

32-39,
图版 2页川西北岷山灰岩区喀斯特堰塞湖
形成中的生物作用

张捷

P 931.7

(南京大学大地海洋科学系, 南京 210008)

提要 川西北岷山灰岩区内的喀斯特堰塞湖是一种特殊的湖泊地貌类型,它是在一定的地质地貌条件及水化学条件下由生物作用参与并促进生物型灰华的快速沉积并堰塞河道而成。野外沉积构造和湖泊形态观察、水化学分析及室内对灰华体的光学显微镜和扫描电镜的观察结果表明,生物作用以多种方式存在着。多种生物(苔藓、藻类、藓草丛等)在生物型灰华堰塞的形成(也即喀斯特堰塞湖的形成)过程中的不同生物作用(包括同化作用、拦截作用、毛管作用、捕获粘结作用及构架作用)贯穿于灰华沉积的复杂循环过程之中。

关键词 喀斯特堰塞湖, 石灰华 生物作用 川西北

石灰岩地区通常形成各种地表、地下的溶蚀型喀斯特湖,但也可以由地表喀斯特沉积作用形成喀斯特堰塞湖。Gregory(1911)在研究了南斯拉夫 Plitvice 的地表喀斯特沉积(该区有大量喀斯特堰塞湖)后首先提出了“建设性瀑布”(Constructive Waterfalls)这一术语^[1]。近年来国际上有关地表喀斯特沉积作用及其形成的地貌(包括堰塞湖)的研究颇不少见(Emeis, et al, 1987; Viles & Goudie, 1989; Ford, 1989)^[2-4]。我国四川西北部岷山山脉境内石灰岩分布区内,也分布着这类特殊的湖泊类型——喀斯特堰塞湖,其中南坪县九寨沟和松潘县二道海两处较为典型。九寨沟风景区是我国第一个以保护自然风景为主体的自然保护区,流域纵深 60 余 km,面积 650km²,区内一百多个海子(湖泊)是其自然风景的主要组成部分。二道海地区也有众多湖泊。关于这些湖泊的成因,尤其是九寨沟的湖泊,已经引起了许多研究者的兴趣,有的认为是冰碛堰塞而成的,有的认为是石灰华堰塞而成,还有的认为是其它地质过程(地震、滑坡等)的产物^[5-8]。本文拟通过野外及室内观察分析并综合已有成果,就川西北岷山灰岩区内湖泊的主要类型——喀斯特堰塞湖的形成、演化及其景观特征以及其中生物作用的性质进行初步探讨。

一、川西北石灰岩区的地质地貌背景

川西北岷山境内的灰岩区,在地貌区划上属于四川省西部高山高原区川西北丘状高原

一山地区的岷山—邛崃山高山区^[9]。地貌类型宏观上以高山深切河谷为主,现存的各类湖泊则散布于这种河谷之中。岷山境内灰岩区的碳酸盐岩地层厚度可以很大,如九寨沟内自中泥盆统一下二迭统地层中灰岩地层的累计总厚度可达 2617m 左右,是喀斯特作用的良好基础。岷山地区由于多种地貌作用(河流、重力崩塌、泥石流及第四纪冰川作用)的存在,可形成不同成因的湖泊。九寨沟内湖泊多达 100 多个,散布于海拔 2130—3100m 以上的河谷中。其湖泊类型有喀斯特型与非喀斯特型之分。非喀斯特湖泊的湖盆形成主要是由冰川、滑坡崩塌及泥石流等作用所致(如九寨沟内的长海、仙女池、上季节海等),然而尽管这些湖泊的形成是非喀斯特的,但目前仍有喀斯特作用的痕迹^①。而区内喀斯特型湖泊则主要是由于石灰华堰塞河道而成的,九寨沟内主要风景区的湖泊群即是,二道海的湖泊群也然。

二、川西北灰岩区生物型灰华沉积与喀斯特堰塞湖的形成

研究区内的喀斯特堰塞湖是一种在深切峡谷中由于多种因素包括地貌、气候、生物等因素促使石灰华大量沉积并堰塞河道而形成的梯级状湖泊群。其形成的关键因子是地表河流中的石灰华的沉积加积作用。

石灰华是喀斯特地区从河水、湖水或泉水等水体中在一定的物理、化学及生物条件下沉淀析出的碳酸钙沉积。主要包括具有生物构造的多孔状较疏松的生物型灰华(Tufa)和致密、多具良好结晶并成层的结晶型灰华(Travertine)两类。前者以生物参与为特征,后者以无机化学成因为主^[8]。其中生物灰华的快速堆积在河道上可形成包括堰塞湖在内的各种建设性地貌。就岷山地区的石灰华沉积而言,也可见两类:一种是以生物型灰华为主体的,如九寨沟,该区内大多数湖泊群(诺日朗群海、树正群海、火花海、卧龙海等)都是因河道中生物型灰华快速沉积而形成的喀斯特堰塞湖(群);另一类则以致密成层结晶的结晶型灰华为主形成地表边石坝(Rimstones)及相应的小规模积水盆(Step pools),其形成过程取决于地形、水化学及水动力条件,如黄龙寺。本文主要研究第一类。

石灰华堰塞湖通常具有建设性地貌的独特形态及其组合特征。一般说是形成灰华堤堰(灰华坝)或灰华陡坎,前缘(下游)常可有跌水或瀑布,后部为堰塞湖,湖水深度一般以原始河床为下限,也即与灰华堤堰的高度相当。兹将九寨沟内的一些实例列出(表 1)。石灰华堰塞湖的另一个特征是它们在河谷中常成群出现,形成梯级状湖群(当地人称群海)。这是因为河水中水化学性质的变化在无支流汇入的情况下通常是渐变的,一旦达到适宜于灰华沉积的状态时,将会持续一定的距离。这种湖泊群在平面形态组合、剖面物质组成及构造上是有别于其它非喀斯特作用的产物^[8]。

大规模石灰华沉积及相应的喀斯特堰塞湖的形成是有一定的水化学条件的,这是一个涉及到地表水体中 $\text{CaCO}_3\text{—CO}_2\text{—H}_2\text{O}$ 体系的平衡及 CaCO_3 沉淀结晶动力学问题的复杂过程。饱和指数(Saturate Index)是确定水体饱和状态的一个指标,对于 CaCO_3 而言,其饱

① 张 捷. 九寨沟地区喀斯特特征及成因分析(南京大学硕士论文), 1987.

和指数 SIC (Saturate Index of Calcite) 取决于水体的 pH 值、温度、 P_{CO_2} (CO_2 分压) 及各种离子的活度。九寨沟地区石灰华沉积地段及南斯拉夫经典灰华堰塞湖区的水化学特征(表 2) 表明, 两区都显示出水流在经过灰华沉积区段后 pH 值和饱和指数(SIC)的明显降低, 而两区的这种灰华沉积区段均为跌水或小瀑布式的灰华堤堰(由生物型灰华组成)。九寨沟的水化学成分表明在沉积区段, 从上游到下游, 水体中 HCO_3^- 、 Ca^{++} 、硬度明显降低, 而 Mg^{++} 则不一定。

表 1 九寨沟内某些灰华堰塞湖的形态数据

Tab. 1 Morphological Data of Some tufa-dammed Lakes in Jiuzhaigou District

湖 名		诺日朗群海 (阿珠槽)	火花海	金玲海	卧龙海
海 拔(m)		2420	2170	2480	2380
深 度	均深(m)	17	15.5	18	12
	最深(m)	22	21.5	24	23
前缘瀑布或跌水		诺日朗瀑布	杏五湖瀑布	珍珠滩瀑布	
均 高(m)		18	13	18	

表 2 九寨沟和 Plitvice 公园*两处的喀斯特堰塞湖的水化学特征比较

Tab. 2 Hydrochemical Characters of Karst Dammed-lakes in Jiuzhaigou and Plitvice

(Data of Plitvice from Emeis, et al., 1987)

地 区	湖名及采样点	海拔 (m)	pH	SIC	硬度 (德)	HCO_3^- (mg/L)	Ca^{++} (mg/L)	Mg^{++} (mg/L)	备 注
九寨沟区 (夏季)	箭竹海	2620	8.40	0.76	10.57	208.07	56.69	11.47	两湖间有灰华堤堰若干, 小海子(湖)14个。
	熊猫海	2600	8.31	0.62	9.79	195.36	54.23	9.47	
	镜 海	2380	8.50	0.88	10.49	201.14	53.82	12.71	镜海下游至诺日朗瀑布有
	诺日朗瀑布	2360	8.45	0.70	9.79	190.73	47.24	13.71	诺日朗群海, 共 18 个。
	树正瀑布(上)	2330	8.50	0.80	9.79	191.89	47.66	13.46	树正瀑布为多级跌水, 有大量灰华沉积。
	树正瀑布(下)	2315	8.36	0.61	9.59	184.95	43.96	14.96	
		火花海	2170				180.35	50.12	10.47
Plitvice 中游湖群	S113	637	8.40	0.90	备注: 从上游湖泊群到下游湖泊, 有多级灰华堤堰及湖泊, 水流从上游至下游, SIC 降低, pH 值降低, 石灰华发生沉积, 其中植物吸收 CO_2 作用明显。				
	S114	613	8.40	0.80					
	S115	579	8.35	0.78					
	S116	552	8.36	0.77					
	S117	535	8.35	0.72					

* 原南斯拉夫 Plitvice 公园区数据资料, 据 Emeis 等, 1987^[2]。

川西北岷山灰岩区的灰华沉积也是有着一定的地质地貌条件的, 其物质来源主要来自区内各种喀斯特泉, 包括包气带泉及浅层和深层饱水带泉^[10]。二道海的灰华沉积区的上

游源头为温泉,泉口沉积了特殊的蜂窝状灰华(国外称 Foam Rock)。区内沉积物质(Ca^{++} 、 Mg^{++} 离子)的一部分无疑也来自于区内现代喀斯特溶蚀作用。据研究,区内不仅发育了梳状溶痕(Rillenkarren)等现代溶蚀形态^[9],生物作用如地衣、藻类等也形成了其独特的亚超微溶蚀形态^[11]。这些溶蚀形态的形成过程中产生的溶解物质可以通过地表及地下(主要是包气带泉)输送入河流中。宏观上分析,地形上的高海拔、深切割也是石灰华沉积的有利条件^[8]。

三、喀斯特堰塞湖形成过程中的生物作用

上文已述,九寨沟等地的喀斯特堰塞湖主要是生物型灰华快速沉积所致,尽管其中的生物作用已为人们所注意^[6-8,10,12],然而各种不同生物在区内石灰华沉积中究竟起何种作用?其作用产物为何?有何证据?以及各种生物在喀斯特堰塞湖形成过程的不同阶段中所起的作用如何?这仍然需要进一步的讨论。

事实上,区内喀斯特堰塞湖形成过程中生物作用的研究,也就是关于生物型灰华沉积体在河道中形成过程中的生物作用的研究。生物型灰华沉积过程中通常有苔藓类、藻类、灌草丛以及细菌等生物参与。

1. 形态观察

生物型灰华的形态特征包括沉积构造、沉积结构及结晶性质以及微观形态等方面,各种生物作用常可留下独自的特征,川西北生物型灰华中参与的生物有多种。

(1)灌丛、草丛 灌丛、草丛通常可以通过被动促进过程来影响灰华沉积,可以改变水动力条件而导致灰华沉积^[11]。野外可见由于它们的存在而在迎水面形成障碍华(图版1),这种障碍华可以附生于树干基部;树枝、草丛和倒木等可为灰华沉积体的组成部分,如二道海、黄龙寺,可见树枝、树叶被 CaCO_3 结壳包裹。

(2)苔藓 苔藓类对灰华沉积过程起着重要作用,不同苔藓在不同的水流环境下可以形成不同性质的石灰华^[13],其沉积速率也可不同^[14],从 1—30mm/a。而在西班牙的研究表明,这种苔藓作用灰华沉积速率可超过 14cm/a^[15]。川西北石灰华沉积中苔藓作用十分明显。苔藓体表面可以形成 CaCO_3 结壳(图版2),灰华体经磨片观察可见特殊的苔藓成因的岩石构造(图版3)。九寨沟生物型灰华沉积中,苔藓类在瀑崖前缘可形成特殊的沉积构造(图版4),这是一种在建设性瀑布向前推移(瀑布前缘石灰华加积)中,由苔藓参与而形成的生物复合层理构造,其底层是为苔藓类结壳的管状灰华体(界面为泥晶层),前部为基本与层面垂直的管状灰华集合体,因生长时受水流冲击所致,层理顶层(最前缘)逐渐向下弯曲。据样本显微镜观察,九寨沟苔藓灰华结壳类型可有三种^①(表3)。

(3)藻类 可溶岩区内,一些藻类(主要是某些蓝藻、绿藻)对可溶岩起溶蚀、侵蚀作用,而另一些则参与了碳酸钙的沉积过程。石灰华沉积过程中藻类作用方式主要有结壳作用、分泌作用、同化作用、捕获粘结作用。川西北灰华沉积中,丝状蓝藻胶须藻(*Rivularia* sp.)可形

① 张捷,生物喀斯特微形态研究,南京大学博士论文,1990。

成特殊的内部构造。通过扫描电镜观察,多种硅藻如小环藻属(*Cyclotella*)、舟形藻科(*Naviculaceae*)、异极藻科(*Gomphonemaceae*)、桥弯藻科(*Cymbellaceae*)以及某种球形蓝藻,可与方解石晶粒相嵌生;硅藻甚至可在灰华表面形成群落而覆盖灰华表面(图版5)。同时灰华中尚可见藻类分泌的粘液有机质(图版6)。通常藻类个体着生于苔藓类(或者其结壳体)表面。此外,川西北灰华沉积中尚可见轮藻门(*Charophyta*)残体所形成的灰华构造(图版7)。

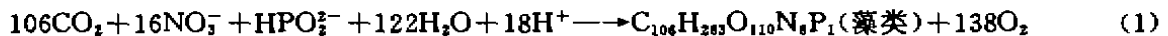
表3 九寨沟苔藓灰华结壳类型及其特征

Tab. 3 Types of Moss Encrustation in Jiuzhaigou District

结壳类型	苔藓形体	水流性质	地貌部位	粘土含量估计
粉末状泥晶	基本保存	紊流、激流	瀑崖、溪流	较多
膜状结晶	基本保存	层流、渗滴水	灰华洞穴渗水处	极少
似瓣状晶	不清晰,由晶体体现	扰动较小之水体	滩面浅水潭等	较少

2. 生物作用机制

生物对灰华沉积的促进作用机制具有普遍性的是各种生物对水体中 CO_2 的同化作用(Assimilation),这一过程在植物体内则为光合作用。湖水中藻类作用对 CaCO_3 的沉淀起着重大影响,Stumm 等^[16]提出了有关藻类光合作用(即同化作用)的近似计量化学方程:



吴庆果在实验室内利用 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 饱和溶液进行密封条件下藻类培养的实验,可以产生 CaCO_3 沉淀^[17]。虽然这还与自然界的开放流动水体环境相差较大,但仍是藻类促进作用的有力证明。一般认为,大气中 CO_2 与水体的交换平衡是一个较慢的反应过程,故湖中光合作用活跃时期,短期内 CO_2 的耗尽可使湖泊达到饱和而沉积方解石;开阔湖面微生物(植物)的季节性繁殖可以引起方解石大量沉淀,由于浮游植物(如藻类)中特定种属的旺盛生长期可能十分短暂^[18],因而由植物同化作用导致的灰华沉积也是季节性的,甚至与同化作用一样可具有日变化。这种季节性变化正是九寨沟水化学性质(SIC)值的夏季值(表2)与冬季值(如诺日朗为-0.16,树正为0.19)^[19]差异的主要原因之一。藻类还具有其它作用形式,其中捕获粘结作用是由藻丝及其分泌粘液对悬移质方解石微晶拦截捕获粘结导致灰华沉积的一种作用,它对于淡水碳酸盐沉积,如湖泊、河流中的灰华及藻微礁(一种湖相菜花状 CaCO_3 沉积)的形成起着重要作用^[19,20]。九寨沟诺日朗水中尚可见到由胶须藻属(*Rivularia*)捕获粘结作用所形成的泥晶灰华,镜下薄片观察可见具有保留藻丝特殊形态的结构。

各种藻类的同化作用确实不可低估,但水生苔藓类也十分重要。九寨沟高瀑布上游河道两侧水生苔藓体中可见其活体叶面及丛枝间有明显的方解石泥晶结壳现象,主要是因同化作用导致了灰华沉积区段水体 HCO_3^- 的降低(表2)。苔藓类在灰华沉积中所起的作用还可有毛管作用、拦截作用(与捕获作用相类)等。毛管作用是一种辅助作用,通过苔藓体的毛管作用输送含有 CaCO_3 的水体到表面并扩大其 CO_2 散逸面而形成 CaCO_3 沉淀。

构架作用是苔藓类及藻类乃至草丛等植物所共有的另一种作用(Shoring effect),它是形成灰华小尺度乃至微观上的孔隙的一种作用,在此过程中,植物体本身作为灰华沉积的重

要组分(杂质)而又同时作为方解石淀积依附的骨架起支撑作用,其中包括物理和化学两种过程。藻类及其粘液可以起构架作用并在微观形态上有所表现(图版 6)。

3. 石灰华堰塞湖形成过程中生物作用的循环模式

通过川西北喀斯特堰塞湖(即石灰华堰塞湖)区不同部位的石灰华沉积体中生物作用的观察,发现不同生物作用机制可以在石灰华堰塞湖或堤堰状灰华沉积体的形成过程中的多个阶段出现,并且这种有生物作用参与的形成过程是一个循环过程或正反馈过程(图 1)。这一循环过程可以归纳为几个基本过程:

(1)河道浅水部位或天然障碍、浅水滩等的浅水部位存在,这在山区河道中较为常见。据研究,山区河道(松散堆积河床)可由于河流自身水动力作用形成漫流坝及梯级状积水池^[81];

(2)水生苔藓类及草丛等在上述适宜部位着生;

(3)由于局部同化作用在苔藓类表面形成结壳,同时水体中的表生藻类(硅藻等)在苔藓类活体表面或其结壳表面着生(图版 2),并可起捕获粘结作用(导致悬移质 CaCO_3 颗粒沉积),从而形成由苔藓枝体为基质的管状灰华体;

(4)管状灰华体及苔藓类的拦截作用、毛管作用、构架作用等多种作用下继续沉积 CaCO_3 , 逐渐形成灰华沉积体的雏形。在此过程中,水体中 CaCO_3 可在已有的方解石晶核上继续沉淀结晶,基部孔隙逐渐为 CaCO_3 充填;由于(2)、(3)过程及本过程可以在水面附近迅速进行,因此促使形成水中灰华沉积体的加高;

(5)灌丛乃至小乔木在灰华体上着生,拦截河水中包括 CaCO_3 微晶、粘土矿物等悬移物质。其根系起固定松散灰华体的作用,此时灰华堤堰初步形成。

在上述过程中,(4)、(5)过程的产物可以成为(2)过程的前提而构成循环,同时(3)过程内部也可以重复进行。

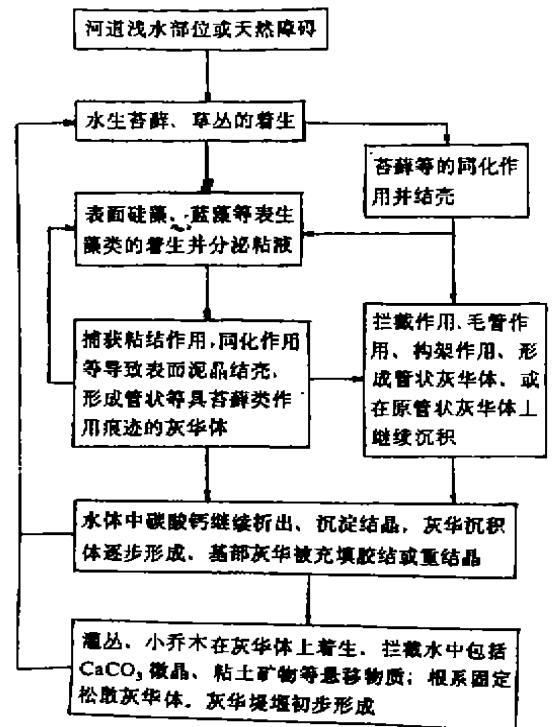


图 1 石灰华堰塞湖(河道灰华堤堰)的形成及生物作用的循环图式

Fig. 1 Formative bio-effects on the cycle of developing process of tufa dammed-lake

四、结 束 语

川西北岷山灰岩区内的喀斯特堰塞湖是一种特殊的湖泊地貌类型,它是在一定的地质地貌和水化学条件下由生物作用参与并促进生物型灰华的快速沉积并堰塞河道而成。多种

生物(苔藓、藻类、灌草丛等)的多种作用(同化作用、拦截作用、毛管作用、捕获粘结作用及构架作用)参与的生物型灰华堤堰的形成(即喀斯特堰塞湖的形成)过程是一个复杂的循环过程。最后值得一提的是,生物的存在也影响着这些湖泊的色彩性质^[22]。

笔者野外工作曾得到唐邦兴研究员、柳素清老师、王富葆教授及周寅康、施振斌同志的帮助,撰写过程中还曾得到林承坤教授、陈赐同志的帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Gregory, J. W. , Constructive Waterfalls, *Scottish Geographer* , 1911, 13, 537—546.
- [2] Emeis, K. C. , Richnow, H. H. and Kempe, S. , Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia, *Chemical versus biological control*, *Sedimentology* , 1987, 34, 595—609.
- [3] Viles, H. A. & Agouidie, A. S. , Tufas, travertines and allied carbonate deposits, *Progress in Physical Geography* , 1989, 14(1), 19—41.
- [4] Ford, T. D. , Tufa—the Whole Dam Story. *Cave Science* , 1989, 16(2), 39—48.
- [5] 吕儒仁、康志成。九寨沟自然环境特点及海子成因初探。自然杂志, 1985, 9(3)。
- [6] 朱德浩。九寨沟风景区和南斯拉夫普利特维采公园之比较。大自然探索, 1986, 5(16), 113—118。
- [7] 郭卫星。川西北自然风光中钙华景观的形成与发育。山地研究, 1988, 6(1)。
- [8] 张 捷。九寨沟地区喀斯特特征的初步研究。地理, 1989, 2(3), 35—41。
- [9] 西南师范学院地理系。四川地理。西南师范学院学报, 1982。
- [10] 朱学稳、周绪伦。岷山岩溶区的灰华沉积。中国岩溶, 1990, 9(3), 250—263。
- [11] 张 捷、李升峰、陈舒泛。石灰岩表面溶孔的初步研究。中国岩溶, 1991, 10(2), 151—160。
- [12] 周寅康。九寨沟钙华成因研究。地理, 1989, 2(3), 42—48。
- [13] Pentecost, A. and Lord, T. , Postglacial tufas and travertines from the Craven District of Yorkshire. *Cave Science*. 1988, 15(1), 15—19.
- [14] Pentecost, A. , Some observation on the Malham Tarn District, North Yorkshire. *Field Studies* , 1987, 5, 365—387.
- [15] Weijermars, R. et al, Growth rate observation from the moss-built Checa travertine terrace, Central Spain *Geological Magazine* , 1986, 123, 279—286.
- [16] 莱尔曼主编, 王苏民等译。湖泊的化学、地质学和物理学。北京, 地质出版社, 1978, 313—314。
- [17] 吴庆余。藻类生物与自然界 CO₂ 循环的生物地球化学。大自然探索, 1987, 6(3), 43—47。
- [18] 同[16], 314—315。
- [19] Schneider, J. , Carbonate construction and decomposition by epilithic and endolithic microorganisms in salt and freshwater. In: *Fossil algae* (Ed. by Flogel, E.), Springer-Verlag, Berlin, 1977, 248—260.
- [20] Schneider, J. et al, Algal micro-reefs—Coated Grains from freshwater environment. In: *Coated Grains* (Ed. by Peeryt, T. M.), Springer-Verlag, Berlin, 1983, 284—298.
- [21] Chin, A. , Step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography*, 1989, 13(3), 391—407.
- [22] 张 捷。九寨沟湖泊色彩的初步研究。地理, 1989, 2(3), 55—61。

ON BIO-EFFECTS ON THE DEVELOPMENT OF KARST DAMMED LAKES IN LIMESTONE AREAS, MINSHAN MOUNTAIN RANGE, NW SICHUAN

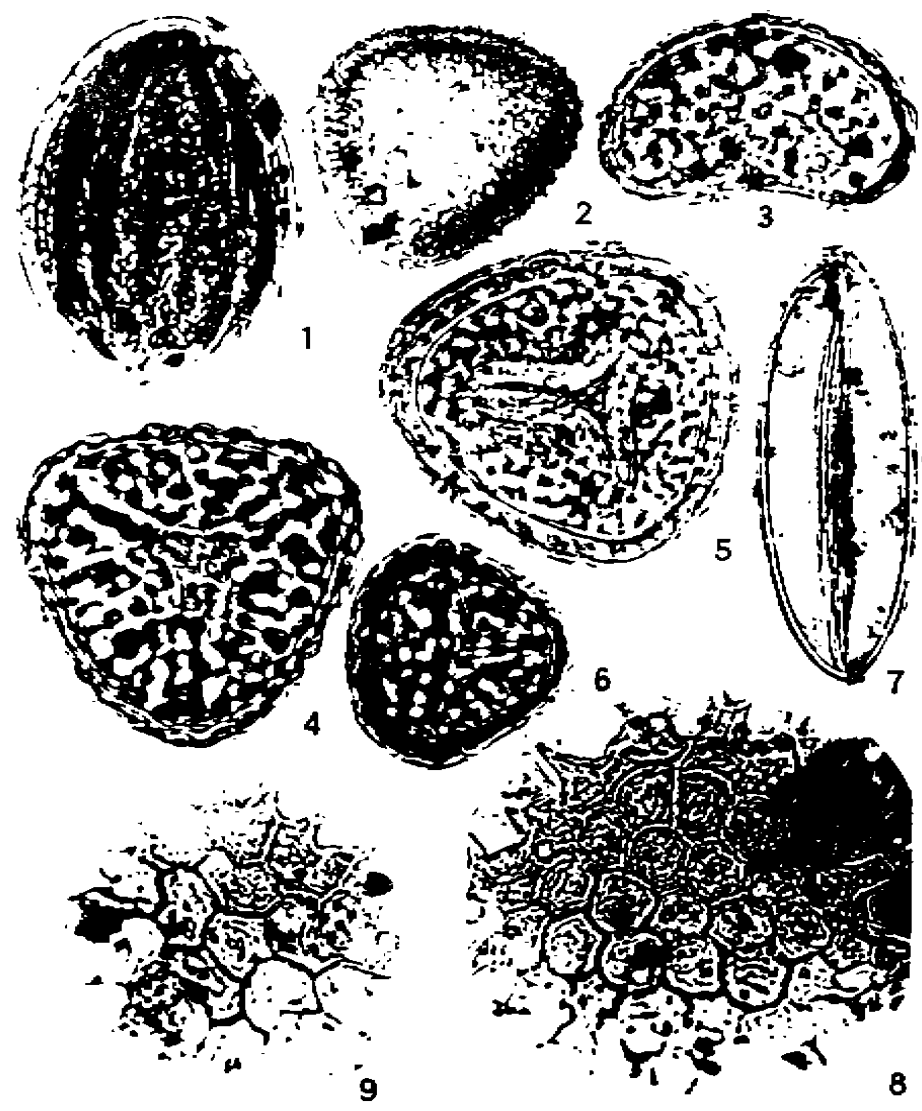
Zhang Jie

(Dept. of Geo and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract

The karst dammed lakes in limestone area of Minshan Mountain Range, NW Sichuan, belong to a special kind of lake morphology. They developed and were formed under certain geological, geomorphological and hydrochemical conditions with bio-effects as result of rapid tufa dam gradation in stream channel. With field observation on the sedimental structure, lake morphology and water chemistry as well as optical & Scanning Electronic Microscopic observation on tufa samples from the research area, various kinds of bio-effects have been identified to exist in the process of tufa dam formation. It is shown in the general cycle model proposed in this paper that many organisms (mosses, algae and bushes etc.) with various effects (assimilation, interception, capillary effect, trapping & binding, and shoring effect) on tufa deposition play an important role throughout the compound cycle process of tufa dam gradation (i. e. the formation of karst dammed lakes) in the stream channels in the research areas.

Key words karst dammed lakes, tufas, bio-effects, NW sichuan



1. 麻黄粉, 2. 双盾木, 3. 水龙骨科, 4-6. 金粉蕨, 7. 水绵, 8. 单棘盘星蕨, 9. 短棘盘星蕨

1. *Ephedripites* sp. 2. *Dipelta* sp. 3. *Polypodiaceae* 4-6. *Onychium* sp.
 7. *Spirogyra* sp. 8. *Pediastrum simplex* 9. *P. boryanum*