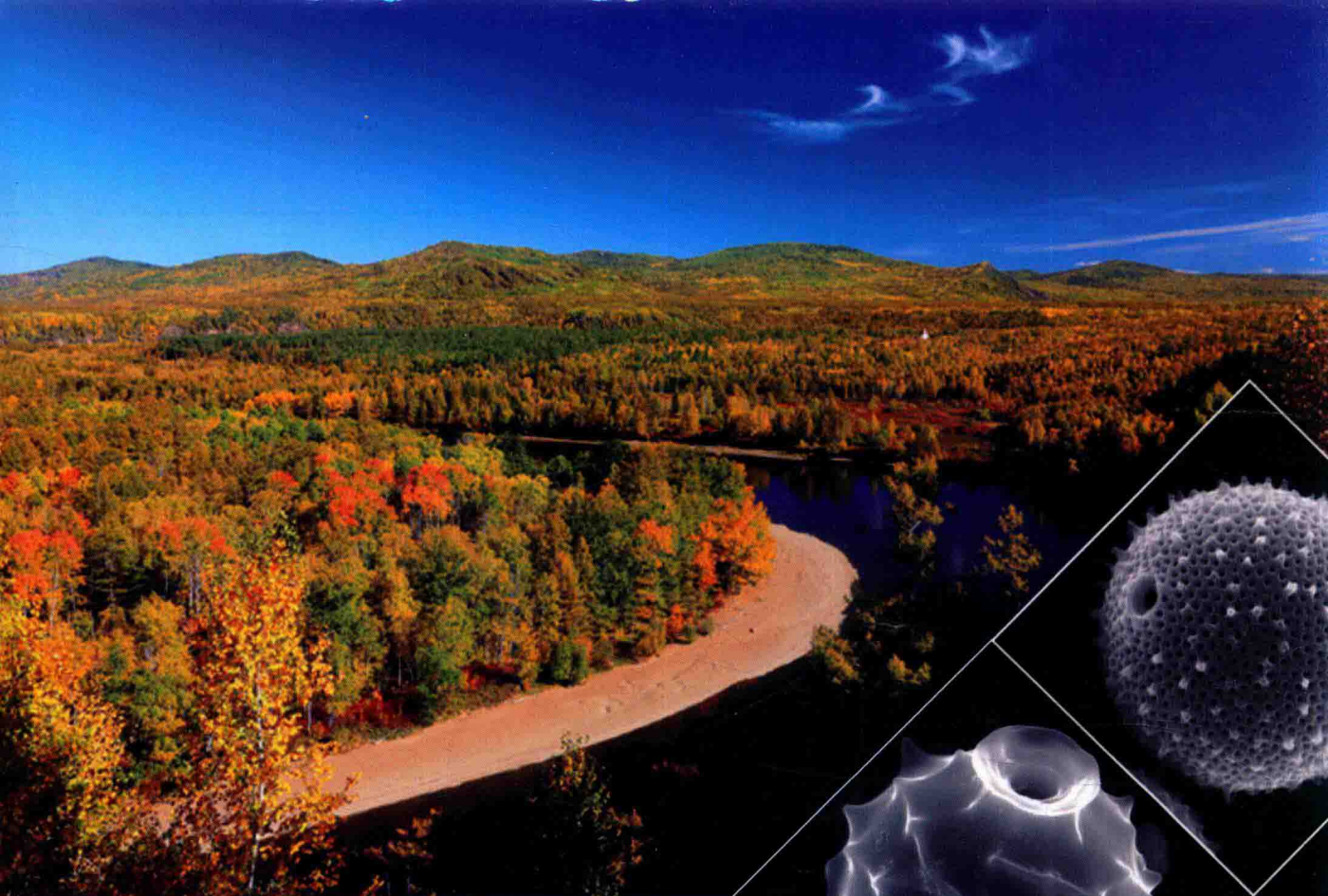




大兴安岭 金藻孢囊图集

**Chrysophycean Stomatocysts
from the Da Hinggan Mountains**

庞婉婷 王全喜 编著



科学出版社

国家自然科学基金项目 大兴安岭沼泽金藻孢囊分类学研究 (31070181) 资助
锥囊藻科金藻分类及孢囊研究 (31300170)

大兴安岭 金藻孢囊图集

Chrysophycean Stomatocysts from the Da Hinggan Mountains

庞婉婷 王全喜 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

大兴安岭地区是我国纬度最高的地区,植被覆盖率高,淡水资源丰富,气候寒冷湿润,人为干扰相对较少,沼泽类型多样,多为酸性沼泽,适合金藻生长。本书利用扫描电子显微镜(SEM)对采自大兴安岭地区的金藻孢囊进行显微观察和拍照,依据国际静孢子工作组(ISWG)1986年颁布的数字命名法以及 Cronberg & Sandgren (1986)、Duff *et al.* (1995)、Wilkinson *et al.* (2001) 的描述和分类方法,对金藻孢囊进行了形态研究,共发现 205 种金藻孢囊,其中 33 种为新形态型。并对每一种金藻孢囊形态、地理分布、生境等进行了详细的中英文描述,并提供扫描电子显微镜照片。本书为中国金藻孢囊的研究奠定了基础,为世界金藻和金藻孢囊的研究及其在环境中的应用积累重要资料。

本书可供古生态及藻类分类研究人员学习使用,也可作为生物、农林、地质、古生物等相关专业的高校师生及科研院所的专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大兴安岭金藻孢囊图集/庞婉婷,王全喜编著. —北京:科学出版社,2017.5

ISBN 978-7-03-052455-3

I. ①大… II. ①庞… ②王… III. ①大兴安岭—金藻门—图集
IV. ①Q949.26-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第068637号

责任编辑:陈 露

责任印制:谭宏宇/封面设计:殷 靓

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>

苏州越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年5月第一次印刷 印张:16 1/4 插页:2

字数:370 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

当我拿到本书的校样稿的时候，忽然觉得应该写点什么，应该介绍一下这项工作的过程，感谢为此项工作付出劳动和智慧的人们，就作为本书的序吧。

早在 1990 年在南京大学参加第六次全国藻类学会期间，中国地质科学院地质研究所的李家英研究员在会上说：“你们研究藻类分类的人，能否研究一下金藻孢囊的分类，我们在南极考察时，地质样品中发现大量的金藻孢囊，不知道如何处理，……”。我当时作了一个囊裸藻的分类报告，囊裸藻的形状很像金藻孢囊，引起了李家英研究员的这番话。从那时起，我牢牢地记住了李家英研究员的话，很想有机会做这方面的研究。

在以后的大兴安岭藻类研究过程中，发现在制作好的硅藻封片中，也夹杂着许多的金藻孢囊。但是如何研究它，国内未有任何相关的文献和书籍，无处下手。

2007 年，我去英国访问大英自然历史博物馆 (Natural History Museum) 时，在那里我看到了 *Atlas of Chrysophycean Cysts II* 一书，得知加拿大女王大学 (Queen's University) John P. Smol 教授实验室在该领域做了大量的工作。2009 年 4 月，我和曹同教授等到 Smol 教授的实验室访问，受到了他的热情接待，他给我们介绍了相关的研究过程和方法，给了我们许多相关的资料，为我们开展这项研究奠定了基础。

当我掌握了相关的资料和标本时，希望有一位有兴趣的年轻人愿意开展此项工作。恰在这时，庞婉婷同学来找我，想来攻读博士学位，我给她讲了该项目的思路，她非常有兴趣。2009 年，她考上了华东师大王幼芳教授的博士，我们联合培养，展开了该项目的研究。2010 年，我申报的“大兴安岭沼泽金藻孢囊分类学研究”获得了国家自然科学基金的资助，为本项目的研究提供了资金保障。

我们经历了 7 年的研究工作，先后 7 次去大兴安岭进行标本采集，到了 8 个地区，200 多个采样点，采集标本 1 000 余号；为获得孢囊发育的照片，我们曾将显微镜带到阿尔山兴安林场现场拍照；由于金藻孢囊个体比较小，细微结构必需在电子显微镜下观察才能看到，本书采用的照片也全部是扫描电子显微镜下拍摄的照片。

庞婉婷博士在完成她的博士学位论文以后，经过几年的整理和补充实验，完成了本书的写作。本书共记录了 210 种金藻孢囊形态，有 167 种是发现在中国的新形态，其中

32 种是属于本书第一次发表的新形态, 为中国金藻孢囊研究提供了主要依据, 也为世界金藻孢囊研究提供重要资料。

虽然本书的内容仍采用了国际上现在沿用的数字编号方法命名, 但是这种命名方式也带来许多的不便。目前国际上用孢囊编号加命名人的方式已记录了 1 000 多种孢囊形态, 名称的写作形式和编号标准很不统一, 随着金藻孢囊形态数量的增加, 人们已经很难判断每个数字所代表的形态特征, 学者们也认识到现在这种命名方法的弊病, 在捷克 (2012) 和日本 (2016) 两次国际金藻会议上都提出了对金藻孢囊命名方法的修改建议, 但是尚未有人提出令人满意的方法, 只好仍然沿用现行方法。我们也将努力在未来的研究中, 提出一套更合适的金藻孢囊命名方法, 为金藻孢囊的研究做出我们的贡献。

由于这是国内第一本有关金藻孢囊的著作, 许多术语、形态描述等都没有更多的中文著作可以参考, 再加上我们的水平有限, 书中错误在所难免, 敬请各位读者批评指正。

在此书出版之际, 我们衷心地感谢华东师范大学王幼芳教授为此项工作给予的指导和帮助, 感谢她曾一起和我们去阿尔山采集标本; 感谢她在庞婉婷博士期间给予的指导和支持; 感谢她多年来对我们各方面的帮助!

感谢加拿大女王大学 John P. Smol 教授在项目开始时提供资料, 感谢他曾来本实验室对本研究给予的建议。

感谢曹建国、吴波、刘妍、刘琪、钦娜、房勇、李博、李晓菲等参加野外采集; 杨耐英在电镜观察中给予帮助。

感谢科学出版社陈露编辑对本书许多方面给予很好的建议和所付出的辛勤劳动。

感谢所有为本项目开展和本书出版做出贡献的人!

最后要衷心地感谢国家自然科学基金项目“大兴安岭沼泽金藻孢囊分类学研究 (31070181)”、“锥囊藻科金藻分类及孢囊研究 (31300170)”的资助和支持。



2017 年 3 月于上海师范大学

目 录

>>> 第 1 章 前 言 / 1

- 1.1 金藻及金藻孢囊简介 / 1
- 1.2 金藻孢囊的研究概况 / 2
 - 1.2.1 金藻孢囊的命名与分类 / 2
 - 1.2.2 金藻孢囊的形成和萌发 / 3
 - 1.2.3 金藻孢囊的形态及研究方法 / 3
 - 1.2.4 金藻孢囊在环境研究中的应用 / 4
 - 1.2.5 金藻孢囊的分布 / 6
- 1.3 大兴安岭沼泽概况 / 7
- 1.4 本书的内容与目的 / 7

>>> 第 2 章 标本采集、处理及观察 / 9

- 2.1 标本采集时间及地点 / 9
- 2.2 标本采集方法 / 9
- 2.3 实验室标本处理 / 10
- 2.4 扫描电子显微镜的材料制备和观察 / 11

>>> 第 3 章 金藻孢囊的命名、描述术语和分类 / 12

- 3.1 金藻孢囊的命名 / 12
- 3.2 金藻孢囊的描述术语 / 12
- 3.3 金藻孢囊的分类 / 16

第4章

大兴安岭金藻孢囊的形态描述 / 17

4.1 表面光滑的金藻孢囊 / 17

4.1.1 表面光滑且无领的金藻孢囊 / 17

4.1.2 表面光滑且具柱状领的金藻孢囊 / 34

4.1.3 表面光滑且具锥状领的金藻孢囊 / 39

4.1.4 表面光滑且具倒锥状领的金藻孢囊 / 60

4.1.5 表面光滑且具长领的金藻孢囊 / 78

4.1.6 表面光滑且具宽领的金藻孢囊 / 83

4.1.7 表面光滑且具假复领及复领的金藻孢囊 / 87

4.2 表面具凸起纹饰的金藻孢囊 / 95

4.2.1 表面具痂状、疣状、锥状凸起的金藻孢囊 / 95

4.2.2 表面具瘤状凸起的金藻孢囊 / 118

4.2.3 表面具刺状凸起的金藻孢囊 / 121

4.2.4 表面具脊状及翅状凸起的金藻孢囊 / 180

4.2.5 表面具拟网状及网状凸起的金藻孢囊 / 201

4.3 表面具凹陷纹饰的金藻孢囊 / 221

4.3.1 表面具杯状凹陷的金藻孢囊 / 221

4.3.2 表面具沟槽状凹陷的金藻孢囊 / 228

4.4 表面具复合纹饰的金藻孢囊 / 230

参考文献 / 248

图版

第1章 前言

1.1 金藻及金藻孢囊简介

金藻 (chrysophyte) 是一类具鞭毛的单细胞藻类, 在淡水及海水中均有分布。因为胡萝卜素和岩藻黄素在其光合色素中占的比例较大, 所以整个植物常呈金黄色或黄褐色。金藻门植物大约有 1200 个种 (Kristiansen & Preisig, 2001), 其中大部分为单细胞或群体, 也存在变形虫状、胶群体、丝状、球粒形等其他形态。营养繁殖时, 单细胞种类以细胞分裂、群体种类以群体断裂或细胞从群体中脱离发育成一个新群体、丝状体种类以丝体断裂进行繁殖。无性生殖时, 不能运动的种类通过产生具单鞭毛或双鞭毛的动孢子 (swarmer) 来产生新的个体, 其他种类则在细胞膜内形成硅质的孢囊 (stomatocyst), 孢囊下沉至湖底部并可保持至萌发。金藻有性生殖时产生合子, 合子的壁为硅质, 与无性生殖产生的孢囊形态相同 (Sandgren, 1991)。

金藻孢囊, 也称静息孢子 (resting cyst)、休眠孢子 (statospore), 是金藻生活史中所特有的一个阶段。与其他类型的孢囊不同的是, 金藻孢囊是在细胞膜内

形成的。细胞内由高尔基小泡形成的硅质沉积囊 (SDV) 包裹住大部分的细胞质, 硅质沉积形成孢囊 (Hibberd, 1977; Sandgren, 1980)。金藻孢囊通常为球形, 直径为 2~30 μm 或以上, 有一个孔, 孢囊成熟后孔被硅质或半硅质胶塞封住, 孔的表面有时具有领, 孢囊表面有一些不同类型的纹饰。孢囊的初生壁通常薄而光滑 (Sandgren, 1989)。通过对一些种类的研究发现, 同种金藻产生的孢囊在初期和成熟期可能明显不同, 当然这些种类的成熟孢囊也可能没有纹饰 (Duff *et al.*, 1995)。

一些金藻对季节, 水的温度、pH、电导率、铝的浓度、颜色、盐度、有效性养分等环境因子有其特有的适应范围, 因此对环境具有指示作用 (Thomsen, 1975; Reynolds, 1988; Eloranta, 1989a, 1989b; Siver, 1991; Cumming *et al.*, 1992; Eloranta, 1995; Siver & Marsicano, 1996)。其中主要应用于古生态学, 因为金藻产生的孢囊以及一些金藻表面具有的鳞片 (scale)、刺 (spine) 和刺毛 (bristle) 均为硅质, 能够在沉积物中保存较长时间。

1.2 金藻孢囊的研究概况

1.2.1 金藻孢囊的命名与分类

德国的 Ehrenberg (1854) 是最早画金藻孢囊的人之一,但是他将其归为硅藻。Pantocsek (1912, 1913) 在匈牙利的湖泊沉积中发现了孢囊并为之建立了两个新属——*Carnegia* 和 *Echinopyxis*, 与根足虫属于一类。Frenguelli (1925, 1929, 1931, 1932, 1935a, 1935b, 1936, 1938a, 1938b) 描述了采自阿根廷不同地区硅藻土中的 110 种金藻孢囊。起先他将它们归在囊裸藻属中,但与 Deflandre 讨论后,改变观点,认为它们是金藻的休眠孢子。Deflandre (1936) 将金藻孢囊分为三个主要的类群: *Chrysomonadinea*——由现存的可确认的金胞藻产生的孢囊; *Archaeomonadaceae*——由没有确认的化石及海水种产生的孢囊; *Chrysostomataceae*——由没有确认的化石或者近代淡水种产生的孢囊。根据 Deflandre 的系统,可以根据形状以及细胞壁结构将孢囊归入不同的属,共描述了 16 个属。后来多人使用该系统。Zanon (1947) 将采自意大利罗马的硅藻土中的孢囊分为两类:细胞壁单层的孢囊和细胞壁双层或多层的孢囊,其中双层或多层细胞壁的孢囊分为对称结构和不对称结构。他用此系统描述了 565 个种,分属 19 个属,但是该系统没有被其他人使用。丹麦的 Nygaard (1956) 为金藻孢囊创建了一个新属——*Cysta*, 在后面加上一个描述性的词语,作为种名。他用此方法描述了采自丹麦 Gribso 湖泊沉积中的 77 种不同形态的金

藻孢囊,并根据大小、形状和细胞壁结构将它们分为 10 个类群,分别为球形且表面光滑;球形,表面具点纹;球形,表面具颗粒;球形,表面具刺,长超过 1 μm ;球形,表面具刺,长不超过 1 μm ;球形,表面具脊,排列成农田状;球形,表面具脊,分散排列;球形,表面具瘤,瘤侧面凹陷最终形成刺;椭球形或卵形;非球形、椭球形和卵形。Leventhal (1970) 用光学显微镜观察研究了意大利一个湖泊沉积中的孢囊,鉴定了 130 种形态,并依照 Nygaard 的系统归类。后来随着扫描电子显微镜的使用,发现了很多不同形态的金藻孢囊。Carney & Sandgren (1983) 鉴定了美国密歇根 Frains 湖的 46 种孢囊形态。Adam 和他的同事观察了采自美国西部的 110 个沉积样品中的孢囊,共拍摄 2750 张照片,将观察到的 300 多种孢囊进行编号,写入美国地质报告,但没有对孢囊进行任何描述 (Mahood & Adam, 1979; Adam & Mahood, 1979, 1980a, 1980b, 1980c, 1981; Adam & Mehringer, 1980a, 1980b, 1980c; Adam, 1980a, 1980b, 1980c, 1981)。国际静孢子工作组 (ISWG) 建议使用 1983 年第一届国际金藻会议讨论得出的金藻孢囊的命名方法及形态描述法则,即数字命名法,用唯一的数字将每一种金藻孢囊区分开,它的描述建立在光学显微镜和电子显微镜观察的基础上,必须要有显示孢囊领和体的扫描电镜的照片 (Cronberg & Sandgren, 1986) 并提供生态或地质的信息。该系统后来被很多人采用 (Takahashi

et al., 1986; Rybak, 1987; Rybak *et al.* 1987, 1991; Duff *et al.*, 1995; Hansen, 2001; Pla, 2001; Wilkinson *et al.*, 2001; Cabala, 2002; Firsova & Likhoshway, 2006; Huber *et al.*, 2009; Piatek *et al.*, 2009) 并沿用至今。

1.2.2 金藻孢囊的形成和萌发

金藻营养体繁殖通过产生二分体或孢囊来实现, 有性生殖或无性生殖都能产生孢囊, 而且这两种方式产生的孢囊形态相同, 过程从几分钟至半天不等 (Sandgren, 1988, 1991)。

金藻有性生殖产生孢囊并不是因为受到环境因子的影响, 如磷、氮、维生素和微金属 (Sandgren, 1981)。对培养条件下彼得森黄群藻有性生殖孢囊形成和自然条件下锥囊藻的研究中发现, 孢囊形成受种群密度的制约 (density dependence), 形成初期细胞数要达到最小阈值 (Sandgren & Flanagan, 1986; Sandgren, 1988)。孢囊形成率与对温度敏感的营养种群的生长率有直接关系; 孢囊形成率和有性生殖孢囊形成初期所需的细胞密度阈值具有种或株系的特异性 (Sandgren, 1991)。孢囊形成通常发生在种群的生长活跃期, 而不是在营养细胞数量降低时。在自然界的湖泊中, 有性生殖形成孢囊是金藻孢囊形成的主要机制。

有关金藻无性生殖产生孢囊的研究相对较少。在自然界中无性繁殖产生孢囊的锥囊藻、鱼鳞藻、黄群藻和黄团藻这四个属在培养条件下无性繁殖产生孢囊数量很少, 在临时性水池或新建造的人工水体中, 无性生殖产生的孢囊更为普遍 (Sandgren, 1981, 1989, 1991)。

金藻孢囊成熟后沉入底层, 进入或长或短的休眠阶段。南极海冰中的孢囊一年大部分时间都处在休眠阶段, 仅在冰融化时萌发, 随即很快又形成孢囊 (Stoecker *et al.*, 1997)。金藻孢囊萌发初期因种类或减数分裂次数不同产生一个、两个或者四个营养体细胞 (Sheath *et al.*, 1975)。鱼鳞藻孢囊的孔塞溶解后, 裸露的细胞先通过孔钻出, 然后产生鳞片 (Harris, 1953)。Sandgren (1988) 对圆筒形锥囊藻 (*Dinobryon cylindricum*) 的萌发条件进行了研究, 发现影响萌发的是品系而不是营养水平或温度, 光照能促进萌发但并不是必要条件, 孢囊也可以在低温黑暗的条件下萌发。Cronberg (1982) 观察发现, 富营养的 Trummen 湖在挖去表面沉积后, 湖底部的孢囊萌发出了大量金藻, 这说明金藻孢囊在自然界沉积物中的无氧条件下, 几十年后仍能够萌发。

1.2.3 金藻孢囊的形态及研究方法

ISWG (Cronberg & Sandgren, 1986) 颁布了金藻孢囊的命名方法和描述术语。有关形态描述的术语后经 Smol 等进一步完善 (Duff *et al.*, 1995; Wilkinson *et al.*, 2001)。金藻孢囊是一个空的硅质结构, 形态多样, 大致分为球形、椭球形、扁球形、卵形、倒卵形和金字塔形。孢囊前端有一个呈规则、锥状、穴状, 或具有环带等不同形态的孔。孔的周围有时具有领, 领分为单领或复领, 呈锥状、倒锥状、柱状等。孢囊表面光滑, 或具不同纹饰, 如瘤状纹饰、疣状纹饰、锥状纹饰、刺状纹饰、棒状纹饰、脊状纹饰、网状纹饰、凹槽状纹饰等 (Duff *et al.*, 1995)。Piatek 等

(2009) 在埃及发现了表面具泡状鼓起的金藻孢囊。关于金藻孢囊的描述术语详见第三章。

金藻孢囊通常为几层硅质沉积而成, 初生壁一般薄, 不具纹饰 (Sandgren, 1989)。成熟孢囊可能具有不同形态纹饰, 也可能不具纹饰。因此相同种类的孢囊在发育过程中的不同时期可能形态不同。成熟孢囊的形态变化可能是由基因造成的, 也可能是由环境因子造成的 (Sandgren, 1983)。圆筒形锥囊藻偶尔在囊壳 (lorica) 中形成孢囊, 导致孢囊椭球形而非通常的球形 (Sandgren, 1989)。孢囊颈的长度随温度的改变变化较大, 而颈的宽度变化则不明显 (Sandgren, 1983)。

但金藻孢囊形态仍具有种的特异性, 而对于一些金藻孢囊, 特别是那些结构简单、光滑无纹饰的孢囊, 很难与产生它的金藻一一对应。大约只有 160 种金藻孢囊能与产生它的金藻对应, 其中大部分缺少详细的描述和照片 (Duff *et al.*, 1995)。

金藻孢囊具硅质外壳, 因此处理方法与硅藻相似。主要有以下几种: ① 40~50℃ 条件下, 用 30% 的过氧化氢 (双氧水) 处理沉积物 2~3 周, 然后用硫酸和重铬酸钾混合液处理一周, 再用蒸馏水清洗, 转入 96% 乙醇中, 最后转入二甲苯或丙酮 (Nygaard, 1956)。② Patrick 和 Reimer (1966) 描述的清洗硅藻的方法也可用来清洗金藻孢囊 (Leventhal, 1970; Gritten, 1977; Carney, 1982)。③ 10% 盐酸去除碳酸钙, 30% 双氧水去除有机质, 处理时间视样品中碳酸钙和有机质的量而定。然后用蒸馏水清洗 (Carney, 1982)。

处理好的金藻孢囊可以用封片剂 (如加拿大树胶、Hyrax、Styrax、Pleurax、Clearzx、Diphane、Caedex) 进行封片,

在光学显微镜下观察 (Cronberg, 1986)。自 20 世纪 80 年代以来, 特别是使用 ISWG 规定的数字命名法描述命名金藻孢囊后, 几乎所有的孢囊形态观察都使用扫描电子显微镜。观察前将酸处理或双氧水处理好的标本滴在盖玻片上, 然后将盖玻片固定在铜或铝的载物台上, 干燥后在真空条件下使用金或金 / 钼合金喷射。

1.2.4 金藻孢囊在环境研究中的应用

一些金藻对湖泊环境因子敏感, 如 pH, 温度、盐度、电导率、营养水平等, 因此可以用金藻对环境作长期监测 (Duff *et al.*, 1995; Siver & Smol, 1993)。该方面研究主要是将沉积物中的金藻作为环境指示生物, 但金藻营养细胞个体小, 且难以在水样和沉积物中保存。金藻在沉积中以两种形式存在: ① 金藻纲的某些类群和黄群藻纲金藻脱落下来的硅质的鳞片、刺、刺毛。② 金藻孢囊 (stomatocyst)。但是在已知金藻中只有 20% 具有鳞片, 在一些生态系统, 如高纬度北极和高海拔湖泊中, 具鳞片的金藻很少, 不具鳞片的种类数量很多 (Smol, 1983; Douglas & Smol, 1994)。因此鳞片并不能反映整个金藻群落, 而几乎所有的金藻都产生金藻孢囊, 金藻孢囊能提供更为完整的金藻整体群落的情况。

Nipkow (1927) 研究了瑞士两个湖泊, 发现贫营养时期湖泊沉积中出现了锥囊藻孢囊, 而当营养水平上升时, 则不存在锥囊藻孢囊。而第一个真正将金藻孢囊应用于古湖泊学的是丹麦的 Nygaard (1956)。他在丹麦 Gribssø 湖的沉积物中发现了 77 种金藻孢囊, 并将它们归在

Cysta 这个新属中。通过数量统计,他发现该湖泊营养水平较好时,产生孢囊的金藻生长更多。

金藻孢囊在环境研究中的应用通常有三种形式:①作为硅藻细胞计数的一部分。②与硅藻细胞的比例应用于湖泊环境研究中 (Tippett, 1964; Smol, 1983; Stoermer *et al.*, 1985; Harwood, 1986)。Smol (1985) 首先提出贫营养条件下,金藻孢囊与硅藻细胞的比率相对较高,而中营养时这一比率通常较低。之后研究者运用这一简单的指数研究温带湖泊的营养状况变化 (Smol, 1985; Lotter *et al.*, 1997, 1998; Karst & Smol, 2000; Forrest *et al.*, 2002; Paterson *et al.*, 2004), 测量湖泊冰覆盖量及之后的气候 (Smol, 1988)。García-Rodríguez (2006) 研究发现从海水/半咸水—半咸水/淡水—淡水的过渡过程中,金藻孢囊与硅藻细胞的比率在增大,因此可以使用这一比率对全新世沿海水生系统的变化进行跟踪研究。③作为单独类群,其形态型组成的变化与环境的变化相关,如营养水平 (Nygaard, 1956; Carney, 1982; Carney & Sandgren, 1983; Rybak, 1986, 1987; Rybak *et al.*, 1987; Zeeb *et al.*, 1990)、湖泊水位 (Rybak, 1986)、栖息地可用性 (Rybak *et al.*, 1987)、pH (Nygaard, 1956; Rybak *et al.*, 1987, 1991; Duff & Smol, 1991; Facher & Schmidt, 1996; Pla & Anderson, 2005)、金属浓度 (Elner & Haphey-Wood, 1978)、盐度 (Pienitz *et al.*, 1992; Cumming *et al.*, 1993)、电导率 (Pla & Anderson, 2005)、气候变化 (Duff & Smol, 1988; Zeeb & Smol, 1993b; Kamenik *et al.*, 2001; Kamenik *et al.*, 2005; Kamenik *et al.*, 2010)、人类活动 (Kamenik *et al.*,

2010) 等。

美国密歇根的 Frains 湖中的现代沉积显示随着移民的到来,孢囊密度急剧下降,移民时期前的孢囊与硅藻的比率是之后的三倍。这些印证了金藻通常在贫营养环境较多 (Carney & Sandgren, 1983)。Leventhal (1970) 依照 Nygaard 的系统鉴定了意大利一个湖泊沉积中 130 种孢囊,其中大部分孢囊出现在湖泊的贫营养时期。Elner 和 Haphey-Wood (1978) 研究英国两个湖泊沉积中的硅藻和金藻孢囊时,得出了两个截然相反的结果,其中一个湖泊中的大多数金藻孢囊出现在贫营养时期,之后营养水平上升, *Asterionella formosa* 为优势种时孢囊数量最少;而另一个湖泊中的金藻孢囊在湖附近开始出现铜矿时,数量最多。Kamenik *et al.* (2001) 研究奥地利一个高山湖泊时,发现金藻群落的变化与土地使用造成的营养情况的变化有关。秋天气温是影响孢囊群落组成的重要影响因子。孢囊群落组成最初受气候因素,特别是 10 月至次年 3 月气温的影响。其次受到人类活动产生的营养物质的影响 (Kamenik *et al.*, 2010)。Huber *et al.* (2009) 也将奥地利一个湖泊中的孢囊分为三类:与中富营养相关的孢囊;与贫营养或冷水相关的孢囊;无生态相关性的孢囊。Rybak (1986) 通过光学显微镜和扫描电子显微镜观察了波兰 Kortowskie 湖冰河期后的沉积中的金藻孢囊,鉴定了 46 种形态,将它们分为四类:富营养型、贫营养型、冷水型、无明显倾向型。他们发现湖泊营养和水位的变化会影响孢囊种类组成。因此孢囊可以用来重建古环境中的营养水平、季节变化及水位变化。

Kamenik *et al.* (2005) 通过分析斯洛伐克的一个高山湖泊中的沉积发现,孢囊

群落与烟灰颗粒 (SCP)、磁性矿物质浓度、气温、pH 有关。孢囊群落的重大变化与 SCP、磁性矿物质浓度的变化一致。Pla 和 Anderson (2005) 分析了格陵兰岛 70 个湖泊表层沉积中金藻孢囊与湖泊、地质参数之间的关系。其中电导率是孢囊分布的主要解释变量, 电导率高的湖泊, 具有特有的多样性较低的孢囊群落, 且与北极其他咸水湖的孢囊相似。经度是解释孢囊变化的唯一地理学参数。他们根据统计分析建立了重建电导率和 pH 的模型。

尽管很多金藻孢囊的分类地位尚未明确, 它仍旧是非常有用的环境指示生物。比如, 表层沉积中的孢囊形态能与湖泊参数相联系, 建立传递函数 (transfer function), 这些数据就可以用来反映湖泊过去的变化 (Duff *et al.*, 1995)。Rybak 等 (1991) 对安大略省中部 50 个湖泊的表层沉积中的金藻孢囊进行研究后, 发现湖泊化学指标 (如 pH、溶解性固体、营养水平) 和金藻孢囊种群分布的关系密切, 并且建立了预测方程用于重建 pH 及其他湖泊化学指标。

1.2.5 金藻孢囊的分布

金藻孢囊的分类学工作主要是与环境研究结合在一起开展的。最早是丹麦 Nygaard 在 Gribssø 湖的沉积物中发现了 77 种金藻孢囊 (Nygaard, 1956)。之后世界很多地区都开展过金藻孢囊形态学方面的研究, 如加拿大 (Duff *et al.*, 1995; Wilkinson *et al.*, 2001)、美国 (Carney

& Sandgren, 1983)、委内瑞拉 (Rull & Vegas-Vilarrúbia, 2000)、西班牙 (Pla, 2001)、葡萄牙 (Hansen, 2001)、奥地利 (Huber *et al.*, 2009)、波兰 (Cabala, 2002, 2003)、俄罗斯 (Firsova & Likhoshway, 2006)、埃及 (Piatek *et al.*, 2009)、南极 (Coradeghini & Vigna, 2008)、北极 (Duff *et al.*, 1995; Gilbert *et al.*, 1997; Betts-Piper *et al.*, 2004) 等, 但是大多为较小范围内零星报道。自 1986 年数字命名系统颁布以来, 比较大区域的金藻孢囊分类研究主要有: Smol 等在 1995 年和 2001 年一共报道了 387 种金藻孢囊, 包含了北温带淡水水体中大部分常见形态型, 涉及的区域绝大部分在加拿大及美国、北极部分地区 (Duff *et al.*, 1995; Wilkinson *et al.*, 2001)。Facher & Schmidt (1996) 研究了中欧 50 个海拔从低到高的湖泊中的表层沉积, 而该报道主要对发现的 126 种金藻孢囊进行描述、计数, 并运用金藻孢囊建立 pH 传递函数, 对湖泊 pH 进行评价。Hansen (2001) 报道了葡萄牙属亚速尔群岛上的 110 种金藻孢囊新形态型。Pla (2001) 在西班牙的比利牛斯山发现了 210 种金藻孢囊, 其中 86 种为新形态型。俄罗斯贝加尔湖区域报道过 127 种金藻孢囊 (Firsova & Likhoshway, 2006)。Chu 等 (2005, 2008) 在中国辽宁省的两个湖泊中利用沉积中的金藻孢囊分析湖泊环境变化, 对孢囊进行了计数, 没有形态分类和描述。中国目前有关金藻孢囊形态学的研究仅见作者近年来的报道 (Pang *et al.*, 2012a, b; Pang & Wang, 2013a, b, 2014)。

1.3 大兴安岭沼泽概况

大兴安岭位于中国东北，东经 $118^{\circ}03' \sim 123^{\circ}09'$ ，北纬 $43^{\circ}20' \sim 53^{\circ}30'$ ，南北长约 1220 公里，是其东侧的松辽平原与西侧高大的蒙古高原的分界。大兴安岭南起于热河高地（承德平原），北迄黑龙江。全区地形总势呈东北—西南走向，属浅山丘陵地带。平均海拔 1200~1300 米，最高峰达 2035 米。

大兴安岭为重要的气候分带，年平均气温 -2.8°C ，无霜期为 90~110 天，属温带大陆性季风气候。整个山区的气候比较湿润，年降水 500mm 以上。山脉北段是中国东部地区最冷之地，冬季严寒，平均气温 -28°C ，有大面积多年冻土区。该地区覆被着茂密的森林。山脉中段与南段相对温暖干燥，1 月气温约 -21°C ，年降水量为 250~300mm。

全区水系为外流流域，流入太平洋海域的黑龙江流域区，属地表流经带的湿润带与多水带。境内较大河流有呼玛河、额木尔河、盘古河、根河、多布库尔河、甘

河、那都里河等，国际河流有黑龙江，省内地区间界河有嫩江。

沼泽是自然生态系统的重要组成部分，它在维持区域生态平衡中起着良好的作用。沼泽水体环境复杂，藻类的种类异常丰富，且分布着许多特殊种类。郎惠卿等（1983）根据沼泽类型组或代表性的沼泽体将我国划为 6 个沼泽区。大兴安岭属于东北山地、平原沼泽区。沼泽分布特点为北部多，南部少；河谷多，坡麓少；支流多，干流少；上游多，下游少，沼泽主要分布在山地的阴坡和北坡；沼泽类型的分布因海拔不同而不一样；以泥炭藓为主的贫营养沼泽。

该区沼泽类型较多，有森林沼泽、灌丛沼泽、草丛沼泽、藓类沼泽和浅水植物湿地等。森林沼泽有贫营养型、中营养型和富营养型。其中落叶松—偃松—泥炭藓沼泽、落叶松—兴安杜鹃—泥炭藓沼泽、扇叶桦—薹草沼泽和沼柳—沼薹草—泥炭藓冰丘沼泽是该区所特有的。

1.4 本书的内容与目的

近 30 来，金藻孢囊的研究越来越受到研究者的关注，特别是它在古环境中的应用促进人们对它的进一步研究。尽管世界很多地区都有过金藻孢囊的报道，但大都在某些范围较小的区域。尤其中国地域广阔，生态环境多样，生物多样性丰富，之前中国尚未有过金藻孢囊的形态学

报道。大兴安岭地区是我国纬度最高的地区，植被覆盖率高，淡水资源丰富，气候寒冷湿润，人为干扰相对较少，沼泽类型多样，适合金藻生长。作者于 2009 年开始研究大兴安岭地区的金藻孢囊，自 2012 年起，报道了阿尔山国家地质公园以及根河的 174 种金藻孢囊，包括 103 种新形态

型。目前中国金藻孢囊的形态学研究尚处在原始积累的阶段，仍需要进行形态分类和区系调查。

本书利用扫描电子显微镜 (SEM) 对采自大兴安岭地区的金藻孢囊进行显微观察和拍照，依据国际静孢子工作组 (ISWG) 1986 年颁布的数字命名法以及 Cronberg & Sandgren (1986)、Duff *et al.* (1995) 和 Wilkinson *et al.* (2001) 等

的描述和分类方法，对金藻孢囊进行了形态研究。共发现 210 种金藻孢囊，其中 32 种为新形态型，135 种仅分布于中国。对每一种金藻孢囊形态、地理分布、生境等进行了详细的中英文描述，并提供扫描电镜照片。为中国金藻孢囊的研究奠定基础，为世界金藻和金藻孢囊的研究及其在环境中的应用积累重要资料。

第 2 章

标本采集、处理及观察

2.1 标本采集时间及地点

本书作者团队分别于 2004 年 8 月、2005 年 8 月、2005 年 10 月、2006 年 5 月、2009 年 7 月在内蒙古阿尔山市进行了标本采集。采集的地点包括阿尔山冷泉、阿尔山国家地质公园内的达尔滨湖、杜鹃湖、天池、低池、乌苏浪子湖、仙鹤湖、鹿鸣湖、石塘林、三潭峡及路边沼泽等。

2006 年 7 月对大兴安岭北段的博克图—牙克石—海拉尔沿线、牙克石—库都尔—西尼气—伊图里河—根河沿线、根河—阿龙山—满归沿线、满归—漠河沿线进行了标本采集。采集地包括博克图、免渡河、牙克石、图里河、库都尔、新帐房、西尼气、伊图里河、约里安、根河、金河、阿龙山、满归、漠河、北

极村、长缨、劲涛、图强。

2009 年 7 月对大兴安岭呼玛—塔河—漠河沿线，漠河—加格达奇—甘河沿线、尼尔基—扎兰屯—博克图沿线、扎兰屯—蘑菇气—柴河源沿线进行了标本采集。采集地包括呼玛、十八站、塔河、瓦拉干、盘古、长缨、漠河、劲涛、白卡鲁山、宏伟、林海、塔源、加格达奇、甘河、甘河奇力滨、甘河库尔滨、大杨树、腾克、宝山、扎兰屯、博克图、蘑菇气、柴河源、阿尔山、索伦、察尔森。

标本采集点地图见图 2-1，标本采集地部分生境照片见图 2-2、图 2-3（见文后图版）。所有标本都保存在上海师范大学藻类与环境研究室。

2.2 标本采集方法

湖泊中用 25 号浮游生物网捞取，湖边及沼泽中用大镊子刮取石块或高等植物表面。采集的全部浮游植物置于 50 mL 或

100 mL 标本瓶中，现场用 4% 甲醛或鲁戈氏液固定。现场测定水温、气温、pH、海拔等数据并记录生境的详细情况。

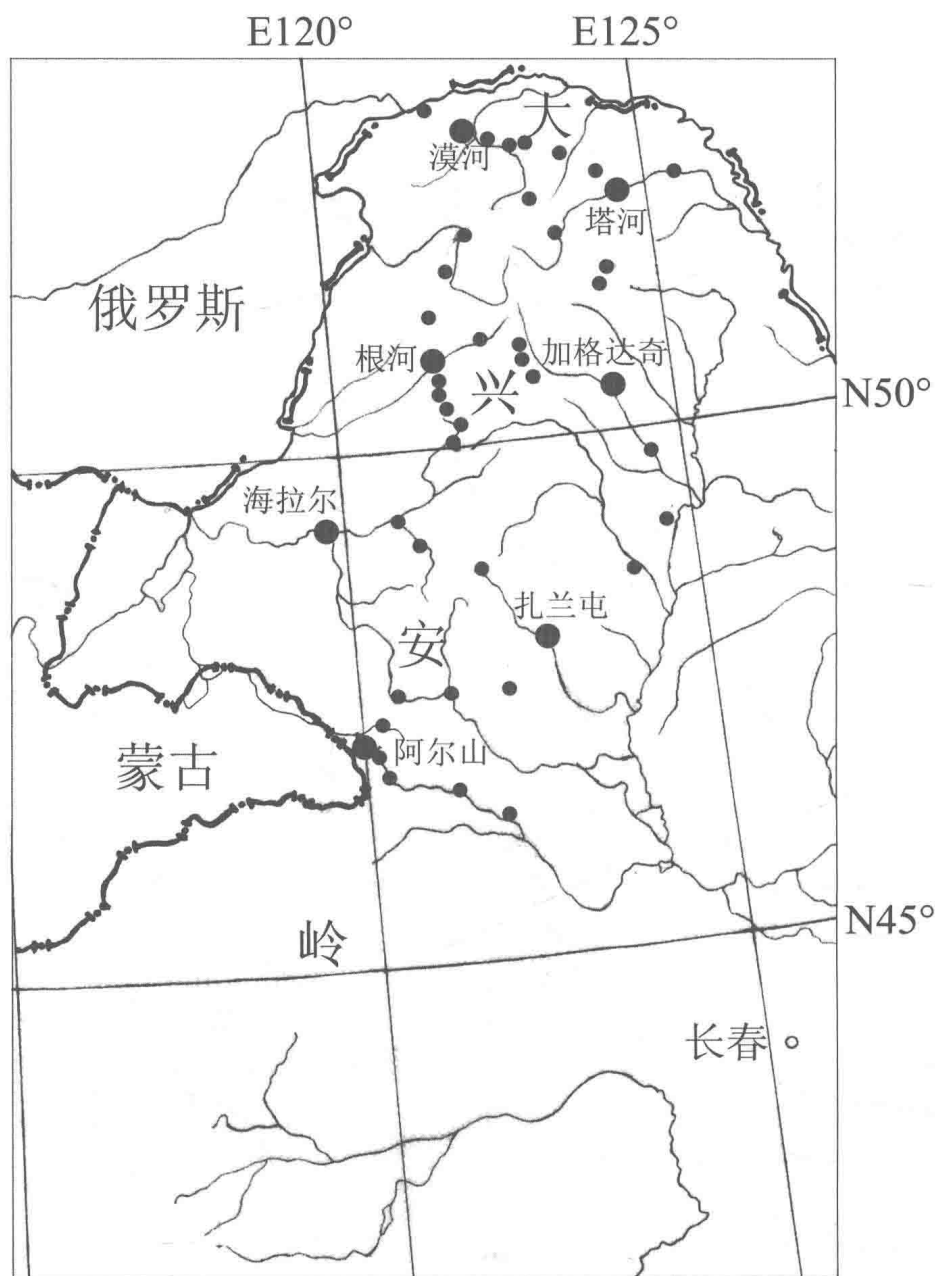


图 2-1 大兴安岭采样点示意图 (●为采样点)

2.3 实验室标本处理

金藻孢囊的分类鉴定主要以孢囊硅质外壳形状及表面的孔、领及纹饰的结构为

依据。显微镜观察之前, 金藻孢囊需经过处理, 将标本中的有机质除去。本书使用