

湖泊沉积与 环境演化

沈吉 薛滨 吴敬禄 吴艳宏 编著
刘兴起 羊向东 刘健 王苏民



科学出版社
www.sciencep.com

湖泊沉积与环境演化

沈吉 薛滨 吴敬禄 吴艳宏
刘兴起 羊向东 刘健 王苏民 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

湖泊是流域物质的最终储存库,其沉积物忠实地记录了湖区各种气候和环境变化的信息。本书系统地介绍了湖泊沉积研究的基础知识、基本理论和研究方法。第一篇分章论述了湖泊沉积物的类型、湖泊沉积作用的动力学特征、湖泊沉积的主要环境参数以及湖泊沉积年代学研究方法。在此基础上,第二篇重点阐述了利用湖泊沉积开展古气候环境研究的方法,包括物理指标在环境重建中的应用、地球化学指标在环境重建中的应用、生物指标在环境重建中的应用以及湖泊环境演化的古气候模拟。全书通过对不同区域、不同时间尺度湖泊环境演化的研究,深入探讨了环境演变的成因机制,揭示了环境演变的自然和人为驱动因素。

本书可供从事第四纪地质学、沉积学、地理学和环境科学等有关专业的研究人员,以及高等院校有关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊沉积与环境演化/沈吉等编著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-029016-8

I. ①湖… II. ①沈… III. ①湖泊-沉积学-研究②湖泊-自然环境-演变-研究 IV. ①P512.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 183478 号

责任编辑:罗 吉 赵 冰 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年9月第一次印刷 印张:30 1/4

印数:1—2 500 字数:702 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

湖泊是广泛分布的自然现象，它具有较清楚的边界，构成相对独立的自然环境体系，是自然地理研究的专门对象。但从湖泊的研究历史上看，早期对湖泊感兴趣的是生物学家，所以从开始就赋予湖泊学较深厚的生物学内涵，这种影响一直维持至今。同时，湖泊作为海洋研究的天然实验室，较多地开展了沉积学和水动力学的研究，并在三角洲、浊流、年纹层等沉积学理论以及湖泊分层与动力学理论方面作出了重要贡献。所以，在湖泊研究的早期阶段就呈现出多学科并举的势态，虽然各自聚焦的目标不同，但是却暗示了湖泊环境系统的复杂性，具有“小宇宙”的特点。

作为沉积学的重要分支，湖泊沉积研究在全球范围内引起高度的重视且进展快速，这与 20 世纪七八十年代石油工业的蓬勃发展密不可分，尤其是我国陆相生油理论的提出，极大地推动了我国湖泊沉积研究的全面开展。归纳起来，可以分为油源岩和储层研究两个方面，前者的研究阐明了陆相生油层的物质组成，以及油气生成的过程、阶段与机理，深化了陆相生油的理论，同时也带动了油气有机地球化学学科的飞速发展，成立了专门的研究机构和国家重点实验室，培养了一批优秀科学家；后者的研究主要从盆地分析的角度，研究不同构造、气候背景条件下砂体的几何与沉积模式，依据生、储、盖的时空组合规律指导油气的勘探，同时研究不同微相砂体的孔渗结构，结合地下油水运动的规律，进行生产井网的布设与调整，提高最终采收率。该方面的研究为油田的高产稳产作出了重要贡献，同时全面推动了相序沉积学、层序地层学等理论的发展，并带动了一批相关学科的兴起，为我国沉积学的深入发展奠定了扎实的基础。

20 世纪 80 年代后期，全球变化成为众多科学家的关注热点，湖泊沉积作为大陆气候环境变化的重要信息载体，再度兴起研究的热潮。湖泊的空间分布并不具有地带性，但是湖盆形成在区域上常常具有同步性和事件性，一旦积水成湖，其发育演化的过程就深受区域气候和环境的影响，带有明显的区域特色。因此，湖泊沉积在研究全球变化与区域响应方面具有不可替代的优势。从极地到低纬的湖泊纷纷被作为研究对象，重建它们环境演化的序列，并通过气候或环境事件作为桥梁，与极地冰芯、深海的记录进行比较研究，探讨不同区域之间气候变化的动力学联系与可能机理。与此同时，在我国也分别选择青藏高原、西北干旱区和东部湿润区的湖泊进行研究，其中季风过渡区的湖泊是关注的重点，通过湖泊记录的分析对比，结合黄土、冰芯等的记录，力图探讨不同时间尺度（ $10^0 \sim 10^2$ 年）东亚季风变化的阶段与规律及其与青藏高原隆升生长的关系，揭示区域响应的差异，进而分析气候波动的周期，以及与高低纬驱动的关系。在大量湖泊研究的基础上，世界各大区先后建立了湖泊环境变化的数据库，作为基础资料开展大区之间的环境对比，并对古气候模拟结果进行检验。

在湖泊沉积研究方面，尽管采用代用指标重建了不少气候与环境演化的序列，但是其

数量仍有限,空间分布也不均匀,存在较大范围的空白区。通过序列间的对比,结合现代气候与大气环流研究的相关结果,对古气候变化进行动力学与可能机理解释,这类解释存在一定的局限性与不确定性,难以分析变化的过程与空间结构的特征。在这种形势下古气候模拟获得快速的发展,应用全球大气模型或海气耦合模型,并嵌套区域模型,采用特征气候时期(末次盛冰期、全新世高温期、海洋氧同位素三阶段、新仙女木冷期、小冰期)的边界条件包括下垫面植被,模拟气候的特征、大气环流格局和区域差异,并与代用指标的重建资料进行对比,加深理解气候变化与区域响应差异的动力学机理。

20世纪80年代后期,随着工农业的迅速发展,人类活动对湖泊的干扰加强,湖泊环境发生了明显的恶化,包括:过量营养盐输入的富营养化;酸雨引起的湖水酸化;入湖水大量被截留,湖泊萎缩咸化甚至干涸;过度围垦,湖泊调蓄功能退化,洪涝灾害频发;过度围网养殖,湖泊生态系统退化。为了解决这些湖泊环境问题,必须区分出人类活动影响的分量。首先,要定量或半定量复原湖泊环境变化的序列,为了达到这一目标,加强了区域湖泊现代过程的研究,一方面深入理解代用指标的环境意义,另一方面获得那些对区域湖泊环境梯度敏感响应的指标,在区域湖泊环境数据库的基础上,建立代用指标-环境要素之间的转换函数,借以定量重建湖泊环境变化序列。当前应用得较为广泛的是湖泊水生生物指标,包括硅藻、摇蚊幼虫等,其中硅藻的研究最为成熟,已建立了全球湖泊硅藻-环境数据库,在国内也初步建立了青藏高原硅藻-湖水盐度、长江中下游地区硅藻-湖水总磷浓度等转换函数。同时力图通过湖泊介形类壳体的锶、镁、钙含量与同位素的分析以及形态参数研究,探讨湖水温度、盐度的定量重建途径。建立湖泊环境演化序列之后,还需要获得人类活动和气候的序列,前者往往通过历史文献记录,推导出湖泊所在地区的人口、耕地资料;后者借助于树轮等记录或长积分模拟的结果,将气候、人类活动、湖泊环境三类定量序列之间的关系进行数理统计分析,从而获得人类活动影响的大致分量。

编写本书是为了系统总结我国湖泊沉积研究的成果,特别是国际全球变化研究兴起以来,湖泊沉积在古气候古环境记录方面的研究成果,以期对今后的研究工作具有指导和借鉴作用。为此,本书在第一篇(1~4章)系统介绍了开展湖泊沉积研究的基础知识和基本理论;在第二篇(5~9章)重点阐述了利用湖泊沉积开展古气候古环境研究的方法和实例。本书由中国科学院湖泊沉积与环境重点实验室的研究人员集体编写完成,各章主要编写人员如下:第一章,薛滨;第二章,吴敬禄、马龙;第三章,沈吉、蒋庆丰;第四章,吴艳宏、夏威岚;第五章,刘兴起;第六章,沈吉、吴艳宏、姚书春;第七章,羊向东、肖霞云、张恩楼、李春海、刘桂民、董旭辉;第八章,刘健、于革;第九章,王苏民、薛滨。全书由沈吉和王云飞负责统稿并审定。

本书出版得到国家杰出青年基金(40625007)和中国科学院南京地理与湖泊研究所出版基金的资助,作者谨以此书献给中国科学院南京地理与湖泊研究所建所70周年。

由于本书内容广泛,涉及学科众多,且国内尚无同类著作可供借鉴,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

编著者

2009年12月18日于南京

目 录

前言

第一篇 湖泊沉积

第 1 章 湖泊形成、演化与主要沉积类型	3
1.1 湖泊的形成及其成因类型	3
1.1.1 基于盆地地质地理的成因分类	3
1.1.2 基于湖泊营养水平的分类	6
1.1.3 基于湖水分层的分类	6
1.2 湖泊的演化及其主要原因	7
1.2.1 湖泊演化与地质构造	8
1.2.2 湖泊演化与气候因素	9
1.2.3 湖泊演化与河流影响	10
1.2.4 湖泊演化与海面变化	10
1.2.5 湖泊演化与人类活动	11
1.3 湖泊主要沉积类型	13
1.3.1 湖泊碎屑沉积	14
1.3.2 湖泊化学沉积	16
1.3.3 湖泊生物沉积	17
参考文献	19
第 2 章 湖泊沉积作用及其动力学特征	20
2.1 湖泊水动力特征	20
2.1.1 湖浪	21
2.1.2 湖流	23
2.2 湖泊机械沉积作用	24
2.2.1 有关流体力学的几个基本概念	25
2.2.2 牵引流的机械搬运和沉积作用	27
2.2.3 重力流的机械搬运与沉积作用	32
2.2.4 冰的搬运和沉积作用	34
2.2.5 搬运和沉积过程的碎屑物质变化	34
2.3 湖泊化学的沉积作用	35
2.3.1 溶解物质的化学搬运和沉积作用	35

2.3.2 湖泊化学沉积作用	38
2.4 沉积分异作用	40
2.4.1 机械沉积分异作用	40
2.4.2 化学沉积分异作用	41
2.5 湖泊沉积的生物作用	41
2.5.1 生物的搬运和沉积作用	41
2.5.2 生物扰动作用	43
2.6 沉积后作用	43
2.6.1 沉积后变化的阶段划分和特点	43
2.6.2 沉积后变化的影响因素	45
2.6.3 沉积后作用的方式	47
2.7 湖泊沉积作用空间分异的动力学特征	48
2.7.1 河口区	49
2.7.2 开阔湖区	56
2.8 小结	59
参考文献	60
第3章 湖泊沉积的主要环境参数	62
3.1 湖泊沉积的物理参数	62
3.1.1 含水量	62
3.1.2 体积密度	63
3.1.3 烧失量	64
3.1.4 粒度	65
3.1.5 磁参数	71
3.2 湖泊沉积的化学参数	74
3.2.1 沉积物元素的组成	74
3.2.2 湖泊沉积的矿物特征	77
3.2.3 沉积物中有机碳化合物	81
3.3 湖泊沉积的生物参数	85
3.3.1 底栖藻类	86
3.3.2 大型植物	87
3.3.3 底栖无脊椎动物	88
3.3.4 细菌	92
3.4 湖泊沉积的构造参数	97
3.4.1 物理成因的沉积构造	98
3.4.2 化学成因构造	104
3.4.3 生物成因构造	106
3.4.4 湖泊沉积中的年纹层构造	107
参考文献	114

第 4 章 湖泊沉积年代学研究 with 主要方法	118
4.1 ^{14}C 年代学	118
4.1.1 ^{14}C 测年的基本原理	118
4.1.2 ^{14}C 测年的基本方法	119
4.1.3 湖泊沉积物中 ^{14}C 测年材料及分离提取技术	122
4.1.4 ^{14}C 年代误差	124
4.1.5 ^{14}C 年代校正	126
4.2 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs	128
4.2.1 来自大气中的 ^{210}Pb	128
4.2.2 来自江河的 ^{210}Pb	128
4.2.3 来自集水流域的颗粒性 ^{210}Pb	128
4.2.4 ^{210}Pb 年代的一般计算方法	129
4.2.5 应用范围及问题	130
4.2.6 人工放射性核素 ^{137}Cs	130
4.2.7 ^{137}Cs 的大气环流及时标意义	130
4.2.8 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 年代判定的可靠性以及存在的问题	131
4.3 古地磁	131
4.4 其他方法	132
4.4.1 热释光/光释光	132
4.4.2 电子自旋共振	134
4.4.3 氨基酸外消旋法	134
4.4.4 铀系不平衡法	135
4.4.5 纹层定年法	135
4.4.6 火山灰年代学	135
4.4.7 事件性定年方法	136
参考文献	136

第二篇 环境演化

第 5 章 物理指标在环境重建中的应用	141
5.1 湖岸阶地	141
5.1.1 基本概念	141
5.1.2 利用湖岸阶地研究湖面波动与气候变化	142
5.2 粒度	143
5.2.1 粒度与区域降水	143
5.2.2 粒度与湖泊水位波动	145
5.2.3 粒度与风成活动	148
5.2.4 粒度与冰川进退	154

5.3 环境磁学	155
5.3.1 湖泊沉积物内外源矿物的磁性特征	156
5.3.2 样品的采集及测量	158
5.3.3 环境磁学在古湖泊研究中的应用	159
5.4 色度	171
5.4.1 基本概念	171
5.4.2 沉积物色度在环境重建中的应用	171
参考文献	174
第6章 地球化学指标在环境重建中的作用	179
6.1 元素地球化学	180
6.1.1 元素地球化学与湖泊流域的气候和风化作用	180
6.1.2 元素地球化学与湖泊环境变化	191
6.1.3 元素地球化学与人类活动	196
6.2 稳定同位素地球化学在湖泊沉积研究中的应用	208
6.2.1 稳定同位素地球化学的基本原理	208
6.2.2 氧同位素	211
6.2.3 碳同位素	217
6.2.4 氧、碳同位素在湖泊沉积研究中的应用	221
6.2.5 氮同位素	229
6.2.6 锶同位素	234
6.3 有机地球化学	242
6.3.1 有机碳	242
6.3.2 生物标志化合物	243
6.3.3 色素	250
参考文献	253
第7章 生物指标在环境重建中的应用	262
7.1 化石生物指标研究的基本原理和方法	262
7.2 孢粉	265
7.2.1 概述	265
7.2.2 孢粉分析方法	266
7.2.3 孢粉分析原理	269
7.2.4 湖泊沉积孢粉在古环境研究中的应用	273
7.3 炭屑	282
7.3.1 概述	282
7.3.2 炭屑的特征	283
7.3.3 炭屑的传播与沉积	283
7.3.4 炭屑的研究方法	283
7.3.5 炭屑记录的解释	284

7.4 气孔器	286
7.4.1 概述	286
7.4.2 实验室处理与鉴定	287
7.4.3 气孔器在重建古植被中的运用	288
7.4.4 我国气孔器研究的展望	289
7.5 硅藻	289
7.5.1 概述	289
7.5.2 硅藻样品采集和实验室分析	290
7.5.3 硅藻转换函数	292
7.5.4 硅藻在古气候环境重建中的应用	297
7.6 植物大化石	309
7.6.1 概述	309
7.6.2 研究方法	310
7.6.3 植物化石在环境重建中的作用	311
7.7 摇蚊幼虫亚化石	317
7.7.1 概述	317
7.7.2 实验分析与数据表达	318
7.7.3 摇蚊在环境重建中的应用	319
7.8 枝角类	323
7.8.1 概述	323
7.8.2 实验室分析	323
7.8.3 数据表达	324
7.8.4 枝角类在环境重建中的应用	324
7.9 介形类	327
7.9.1 概述	327
7.9.2 介形类分析与鉴定	328
7.9.3 介形类在环境重建中的应用	328
7.10 其他生物化石	331
7.10.1 非孢粉型遗迹	332
7.10.2 金藻	333
7.10.3 甲螨	334
7.10.4 淡水软体动物	335
参考文献	337
第8章 古气候模拟与湖泊环境演化	359
8.1 古气候模拟的基本原理	359
8.1.1 大气环流模式	361
8.1.2 海洋环流模式	364
8.1.3 陆面模式	366

8.1.4 冰雪模式	369
8.1.5 气候系统耦合模式和嵌套模式	375
8.2 特征时期的古气候模拟	392
8.2.1 第四纪气候模拟	392
8.2.2 历史气候模拟	429
参考文献.....	439
第9章 湖泊环境演化及其成因机制	448
9.1 湖泊环境的综合判识	448
9.1.1 湖泊环境综合判识的科学内涵	448
9.1.2 代用指标分类	449
9.2 湖泊环境对气候变化响应的区域特色	455
9.2.1 干旱地区	456
9.2.2 季风湿润区	457
9.2.3 干旱-湿润过渡区	458
9.2.4 高寒地区	460
9.3 不同时间尺度湖泊环境变化与可能的成因机制	461
9.3.1 百万年时间尺度	462
9.3.2 万年时间尺度	463
9.3.3 千年时间尺度	464
9.3.4 百年时间尺度	465
参考文献.....	470

第一篇

湖 泊 沉 积

第1章 湖泊形成、演化与主要沉积类型

1.1 湖泊的形成及其成因类型

地球表面的湖泊，不论其何种成因类型，湖泊形成都必须具备两个最基本的条件：一是能集水的洼地，即湖盆；二是提供足够的水量使盆地积水（汪品先等，1991）。因此湖泊总是在一定的地质、地理背景下形成，通常情况下往往具有一定的事件性。许多湖泊通常是由于某些强烈的地质事件，诸如火山、地震或冰川作用形成的；还有许多湖泊的形成与地壳的缓慢升降有关。当湖泊形成后，流域和湖盆的地形，由于遭受风化、侵蚀、沉积作用以及人类活动等外营力的作用，而不断地发生着变化（弗里德曼和桑德斯，1987）。例如，北欧和北美洲北部的所有湖泊，都曾遭受过末次冰期巨大营力的影响，如果这些地区不再发生大的构造变动，那么所有湖泊终将在适当的时候被不断补充的沉积物所充填而转变为陆地。根据地质学的观点，湖泊是地球表面上暂时存在的地质体。就地貌类型或生物种属而言，它们具有青年期、壮年期和老年期等三个连续的发育阶段。从其形成到成熟直至消亡的演化过程中，地质、物理、化学、生物作用的相互影响与依存，表现出明显的区域特色。因此，按照湖泊盆地的地质成因、湖水营养水平、湖水的分层等差异，湖泊的形成及其成因也具有复杂的多样性。

1.1.1 基于盆地地质地理的成因分类

由于湖盆是湖水赖以保存的前提，而湖盆形态特征不仅直接间接地反映其形成和演变阶段，并且在较大程度上又制约着湖水的理化性质和水生生物类群。因此，通常以湖盆的成因分类作为湖泊成因分类的重要依据。Hutchinson（1957）的著作鲜明地指出，在考虑湖盆成因分类时，必须同时考虑盆地的积水，也要基于湖泊形成的事件性与湖泊环境的区域性概念。根据盆地形成营力的性质，把湖盆成因分为 11 个大类和 76 个亚类，这是迄今为止最完整的湖盆成因分类。

本书引用 Hutchinson（1957）的归纳，共分 11 种主要湖泊类型（霍坎松和杨松，1992；汪品先等，1991），简单概述如下。

1. 构造湖

构造湖包括由地壳较深部的构造运动所形成的一切湖泊，主要有以下几种类型：

（1）由造陆运动形成的湖泊，如里海、咸海以及黑海—里海地区的其他湖泊，它们是由于几次陆地的上升事件（如形成阿尔卑斯山的造山运动）而与大海分离开。

（2）由于倾斜、褶皱或翘曲等作用而形成的湖泊，如中非的裂谷湖群。

地球上最大的一些湖泊，几乎都属于构造湖的类型，如维多利亚湖、贝加尔湖、坦

噶尼噶湖、死海、黑海、里海等。

2. 火山湖

此类湖泊形态繁多，计有：①包括低平火山口湖、破火山口湖及火山口湖等，如爪哇拉蒙岸火山斜坡上的寄生低平火山口湖；②由火山熔岩堰塞形成的湖泊，如美国加利福尼亚州的斯纳格湖。

3. 滑坡湖

由滑坡、泥石流和岩屑堆截而形成的湖泊。由于滑移的碎屑或多或少地易于被随后发生的洪水或其他类似事件侵蚀掉，所以，此类湖泊在时间上往往较为短暂。

4. 冰川湖

“在形成湖泊的营力中，没有一种可与更新世的冰川作用相比拟的。地球历史上的大部分时期中，始终存在着一些构造的、火山的和溶蚀的盆地，以及一些由风力作用和壮年期河谷的建造作用形成的湖泊；但是，由于现今存在的冰川活动所造成的小型湖泊的数量之多，却是十分特殊的现象，从而为湖泊学家提供了比中生代和第三纪大部分时期内形成的盆地数目总和多若干倍的可供研究的盆地。”这段引自 Hutchinson (1957) 的话突出地说明，北欧和北美洲北部地区的湖泊数量之多，控制着北欧和北美洲的自然景观，并具有生态上和实用方面的重要意义。

冰川湖泊可分为四种主要成因类型。

(1) 直接与冰相接触的湖泊，如赋存于冰上或冰内以及由冰围堵而成的湖泊。

(2) 冰成岩盆地，如冰斗湖、山麓冰川湖（或亚高山湖）和峡湾湖等。包括：英国大湖区的湖泊；欧洲阿尔卑斯山区的湖泊（如日内瓦、康斯坦茨和布里恩茨等湖）；加拿大北极区的大型湖泊（如大奴湖）；挪威的峡湾湖（如伦瓦滕湖和姆约萨湖）等。

(3) 冰碛湖和冰水湖，由终碛、后碛或侧碛造成的湖泊。

(4) 冰碛盆地，如锅状湖和融冻湖。

5. 溶蚀湖

渗入石灰岩、石膏或岩盐等易溶沉积体中的水，能产生溶蚀盆地。克罗地亚达尔马提亚海岸的喀斯特区是著名的溶蚀湖区。美国佛罗里达州也存在着溶蚀湖，但是在那里老变质岩被第三系石灰岩沉积物所覆盖。此外，阿尔卑斯山的钙质岩分布区内，也有溶蚀湖存在。

6. 河成湖

流动水的活动可形成以下几种湖泊类型：

(1) 瀑布潭湖或侵蚀湖，是由大瀑布或现代与古代的瀑布或急流的侵蚀力所造成。

(2) 当河流被其支流河道沉积物横切堰塞时，形成三角洲湖和浅湖。

(3) 曲流湖，与壮年期泛滥平原伴生，如牛轭湖和天然堤湖，我国山东境内的南四

湖当属此类湖泊。

7. 风成湖

由风力活动形成的湖盆，称为风成湖。这样的湖盆主要出现于干旱地区。常见的有以下两种类型：①由风的侵蚀作用形成的风蚀盆地；②由风成砂或风成黄土围堵而成的湖泊。

8. 海岸湖

海岸湖一般是由大海沿岸搬运的物质围堵而成，如沙颈岬湖和沙嘴湖。

9. 有机成因湖

有机成因湖多属于小型湖泊，包括由植物围堵形成的植物水坝、海狸水坝和珊瑚湖等。

10. 人工湖

人工湖是指人工建造的湖、水库和废弃矿坑积水等。

11. 陨石湖

陨石湖是由外太空陨石以非常剧烈的方式在地表撞击所形成的湖泊。

在我国，湖泊的类型也是复杂多样。构造湖在我国五大湖区有普遍分布，是在地壳的内力作用下（包括地质构造运动所产生的断陷、拗陷、沉陷）形成的构造盆地基础上经蓄水而形成，青藏高原和云贵高原的许多大、中型湖泊如青海湖、纳木错、滇池、抚仙湖等多属这一类型。火山口湖与火山喷发有关，火山休眠后积水形成或由火山熔岩流堰塞原先河道而形成的火山熔岩堰塞湖，主要集中在我国东北地区。例如，中国和朝鲜边界上的天池为典型火山口湖；五大连池则属火山熔岩堰塞湖。冰川湖是由冰川的挖蚀和冰碛物的堆积而形成的，主要分布在我国西部一些高海拔的山区。例如，西藏南部多庆错属于前者；藏东布冲错属后者。岩溶湖多由地表易溶性碳酸盐类岩层经溶蚀塌陷而形成，多分布在我国岩溶地貌发育比较典型的西南地区，其中以贵州草海最有名。风成湖是沙漠地区的沙丘受定向风的吹蚀所形成的洼地或沙丘间洼地，经潜水汇集形成，主要分布在巴丹吉林、腾格里、乌兰布和等沙漠和毛乌素、科尔沁、浑善达克、呼伦贝尔等沙地地区，并多以小型时令湖形式出现。沿海平原低地，由于沿岸带的泥沙运动和海面波动，在河口、三角洲的海岸沙堤不断发展扩大的条件下使古代的海湾演变为湖，并进一步发展，与海洋完全隔离，逐渐演变成淡水湖，这类湖泊集中分布在我国东部沿海地带，如杭州的西湖、宁波的东钱湖、天津沿海的七里海和团泊洼等。还有一类是由河床摆动残留的牛轭湖或随河流天然堤伴生的河间洼地湖等，这类湖泊大多分布在我国大江大河沿岸的平原低地。可见，不同成因类型的湖泊分布或多或少都表现出区域的特色，但实际上在自然界，湖泊形成一般都具有多因素混成的特点。例如，长江中下游五大淡水湖，其湖盆的形成既有地质构造的沉陷背景，但同时又与江、河、海的作用有着

千丝万缕的联系，而且目前之所以保留一定面积的湖面，实际上是因为还与沿袭老构造的新构造运动继续活动，以及区域气候有关（王苏民和窦鸿身，1998）。

1.1.2 基于湖泊营养水平的分类

前文从地质学、地理学的观点概括地论述了湖泊的成因分类。本节拟根据湖泊沉积学原理（霍坎松和杨松，1992）详细阐述的营养水平分类，讨论另一种有关湖泊营养水平的分类方案，进而分析湖泊的成因。

1. 贫营养湖

贫营养湖的特征是：初始生产力低，水的透明度高，藻类容量小，营养元素磷、氮浓度较低，鱼群以大马哈鱼和白鱼等种属占优势。此外，仍需指出，在贫营养湖与富营养湖之间，存在着连续的而不是断续的关系。“中营养”一词，往往用以定义这两种关系的过渡区。

2. 富营养湖

凡湖水中的氮、磷浓度高，含大量的叶绿素，而且透明度低、生产力高的湖泊，称为富营养湖。该类湖泊一般以河鲈和淡水鱼为主要鱼种。

3. 无营养湖

无营养湖也称外营养湖，指接受大量异地来源的有机质输入物的湖泊，通常称为“褐水湖”或“白兰地酒湖”，腐殖质含量高。这类湖泊自身的生产力通常低下。

1.1.3 基于湖水分层的分类

由于水的密度随温度变化的规律非常特别，在湖水 4°C 时密度最大，所以湖水热分层是有关时空变化概念的一种非常有趣的平衡作用。典型情况下，较冷而重的水在湖底（称湖下层）中间有一个湖中层，而较暖而轻的水在湖面，称湖上层。但是这种分层格局可以倒置过来，并且以许多不同的方式交换。瑞典一个典型的温度分层湖泊，夏季时暖水层在冷水之上；春秋季节湖水发生循环而呈等温状态；到冬季时逆分层，湖上层比湖下层冷。按温度分层情况，湖泊可分如下 6 种类型。

1. 无循环湖（永冻湖）

湖水常年结冰，从不循环。这在地球南北两极最多。湖水的加热主要靠阳光穿透冰层的热辐射，以及从湖底穿过沉积层的地下热源。这类湖泊有特殊的逆分层现象。

2. 冷单循环湖

湖水温度从来上升不到 4°C 以上，只有一个循环季节（夏季）。分布限于寒冷地区和高海拔地区，常常与冰川和永久冻土带相伴。