.1	25.2	0.0	64.6	40.4	24.2
14	18.40	42.2	11.9	30.3	11.0	46.8	13.8	33.0
15	21.30	99.1	99.1	0.0	0.0	0.9	0.9	0.0
16	22.50	87.5	78.7	8.8	7.1	5.4	4.5	0.9
18	26.65	94.2	34.7	59.5	1.9	3.8	2.9	0.9
19	27.75	98.3	66.3	32.0	0.8	0.8	0.8	0.0
20	28.95	2.0	0.0	2.0	1.0	97.0	93.9	3.1
21	29.95	79.5	32.5	47.0	12.8	7.7	3.4	4.3
22	31.20	91.2	11.5	79.7	2.6	6.2	5.3	0.9
23	32.55	77.3	0.0	77.3	5.4	17.3	16.4	0.9
24	33.75	8.2	2.0	80.0	2.0	16.0	13.0	3.0
25	35.70	67.1	53.0	14.1	3.5	29.4	25.9	3.5
26	36.30	36.0	5.6	30.4	1.1	62.9	52.6	10.3
27	37.50	24.6	13.4	11.2	0.8	74.6	52.6	22.0
28	38.30	12.7	3.2	9.5	0.0	87.3	77.8	9.5
29	39.90	23.0	3.0	29.0	0.0	77.0	37.0	40.0
30	41.10	78.7	26.3	51.9	3.3	13.9	0.9	12.1

表 1—2

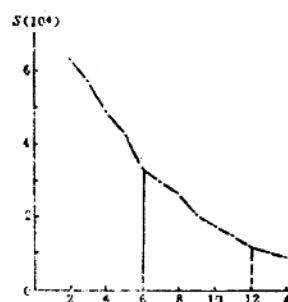
南孔孢粉式最优分带计算结果

分带数 g	三元分带		五元分带	
	分割点样号 j	直径总和 $S_j^{(g)}$	分割点样号 j	直径总和 $S_j^{(g)}$
2	25	$S_{25}^{(2)} = 50385$	19	$S_{19}^{(2)} = 63451$
3	29	$S_{29}^{(3)} = 44574$	20	$S_{20}^{(3)} = 57833$
4	14	$S_{14}^{(4)} = 39415$	24	$S_{24}^{(4)} = 49289$
5	9	$S_9^{(5)} = 25609$	14	$S_{14}^{(5)} = 43983$
6	19	$S_{19}^{(6)} = 22033$	9	$S_9^{(6)} = 33898$
7	20	$S_{20}^{(7)} = 11463$	12	$S_{12}^{(7)} = 30004$
8	12	$S_{12}^{(8)} = 9027$	6	$S_6^{(8)} = 26881$
9	7	$S_7^{(9)} = 7703$	4	$S_4^{(9)} = 21134$
10	3	$S_3^{(10)} = 5389$	29	$S_{29}^{(10)} = 18011$
11	6	$S_6^{(11)} = 4277$	16	$S_{16}^{(11)} = 15106$
12	5	$S_5^{(12)} = 3300$	25	$S_{25}^{(12)} = 12436$
13	4	$S_4^{(13)} = 2647$	21	$S_{21}^{(13)} = 10957$
14	27	$S_{27}^{(14)} = 2152$	28	$S_{28}^{(14)} = 9994$

三元最优分带与经验分带是一致的, 说明在采用较少指相孢粉类型且孢粉式分带规律较明显时, 经验分带可得出与最优分带类似的结果。孢粉式中亚热带常绿松阔混交林或以栎为主的阔叶林孢粉带, 与以水龙骨科为代表的蕨类孢粉带规律性相间, 反映了温暖与阴湿两类气候的顺序交替演变。



(a) 三元分割



(b) 五元分割

图 1—4 南孔孢粉式最优分割计算所得直径总和 S 与分带数 g 的关系

图 1—4(a) 中 $S-g$ 曲线的次一个转折点对应于 $g=10$, 故宜以 $S_3^{(10)}$ 、 $S_7^{(9)}$ 将第

I' 孢粉带进一步细分为木本, 木本、蕨类及草本, 木本三个亚带; 以 $S_1^{(9)}$ 将第 II' 孢粉带细分为蕨类、蕨类与木本两个亚带 (表 1—2), 反映气候的次一级变化。

为更多摄取孢粉信息, 使最优分带更趋合理, 将指相孢粉类型增加为针叶林、阔叶林、草本、水龙骨科和其它蕨类等五类, 进行五元最优分带。计算结果参见表 1—2 和图 1—4。

图 1—4(b) 显示, 五元最优分带以划分 6 个孢粉带为宜 (图 1—5 左), 如表 1—4 所示。五元最优分带与三元基本一致, 但五元分带的孢粉组合较三元分带复杂, 反映古气候变化的内涵更丰富; 南孔自下而上为较温湿、温暖、湿润、较温和、较凉湿、较适中的气候。

图 1—4(b) 中 $S-g$ 曲线次一级转折点对应于 $g=12$, 故将南孔孢粉式进一步细分为 12 个孢粉亚带 (带)。即以 $S_4^{(9)}$ 、 $S_6^{(8)}$ 将第 I 带, 以 $S_{25}^{(12)}$ 、 $S_{29}^{(10)}$ 将第 VI 带各再分为三个亚带; 以 $S_{12}^{(7)}$ 将第 II 带, 以 $S_{16}^{(11)}$ 将第 III 带各分为两个亚带, 以反映各带内生态环境的亚变化。

表 1—3 南孔孢粉式三元最优分带

孢 粉 带					孢 粉 亚 带			
编 号	名 称	主成分	样品号	深度(m)	编 号	名 称	样品号	深度(m)
I'	木本带	松、栎、桤木	1~9	12.75	I'—1	木本亚带	1~3	5.25
					I'—2	木本、蕨类及草本亚带	4~7	10.0
					I'—3	木本亚带	8~9	
II'	蕨类带	水龙骨	10~14	19.25	II'—1	蕨类亚带	10~12	16.58
					II'—2	蕨类与木本亚带	13~14	
III'	木本带	松、栎	15~19	28.35				
IV'	蕨类带	水龙骨	20	29.45				
V'	木本带	栎	21~25	36.0				
VI'	蕨类带	水龙骨	26~29	40.5				
VII'	木本带	栎、松	30	42.0				

(三) 北孔孢粉式的最优分割

北孔孢粉式较复杂, 采用最优分割法分带更理想。最优分割采用三元和六元两种方案。三元最优分割的指相孢粉类型为: 乔木花粉, 灌木与草本花粉, 蕨类孢子。此时, $n=57$, $k=3$ (表 1—5), 计算所得各分割点的 S 值列于表 1—6, 示于图 1—6。

表 1—4

南 孔 孢 粉 式 五 元 最 优 分 带

孢 粉 带					孢 粉 亚 带				
编 号	带 名	主成分	样品号	深度(m)	编 号	主成分	样品号	$S_{\frac{1}{8}}^{(6)}$	深度(m)
I	混合带	针叶林、 阔叶林、 蕨类、 草本	1~9	12.75	I—1	针叶林及 阔叶林	1~4	$S_4^{(9)}$	6.10
					I—2	阔叶林、 水龙骨 及草本	5~6	$S_6^{(8)}$	8.62
					I—3	针叶林	7~9	$S_9^{(6)}$	
II	蕨类带	水龙骨	10~14	19.85	II—1	水龙骨	10~12	$S_{12}^{(7)}$	16.58
					II—2	混合孢粉	13~14	$S_{14}^{(5)}$	
III	木本带	针叶林	15~19	28.35	III—1	针叶林	15~16	$S_{16}^{(11)}$	23.20
					III—2	针阔 混交林	17~19	$S_{19}^{(2)}$	
IV	水龙骨		20	29.45				$S_{20}^{(3)}$	
V	阔叶林	栎	21~24	34.72				$S_{24}^{(4)}$	
VI	蕨类及 木本带	水龙骨	25~30	42.0	VI—1	针阔混交 及水龙骨	25	$S_{25}^{(12)}$	36.00
					VI—2	水龙骨	26~29	$S_{29}^{(10)}$	40.50
					VI—3	阔叶林及 针叶林	30		

表 1—5

北 孔 各 孢 粉 类 型 之 百 分 含 量

样品号	取样深度(m)	乔 木	阔叶林	冷 杉	其 它 针叶林	蕨 类	膜蕨属	其 它 蕨 类	灌木与 草 本
1	1.70	66.0	21.4	1.1	43.5	4.2	0.0	4.2	29.8
2	3.05	78.3	6.1	0.9	71.3	1.7	0.0	1.7	20.0
3	4.05	80.7	18.6	1.7	60.4	4.2	0.0	4.2	15.1
4	5.35	75.0	16.7	2.5	55.8	10.8	0.8	10.0	14.2
5	6.95	66.5	15.4	3.3	47.8	10.3	5.1	5.2	23.2
6	9.30	71.2	18.4	1.8	51.0	9.8	1.2	8.6	19.0
7	10.70	66.2	10.5	1.4	54.3	12.0	5.5	6.5	22.8
8	11.85	65.8	16.8	0.6	48.4	9.3	2.5	6.8	24.9
9	12.75	80.1	12.3	0.6	67.2	3.2	1.3	1.9	16.7
10	14.40	78.6	6.0	0.0	72.6	6.0	0.9	5.1	15.4
11	15.45	42.4	17.0	0.8	24.6	26.3	0.0	26.3	31.3
12	16.60	89.4	11.2	1.3	76.9	5.3	0.7	4.6	5.3