

海洋和沼泽 沉积有机地球化学

段 毅 等著



科学出版社
www.sciencep.com

国家自然科学基金项目资助

海洋和沼泽沉积有机地球化学

段 毅 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是我国第一部关于海洋和沼泽沉积有机地球化学的专著,是首次对海洋和沼泽沉积有机地球化学的系统总结。作者在概述南沙海域和甘南沼泽研究区概况的基础上,重点阐述了海洋沉降颗粒物质、海洋不同沉积单元和沼泽沉积物中有机质通量与分布、各类生物标志化合物的组成和分布、有机质和单体脂类碳同位素组成、胡敏酸和干酪根化学性质、 CH_4 氧化与生成等特征,以及它们与母源性质、沉积环境、生态环境和气候状况等之间的关系,论述了海洋和沼泽沉积环境中有机质的分布、聚集、保存及生物地球化学作用和早期成岩演化的规律。

本书可供油气地球化学和环境地球化学等学科的科技工作者和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋和沼泽沉积有机地球化学/段毅等著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-021379-2

I. 海… II. 段… III. ①海洋沉积物-有机化学:海洋地球化学②沼泽沉积物-有机化学:地球化学 IV. P736.2 P941.78

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第034309号

责任编辑:胡晓春 王国华/责任校对:刘亚琦

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2008年9月第一次印刷 印张:10 1/4

印数:1—1 500 字数:230 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

海洋和沼泽沉积有机地球化学是地球科学发展的前沿学科,它是海洋和沼泽地质学、海洋和沼泽生物学、海洋和沼泽化学、有机化学及生物化学相互渗透的产物。海洋沉积有机地球化学主要研究海水、海洋沉降颗粒物质和海洋沉积物中有机质的分布、有机物质与自然环境和人类环境以及海洋资源开发的关系,揭示海洋有机质来源、聚集与分布特征和有机质沉积降解演变规律以及海洋沉积矿产的形成条件,从而提供古气候、古海洋的生态环境、沉积环境及其演变过程的重要信息。因此,海洋沉积有机地球化学在海洋科学研究中占有重要地位。沼泽沉积有机地球化学主要研究沼泽沉积物中有机质的组成、分布和演化规律,探讨有机质特征与古气候和古植被之间的相互关系。同时,海洋和沼泽沉积有机地球化学的研究为海相油气及煤成油气成因提供了依据,为油气和烃源岩的形成环境及母质来源研究提供了判识指标。海洋和沼泽沉积有机地球化学的研究始于 20 世纪 30 年代,随着 50 年代色谱技术和色谱-质谱联用等化学分析仪器的迅速发展,海洋和沼泽沉积有机地球化学得到了蓬勃的发展。我国海洋和沼泽沉积有机地球化学研究在 80 年代末,才只有零星的研究报道;此后,我国海洋有机地球化学研究在诸如边缘海和河口等领域开展了一定的研究工作,取得了重要的研究成果(唐运千等,1985;唐运千、林壬子,1991;唐运千、徐濂,1994;卢冰等,1988;段毅等,1995a,1996a,1997a、b;贾国东等,2001);我国沼泽有机地球化学研究在有机质的演化规律和地球化学特征及其古环境信息方面取得了可喜的成果(李香兰,1987;段毅、罗斌杰,1990;段毅,2001,2002;段毅等,1993,1996c,2004;史继扬等,1991,2000;谢树成、Evershed,2001)。可是,我国还没有一部系统论述有关海洋和沼泽沉积有机地球化学的著作。多年来,在国家自然科学基金项目、中国科学院南沙综合科学考察项目等资助下,著者及其合作者对南沙海域和甘南沼泽沉积有机地球化学进行了研究,获得了一批重要的较为系统的研究成果。本书是这些研究成果的总结,并且在论述中结合了国内外有关的研究资料。本书明显的特色就是从海洋和沼泽典型沉积环境着手,将今论古,总结有机地球化学的基础资料和理论,为其在油气地球化学和环境地球化学等学科的应用研究提供依据。这些特色成果概括为以下几个方面:

(1) 在国内首次系统地研究了海洋沉降颗粒物质的有机地球化学,并综合各种有机地球化学指标特征,新发现在海洋潟湖沉积环境中,沉降颗粒有机质的生物和生物地球化学作用最强烈。

(2) 在我国海洋环境中首次检出了 C_{25} 高支链类异戊二烯化合物,研究发现,这类重要的生物标志化合物生物源与硅藻种属有关,角刺藻和根管藻是其主要的生物源。

(3) 通过研究南沙海洋不同沉积单元中有机质含量的分布规律,提出了中大陆坡最有利于有机质的聚集和保存。

(4) 系统地研究了南沙海域大陆坡柱样中各类生物标志化合物的组成和分布特征及

其与母源性质、化学和生物地球化学作用、沉积环境等之间的关系，建立了判识低纬度赤道地区海洋沉积有机质来源、演化、海洋沉积环境和生态环境的生物标志化合物示踪体系。

(5) 研究了南沙海洋有机碳同位素组成和氨基酸含量与海洋古气候变迁的关系，发现有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 低值段对应于晚第四纪末次冰期，高值段对应于末次间冰期；氨基酸含量剖面高值段对应于古气候的温暖期，低值段对应于偏凉期；氨基酸含量在剖面中的四次突变点，代表了四次古气候旋回。从而为海洋古气候研究提供了新的指标和依据。

(6) 通过研究南沙海域有机质丰度和性质的变化与生物分布的关系，建立了海洋环境中控制有机质含量和性质的生物生态区系的新概念。

(7) 在国际上首次研究了现代海洋沉积物中单个脂肪酸、直链烷基醇和甾醇化合物的碳同位素地球化学。不仅从碳同位素方面论证了现代海洋沉积物中这些化合物的成因，而且在有机地球化学界，第一次利用碳同位素将低碳数脂肪酸中浮游藻类和细菌成因的脂肪酸区分开来；新发现长链直链烷基醇可以起源于细菌，纠正了长链烷基醇只来自陆源高等植物的以往认识。

(8) 根据南沙海域沉积物中单体长链正构烷烃的相对丰度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值，采用混合模型定量地计算了各类生物源对单体正构烷烃的贡献，探讨了不同地区和不同深度样品中单体长链正构烷烃的各类生物源分布规律，这些为沉积单体长链正构烷烃碳同位素应用研究提供了理论依据和研究方法。

(9) 通过研究南沙海域浮游生物、珊瑚和凹顶藻生物单体脂类碳同位素组成，并且将其与该海区各类沉积单体脂类碳同位素组成进行对比研究，首次建立了海洋沉积单个脂类碳同位素与生物先质的成因关系，为单体脂类碳同位素应用研究提供了科学依据。

(10) 系统地研究了甘南沼泽沉积环境中各类生物标志化合物的组成和分布特征及其与母源性质、成岩作用、沉积环境等之间的关系，建立了判识寒冷潮湿气候环境下沼泽沉积环境中沉积有机质来源、成岩过程、生物地球化学作用和沼泽沉积环境的生物标志化合物示踪体系。

(11) 在甘南沼泽沉积物中检出了丰富的、较为完整的藿酮和羽扇酮类化合物，在我国首次报道了它们的鉴定及其组成特征，探讨了它们的生物地球化学过程，为五环三萜类生物标志物的成因和应用研究提供了证据。

(12) 在我国沼泽沉积环境中新检出了丰富的具有羽扇烷和奥利烷骨架的脱-A-四环三萜类化合物，研究了它们形成的生物地球化学过程和母质来源，为判识陆源高等植物有机质输入提供了新的指标。

(13) 研究了甘南沼泽沉积物中胡敏酸和干酪根的化学性质，探讨了陆地沼泽沉积环境中胡敏酸的地球化学特征和成岩过程，并且根据胡敏酸和干酪根化学性质之间的关系，提出了干酪根是由胡敏酸转化而成的认识，这种转化是经历了缩合和芳构化反应。

(14) 系统地研究了甘南沼泽潜在 CH_4 氧化与生成特征，提出了土壤理化因子、通气状况以及植被条件是影响甘南沼泽 CH_4 氧化与生成分布的重要因素。

(15) 在我国首次研究了现代沼泽沉积物中单个正构烷烃、脂肪酸、正构脂肪醇、甾醇和 α -正构脂肪酮化合物的碳同位素组成，探讨了这些化合物碳同位素的成因和分馏效应，提出了判识陆源高等植物沉积有机质输入的脂类化合物碳同位素指标。

(16) 通过研究甘南沼泽草本植物和木本植物叶中单体脂类碳同位素组成, 并且将其与该沼泽沉积物中单个正构烷烃、脂肪酸、正构脂肪醇、甾醇和 α -正构脂肪酮化合物的碳同位素进行对比研究, 首次建立了沼泽沉积单个脂类碳同位素与生物先质的成因关系, 为单体脂类碳同位素应用研究提供了科学依据。

本书除第四章由罗斌杰和段毅、第七章由段毅和吴保祥执笔外, 其余各章均由段毅执笔撰写。宋之光博士提供了南沙海域样品并作了部分样品分析工作, 宋金明博士提供了海洋沉降颗粒物质和生物样品; 本书自项目实施、资料整理至最后编著完成自始至终得到罗斌杰教授的指导和支持; 在成稿过程中, 王传远、郑朝阳、王智平和马兰花等也参与了部分工作。在此一并表示衷心的感谢。

段 毅

2007年11月于兰州

目 录

前言

第一章 研究区沉积有机质形成的环境特征	1
一、南沙海域自然地理和地质概况	1
二、若尔盖沼泽自然地理和地质概况	5
第二章 海洋沉降颗粒有机地球化学特征	10
一、样品与分析方法	10
二、海洋沉降颗粒物及其有机地球化学研究	10
三、有机质通量	12
四、正构烷烃和类异戊二烯烷烃	14
五、类异戊二烯烯烃	17
六、脂肪酸	18
七、无环类异戊二烯酮、醛和醇	22
八、直链烷基醇和甾醇	24
小结	28
第三章 海洋柱状沉积有机质地球化学特征和古环境古气候信息	30
一、样品和分析方法	30
二、沉积有机质来源	31
三、有机碳含量分布	31
四、烃类化合物的组成、来源和成岩转化	34
五、脂肪酸的组成、来源和成岩转化	42
六、醇类化合物的组成、来源、成岩转化和古生态环境意义	50
七、氨基酸组成、含量与古环境和古气候	57
八、不溶有机质干酪根特征与古环境	60
小结	65
第四章 海洋表层沉积有机质性质与沉积生态环境区系	67
一、沉积有机质性质变化特征	67
二、有机质性质变化与生物生态环境区系的相关性	70
小结	73
第五章 海洋生物和沉积物中单体脂类碳同位素地球化学特征	74
一、样品和分析方法	74
二、生物合成过程中脂类化合物碳同位素分馏和组成特征	76
三、生物体中单体脂类碳同位素组成特征	80
四、沉积物中单体正构烷烃碳同位素组成及其成因	82

五、沉积物中单体脂肪酸碳同位素组成及其成因	86
六、沉积物中单体醇化合物碳同位素组成及其成因	89
七、海洋沉积单体脂类碳同位素与生物先质的成因关系	92
小结	92
第六章 沼泽柱状沉积有机质地球化学特征	94
一、样品和分析方法	94
二、正构脂类分布特征	97
三、三环和四环萜烷(烯)分布及演化	100
四、五环三萜烷(烯)组成特征	107
五、甾醇和甾酮分布特征	110
六、五环三萜酮组成特征	112
七、腐殖酸和干酪根的化学特征	117
八、CH ₄ 氧化和生成的分布特征	121
小结	126
第七章 沼泽生物和沉积物中单体脂类化合物碳同位素地球化学特征	128
一、样品和分析方法	128
二、单体脂类化合物碳同位素研究概况	129
三、生物体中单体脂类碳同位素组成特征	132
四、沉积物中单体正构烷烃和脂肪酸碳同位素组成特征	135
五、沉积物中单体酮和醇化合物碳同位素组成特征	139
六、沼泽沉积单体脂类碳同位素与生物先质的成因关系	141
小结	142
参考文献	143

第一章 研究区沉积有机质形成的环境特征

沉积有机质特征与沉积区生物发育、有机质来源和沉积环境有关,但是生物发育受控于其生存环境。因此,研究区自然地理、气候、水介质性质、生物组成和分布、沉积及地质构造等状况,是探讨沉积有机质特征的基础。基于前人研究成果,本书对研究区沉积有机质形成的各种环境特征进行了综合讨论。

一、南沙海域自然地理和地质概况

(一) 自然地理、地形和气候特征

南沙海域是我国南部海疆,地处低纬热带,海区面积达 706 800km²。南沙海域海底地形起伏多变,地貌类型齐全,其总的特征是从南向北由大陆架、大陆坡和深海盆地三级阶梯构成。

南沙海域大陆架是南海南部大陆架的北缘部分,面积达 121 600km²。大陆架的特征是地形较平坦,平均坡度为 1'30",外缘水深约 150m。根据大陆架的地貌特征,又分为内大陆架和外大陆架。内大陆架为 50m 以浅的海区,外大陆架为 50m 以深的大陆架海底。大陆架区海底平坦,阶台发育,并有宽缓洼地。外缘地形起伏较大,有波状起伏、礁滩和 V 形谷地等地貌。这里光线、氧气充足,海洋生物活跃,特别是底栖生物丰富,有机质来源多。但是浪基面以上的高能氧化环境(大约 75m 以浅),不利于有机质的沉积保存。大陆架也是大陆河流入海卸荷的地方,该区西北部的湄公河、东南部的加里曼丹河系均可以将其携带的陆源碎屑和陆源有机质沉积在大陆架河口附近,形成河口三角洲。

大陆坡是次深海至深海沉积单元。南沙海洋大陆坡水深 150~4000m,面积达 548 500km²,是南海最大、最壮观的地貌单元,其上分布着海山、大量礁盘和各种槽谷等。大陆坡分为上大陆坡、中大陆坡和下大陆坡三个部分。上大陆坡为上大陆架外缘往下急剧转折处的斜坡。下大陆坡为大陆坡外缘往深海转折处的斜坡,水深约从 2000m 至 4000m,下大陆坡比上大陆坡陡。中大陆坡位于上、下大陆坡之间,水深 1500~2000m,形成以阶地为基座、发育有最繁茂的水下礁盘地貌和海山的南沙海底高原。中大陆坡区内发育有礁盘、海山、海槽、海谷等地貌。大陆坡为深水还原沉积环境,浮游生物提供的有机质以及来自大陆架的碎屑有机质与细粒碎屑无机物质一起在这里沉积,并得到良好的保存。

南沙海域深海盆地水深为 3800~4200m,面积为 36 700km²,由深海平原和一些孤立单体海山或深海丘陵构成。深海盆地沉积有机质来源少(主要为浮游生物),加之水深,有机质沉积速度慢,沉积历程长,大部分有机质被生物化学作用所分解,所以深海

盆地沉积有机质一般很低。

南沙海域位于近赤道低纬地区，这里阳光充足，空气湿润，雨量丰沛，属于热带海洋气候。据仇德忠（1993）的研究，南沙海区年平均气温为 27.84℃，最高气温在 5 月（为 28.9℃），最低气温在 1 月（为 26.8℃），年温差很小。年平均相对湿度为 86%，年降水量可达 1500~3500mm。

（二）海水的物理化学特征

海水物理化学特征包括海水水温、盐度、pH 和溶解氧含量等。

南沙海域海水表层温度一般在 30℃左右，但在不同区域，海水表层温度有所差异。据邱章、黄企洲（1989）的研究，南沙海洋存在一个 SW-NE 向伸展的高温带。在这个高温带中，水温均超过 30℃，最高达 32.16℃；高温带两侧，水温均低于 30℃。南沙海域表层水温的年温差一般只有 2~3℃，而且季节变化也不明显。水温垂直分布变化较大：一般从表层至 30m 水温变化不大；30~200m 内，水温急剧下降，平均为 14℃；1000m 层以浅，水温随深度缓慢变低，平均温度 4.4℃；至 2000m 层整个海区的水温约为 2.5℃；2500m 层起水温略有回升。

南沙海域表面水盐度为 28.10‰~34.28‰，但主要为 33.0‰~34.0‰。盐度的平面分布特征是北高南低，垂直分布特征是随水深而增加。一般来说，20m 以浅，其盐度值低；150~200m 层出现盐度最大值，为 34.5‰~34.6‰；尔后随水深增加而减小，至 500m 层出现最小值，为 34.4‰~34.5‰；此后随水深增加而增大，至 2000m 层增大到 34.6‰。

据研究，南沙海域 0~100m 的水层，光合生物活动强烈，消耗了水中 CO₂，出现 pH 最大值为 8.2。此层之下，随水深增加，海水 pH 下降，2000m 层 pH 降为 7.84。

海水中溶解氧是影响沉积有机质保存的一个重要因素，据韩舞鹰等（1989）的研究，南沙海洋 20~50m 表层海水溶解氧呈饱和状态。50~75m 层达过饱和，其最大值约为 5mL/L。此后随深度增加而下降，在 75~150m 层，溶解氧下降最快，低界溶解氧含量约为 2.6mL/L。150~200m 层，溶解氧含量随水深加大略有回升。200m 层之后随深度加大缓慢下降，至 800m 层达最小值，约为 1.7mL/L。尔后随水深增加溶解氧含量增加，至 1500m 层溶解氧含量达 2.5mL/L。1500m 之后溶解氧含量又随水深缓慢下降，直到深海盆地保持在 2.0mL/L 左右。因此，南沙海域水深 75m 以浅，尽管生物生产力很高，沉积有机质来源丰富，但是溶解氧含量也很高，不利于沉积有机质的保存，水深 75m 特别是 150m 以深，溶解氧含量很低，为强还原沉积环境，有利于沉积有机质的保存。

（三）生物组成和分布特征

生物是沉积有机质的主要来源。不同类型生物是决定沉积有机质性质和特征的主要因素。南沙海区生物种类繁多，包括浮游生物、自浮生物、底栖生物和细菌等，但是其中浮游生物和细菌是海洋现代沉积有机质的主要来源。据林秋艳等（1989）的研究，浮

游植物以硅藻数量占绝对优势，它占浮游植物总量的 99.6%，其中角刺藻属种类最多；其次为甲藻类，占 0.4%；蓝藻无论从种属或数量上来说，所占比例均甚微。

南沙海域中浮游植物的分布特点受生态环境条件的控制。南沙及其邻近海域靠近加里曼丹岛的海区，由于受沿岸水体补给的影响，营养盐含量丰富，促使浮游植物在此大量繁殖，成为浮游植物的密集区。南沙海洋南部为低温低盐区，硅藻类数量分布也呈由东北向西南减少的趋势，但是甲藻数量分布则相反，呈西南向东北减少。浮游植物的垂直分布特点是随深度增加而数量减少，主要分布在 0~75m 层。

据陈清潮等（1989）的研究，南沙海洋中浮游动物以桡足类和毛颚类为主，其中桡足类平均占 44.6%，毛颚类占 39.5%，其余类群均在 5% 以下。浮游动物的分布特点与生态环境条件有关。与浮游植物相似，浮游动物的高生物量一般在南沙海域东南部；随水深增加，浮游动物数量有规律地减少，例如，100m 以浅的浮游动物数量要比 100~200m 层的高 4.5 倍。

细菌是海洋水体和沉积物中普遍存在的一类生物，沉积有机质相当一部分来自于细菌。细菌包括自养细菌和异养细菌两大类，前者以 CO_2 为碳源，后者以有机化合物为碳源。据沈鹤琴等（1989）的研究，南沙海域沉积物中异养细菌主要为革兰氏阴性菌，占 92.1%，其中阴性杆菌占 88.1%。异养细菌群分布特点是：其数量以水深 500m 以浅最高，水深 1000m 以深明显减少；高数量分布区在南沙群岛海区南部大陆架，并由南向北递减。

（四）地质构造和沉积特征

1. 地质构造特征

研究区的大地构造决定了沉积盆地类型，不同沉积盆地类型控制了沉积物和沉积有机质的组成及其演化特征。南沙海域地质构造在大地构造性质上主要属南海陆缘地槽系，在其发展演化上位于太平洋板块、印度-澳大利亚板块和欧亚板块的交汇部位。研究区主要涉及的地质构造单元从北向南包括北部陆坡断块隆起带、南海西南海盆、南沙断块隆起带、曾母地槽拗陷和南沙海槽。

南沙西南海盆是南海中央海盆的靠南部分，位于中、西沙陆坡和南沙陆坡之间，走向北东，呈东北宽、西南窄的楔形。海盆的地壳具有典型洋壳结构，下部为枕状玄武岩和辉长岩基底，其上为渐新世以来的正常深海沉积，包括抱球虫软泥、褐色黏土、火山碎屑、宇宙尘和浊流沉积。

南沙断块隆起带位于南海陆缘地槽系的东南翼，其四周均以断裂为界，长轴走向为北东，长达 800 余千米，宽为 400 余千米。该隆起带水深 1500~2000m，高出深海平原 2000~2500m，构成宏伟的水下高原。其基底为古生界和中生界变质岩、沉积岩以及火山岩和岩浆岩，经海西、印支和燕山构造运动后，这些岩层普遍发生了褶皱。其上为不整合接触的新生界海相为主的沉积，构成新生代沉积盆地。该盆地在礼乐次一级沉积盆地中，第三系厚度达 4000 余米，具油气远景。

曾母地槽拗陷带位于纳土纳褶皱带以东，南沙断块隆起带的西南。其四周均以断裂为界，形态呈向西南凸出的弧形。断裂构造以北西向的张剪性正断层为主。曾母地槽拗

陷带为一新生代沉积盆地，基底为中生界变质岩系，其上沉积了厚 8000m 以上的碎屑岩和碳酸盐岩。曾母地堑拗陷带沉积自晚始新世以来，总体上是一个海退沉积序列，盆地中心基本为连续沉积，盆地边部存在沉积间断。在盆地发育过程中，沉积中心有迁移，一般来说盆地南部沉积较薄。曾母地堑拗陷是一个大型的含油气盆地，现已在其东部和南部分别发现了许多工业性油藏和天然气藏。

南沙海槽位于南沙断块隆起带以南，沙巴陆缘以北，西以曾母地堑拗陷带为界，东以巴拉望隆起带为界，走向北东，长约 75km。南沙海槽水深 2800~2900m，槽底平坦。

2. 沉积特征

南沙海域，由于沉积物物源区的不同和沉积作用的差异，沉积物的类型较为复杂。罗又郎等（1993），罗又郎、吴时国（1995）根据沉积物的粒度和成分等特征，将底质划分为九个类型：砂、生物碎屑质砂、粉砂-砂、黏土-粉砂-砂、黏土质粉砂、有孔虫粉砂质黏土、有孔虫放射虫粉砂质黏土、深海黏土以及珊瑚碎屑。

南沙海域沉积物的粒度类型和沉积成因类型有很好的对应关系，沉积类型的空间展布与水深及海底地貌单元有密切的关系。沉积有机质的分布与沉积物的类型有一定对应关系。

南沙群岛及其邻近海域中陆源碎屑成因类型的沉积物分布在研究区的大陆架及部分上大陆坡区。由于形成时间不同和沉积环境的变迁，海底沉积物可区分出现代沉积和残留沉积，以及残留沉积被后期沉积物的掺入和经受后期沉积作用改造的混合沉积。现代陆源碎屑沉积，分布在湄公河口外，陆源碎屑主要来自湄公河，底质类型以分选较好的细砂为主，含有较多的热带生物碎屑。大陆架残留沉积，分布在纳土纳-加里曼丹-巴拉望大陆架上。由于这些岛屿上河流不长，河流挟带的陆源物质只沉积在河口，且年输沙量有限，往外大陆架输送的陆源碎屑很少。而在晚更新世末次冰期时，南海南部大陆架海平面下降达 60~90m，现今的大陆架大片出露水面，因而在现今的浅海沉积多为原高能环境下的产物，并非现代沉积。沉积物以生物碎屑质砂为主，主要是继承了低海面的海滩及沙丘沉积。沉积在东南部纳土纳和亚南巴斯群岛的沉积物为混合沉积，沉积物为黏土-粉砂-砂，由多期、多源沉积叠合而成。

大陆坡现代碎屑沉积，主要沉积物类型为黏土质粉砂，其中粒度大于 0.063mm 部分基本上由生物碎屑组成。在邻近珊瑚礁岛的底质类型中，珊瑚质碎屑构成了生物碎屑的主体。另外浮游生物遗骸也是该沉积类型中一种重要生物碎屑，它的含量随着水体深度的增加而增高。粒度小于 0.063mm 多是陆源的粉砂与黏土，大陆坡上陆源碎屑的含量比深海盆地中高。

珊瑚碎屑是该区有特色的生物源成因类型。该海区造礁生物繁盛，造礁珊瑚为主的造礁生物在该区的大陆架、大陆坡台阶凸起基底上建造了南沙群岛。目前南沙群岛已发现 100 多座岛礁。由于南沙群岛远离现代河口和陆地，基本不受淡水和陆源的影响，礁体发育主要受东北和西南季风影响。珊瑚碎屑常形成珊瑚岩块、砾和砂等碳酸盐沉积。

浅海-深海相的生物源-陆源碎屑沉积中，生物碎屑的含量非常丰富，深海碳酸盐的溶解作用制约了钙质生物碎屑的保存。以浮游有孔虫与钙质超微化石为主要成分的钙质

生物,和以放射虫、硅藻和硅鞭毛藻为主的硅质生物的含量变化,随水深增大相互消长。在大陆坡上部,生物碎屑以钙质壳为主,硅质生物含量较少;而在大陆坡下部,虽然仍以钙质生物为主,但硅质生物含量已有明显增加。因而,在水深150~3000m的大陆坡上,主要底质类型为有孔虫粉砂质黏土;而水深3000~4000m的下大陆坡至深海,沉积物中的生物碎屑明显以硅质为主,并且其含量随着水深的增加而增大,而钙质生物则有相反的变化趋势。该深度下陆源物质以黏土为主,底质类型为有孔虫放射虫粉砂质黏土。水深大于4000m的南海深海盆,主要沉积以悬浮形式搬运的陆源碎屑黏土,沉积物以黏土为主,含量通常大于70%。以上沉积性质和类型控制了沉积有机质的聚集和保存情况。

二、若尔盖沼泽自然地理和地质概况

(一) 自然地理和气候特征

若尔盖高原位于青藏高原东北隅,南北长约200km,东西宽约100km。地理分布范围为 $32^{\circ}20' \sim 34^{\circ}00'N$ 、 $101^{\circ}36' \sim 103^{\circ}30'E$,包括黄河上游的两大支流——黑河与白河流域。若尔盖高原四面环山,海拔在3400m以上,沼泽是该地区的主要景观特色,其总面积达2696.2km²。

若尔盖沼泽区属高原寒温带湿润气候,主要特征为寒冷而潮湿,四季不分,降水多,湿度大,霜冻期长。11月至次年4月受西伯利亚和蒙古冷空气控制,5~10月受西南季风控制。

1. 气温

若尔盖沼泽地区气温低,主要受海拔高度,其次为纬度的控制。区内年均气温 $0.6 \sim 1.2^{\circ}C$ 。由于地处高原海拔高,辐射较强,气温的日变化较大,平均为 $14^{\circ}C$,最高可达 $18^{\circ}C$ 。该区四季不分,只有冷暖两季,若以日平均气温 $<10^{\circ}C$ 期间为冬季, $>22^{\circ}C$ 为夏季, $10 \sim 22^{\circ}C$ 为春季和秋季,则该区6月下旬为春季开始,持续时间为35~60天。大致从8月开始进入冬季,长达300天以上。霜冻期长,约300天。在7月下旬开始结冻,至次年6月开始融解,绝对无霜期仅有16~25天。

2. 降水、蒸发和湿度

若尔盖沼泽地区降水较多,年均降水量达560~860mm。降水量的分配较为独特,7月和8月为最高峰,5月为次高峰,全年50%左右的降水量集中在5~8月份。降水量的年际变化不大,最多的年份比最少的年份多150mm。区内冬季降雪较少,积雪厚度为14~24mm。降水的频率变化大,强度小,年降水日高达110~180天,但最大日降水量仅有34.2mm,多中、小雨,连续雨日可达18~25天。暴雨不多,但常有冰雹。降水的分布由西到东、由南到北逐渐减少,南北差异较大。

蒸发支出受多种条件的控制,该区气温低、湿度大、风力较小,蒸发量不大,只有450mm左右。另外,该区的水分支出主要途径是地表和地下径流。

湿度较大是该区突出的特点。年平均相对湿度为 64%~73%。雨季相对湿度多为 77%~90%，冬季不低于 55%~65%，较之周围地区如松潘、米罗高出 2%~5%，南北地区在相对湿度上存在较大差异，以北部的唐克相对较高，向南则逐渐降低。该区湿度大，主要是由于降水量多而温度低，地面长期积水，特别是沼泽形成之后，更加提高了湿润程度（中国科学院西部地区南水北调综合考察队，1965）。

总之，该区气候寒冷潮湿，有利于沼泽的形成和发育，并且大片沼泽形成之后，又加强了这一区域气候特征。

（二）生物组成和分布特征

1. 植物组成和分布特征

该区的植被类型有两种：一种是在垂直地带影响下形成的亚高山草甸植被；另一种是由于地表水过多而形成的沼泽植被（中国科学院西部地区南水北调综合考察队，1965；侯众等，2003）。

草甸植被主要分布于丘陵坡地及排水条件较好的河漫滩和阶地。植物群落以禾本草、杂草为主，包括珠芽蓼、蓼、银莲花、人参果、香青、狼毒、龙胆、黄芩、泥湖菜等。在地下水位稍高、土壤湿度较大地区分布有藏蒿草-金莲花湿草甸。该群落的土壤没有泥炭的积累。植物成分完全属于草甸植物，其中以藏蒿草为主，并形成草丘。次要成分为杂草类，杂草类中有金莲花、银莲花、珠芽蓼、二中报春花、马先蒿、小龙胆、小唐松草以及禾本科植物羊茅禾、早熟禾等。莎草植物群落中优势植物除藏蒿草外还有藁草属一种（中国科学院西部地区南水北调综合考察队，1965；侯众等，2003）。

坡麓土层较厚的亚高山腐殖土质草甸土上，生长有甘松香草本（如羊茅、垂穗披碱草），以及北方草原成分（针茅等）。群落中亦有少数莎草植物（小蒿草和小藁草等）。在坡度较为平坦的丘坡上，时有灌木。灌木的高度为 30~100cm。植物物种有高山绣线菊、金腊梅和藏锦鸡儿等。在河漫滩的自然堤上，土壤发育不好，为冲击土。植物分布稀疏，有零散分布的灌木，小灌木有小叶杜鹃、沙棘等；禾本草有披碱草、早熟禾等；此外还有蒿属和藁属等；偶见高 1~2.5m 的柳丛（中国科学院西部地区南水北调综合考察队，1965；侯众等，2003）。

沼泽植物群落分布在丘陵之间，发育茂盛，共有 9 种植物群落：芦苇-水甜茅群落、肥壮藁草群落、毛果藁草-睡菜群落、毛果藁草-狸藻群落、木里藁草-狸藻群落、木里藁草-条叶垂头菊群落、乌拉藁草-眼子菜群落、龙须眼子菜群落、藏蒿草-驴蹄草群落，分布于高寒半沼泽、高寒水沼泽、湖泊及河流周边地段。主要的植物种类有木里藁草、乌拉藁草、无脉藁草、毛果藁草、羊茅、水麦冬、银莲花、龙胆、草甸马先蒿、矮生蒿草、线叶蒿草、大花蒿草、华扁穗草、矮陵菜、鹅绒矮陵菜、地榆、发草、垂穗披碱草等（中国科学院西部地区南水北调综合考察队，1965；侯众等，2003）。

该区位于低纬度，地势高、气候寒冷潮湿。区内多宽谷低丘，地面平坦低洼，排水不良，形成了大片的沼泽。土壤和植被也比较单调，除广泛分布的沼泽土及沼泽植被以外，仅在低山与丘陵上分布有亚高山草甸土与亚高山草甸植被，属于高山无林带，只在山丘上有稀疏的灌木，是青藏高原独特的自然单元。

2. 动物组成和分布特征

若尔盖沼泽动物丰富, 共有野生脊椎动物 22 目、44 科、93 属、128 种, 其中鱼类 15 种、两栖类 3 种、爬行类 3 种、鸟类 85 种、兽类 24 种。此外, 已知的昆虫及无脊椎动物 88 种 (中国科学院西部地区南水北调综合考察队, 1965; 杨旭煜等, 1997)。

若尔盖地区的鱼类均属鲤形目鱼类。其中花斑裸鲤、骨唇黄河鱼、粗唇高原鳅、墨曲高原鳅、硬刺高原鳅是优势种, 扁咽齿鱼和拟鲇高原鳅数量较少。两栖爬行动物主要有中国林蛙、岷山蟾蜍、倭蛙 3 种。最常见的是林蛙和倭蛙。爬行动物有红原沙蜥、高原蝮、秦岭滑蜥 3 种 (中国科学院西部地区南水北调综合考察队, 1965; 杨旭煜等, 1997)。

若尔盖地区生存的黑颈鹤、棕头鸥、雪鸽、长嘴百灵、鹤背拟地鸦、白腰雪雀等具有青藏高原鸟类区系的典型成分。水域鸟类主要由鸭科、鸥科、鹈科、鹡鸰科组成, 其主要繁殖栖息地位于错拉坚及周围水体。沼泽鸟类种类较为贫乏, 优势种为长嘴百灵, 常见有黑颈鹤、白腰雪雀、角百灵等。草甸灌丛 (包括高山灌丛、高山草甸和沼泽草甸) 鸟类优势种为褐背拟地鸦、黄嘴朱顶雀、角百灵等。常见猛禽有高山秃鹫、大嘴乌鸦、渡鸦等。珍稀鸟类有国家 I 级保护动物黑颈鹤、白鹤、黑鹤、金雕等 8 种, 国家 II 级保护动物大天鹅、小天鹅、灰鹤等 16 种。我国的特产鸟类有蓝马鸡、黑颈鹤、长嘴百灵、褐背拟地鸦、高山雀鹀、白腰雪雀 7 种 (中国科学院西部地区南水北调综合考察队, 1965; 杨旭煜等, 1997)。

若尔盖地区有 24 种兽类分布。食肉目动物 13 种, 其次为偶蹄目和啮齿目, 各 4 种。另外有兔形目 2 种, 食虫目 1 种。属国家保护的野生动物有水獭、荒漠猫、猓、藏原羚等 7 种, 其中水獭和藏原羚的数量较大。还有狼、喜马拉雅旱獭、赤狐等具有经济价值和研究价值的动物 13 种 (中国科学院西部地区南水北调综合考察队, 1965; 杨旭煜等, 1997)。

总的分布是西部、西北部和南部有丘陵起伏山林的地段丰度较高, 而北部、东部平坦的高寒草甸上兽类丰度较低, 而作为害兽的黑唇鼠兔在东北部、东部密度很高; 黑唇鼠兔从北向南密度逐渐降低, 在夏牧场的种群密度较冬牧场的种群密度高得多。

(三) 地质地貌特征

若尔盖高原区内岩性分布较为单一, 以沉积岩为主, 包括三叠纪灰绿色、黄绿色砂岩和黑褐色页岩, 夹有薄层灰岩。构造相对简单, 节理发育, 岩层较为破碎。砂页岩层褶皱成平缓的复向斜, 岩层中的小褶皱较多。岩层走向以北东-南西向为主。

该区主要为低山和丘陵。低山主要分布在山原的外围, 特别是两河的上游。海拔 3700~4000m, 相对高程 300~500m。丘陵一般海拔在 3500~3700m, 大致自南向北降低, 一般高出低谷 70~150m, 少数为 200~300m。丘陵与宽谷相间排列, 整齐有序, 大致与构造线平行或小角度相交。由于构造和岩性的影响, 丘陵的东南坡一般较陡, 西北坡因与岩层面一致, 比较和缓, 形态浑圆, 沟蚀现象不明显。东南坡发育冰斗地貌特征, 且较为完整 (中国科学院西部地区南水北调综合考察队, 1965)。

该区最主要地貌特征是发育平坦宽阔的河谷和分布有大面积沼泽。黑河和白河河谷开阔,下游谷宽14~18km,中游也都为2~4km,上游较窄,多不足10km。但在较多支流汇聚之处,谷地显著展宽,形成一些较小的河谷盆地,最宽可达2~4km。黑河中、下游阶地不明显,具有特殊类型的支谷,而白河中、下游则有二至三级阶地,支谷也极少。

黑河河谷发育有一级堆积阶地,漫滩极不发育。阶地面较平整,阶地前缘残留有较明显的自然堤,一般高出阶地面1m左右,宽度可达300~800m,高出河流水位5~8m,阶地面上残留有废弃河道,牛轭湖及小洼地、沼泽分布较多。而河则不同,中游有二级堆积阶地,下游有二级阶地和一级侵蚀阶地,以一、二级阶地最发达,阶地面宽达2~3km,河漫滩也十分发达。一级阶地平均高出河流水位5m以上,二级阶地则高出水位11~13m,三级阶地高出水位17~18m。阶地呈波状起伏,有沙丘和洼地以及古河道,洼地与古河道均有沼泽分布,沙丘与古河道平行排列,约有三四列,一般高3~4m,最高可达7~8m,长可达数十到一两百米(中国科学院西部地区南水北调综合考察队,1965)。

黑河中、下游分布一些特殊类型的谷地。这些谷地较为开阔,其中一部分无排水孔道,特称之为闭流宽谷,宽谷一般为2~3km,最宽可达7~8km,谷长可达10~40km。谷底极为平坦,有利于沼泽和泥炭层发育。另外一部分水流时伏时明,谷底平坦,称之为伏流谷底,泥炭层深厚。

古冰蚀谷地主要分布于两河中、上游段,可见两级古冰斗和古支冰槽谷。分布在海拔3400~3440m以上的古冰斗,都成半圆形剧场状,分列宽谷两侧。古冰斗呈尖辟小分水脊状,围壁陡达20°~30°,底部略有2°~3°的坡度,宽一般为200~500m,最宽可达1000m以上。古支冰槽谷一般位于支流的上源。古冰斗与古支冰槽谷中均有沼泽发育。古支冰槽谷两侧分布一些高出谷底10~15m(海拔约3510m)的较小且不太明显的古冰斗(中国科学院西部地区南水北调综合考察队,1965)。

湖群洼地主要分布于黑河下游以及江错、错拉湖及嫩洼一带,地面平坦开阔。其上多湖泊及大量蝶形洼地和少量废弃河道。湖群洼地的排水能力极差,沼泽分布广,泥炭层也较厚。

第四纪沉积物在区内较为发育,尤其是黑、白河中、下游谷地沉积物厚度较大。主要为冲积相、湖积相及沼泽相,未发现冰碛物及冰水堆积物。务其里宽谷深孔钻研究表明,钻孔深20m未见基岩。小于3.5m深度为表层,多为泥炭;3.5~11.61m,以灰绿色或灰蓝色亚黏土及粉砂为主,夹有薄层黑色腐泥或黏土、粉砂及黏土,质地均匀细腻,一般较黏重,矿物成分以白云母及石英含量最多,与周围砂页岩岩性一致,层间有小水螺贝壳及植物残体,并有明显的锈斑;11.61~15.64m,岩性总体与上层相似,但颜色较暗,有机质增多,夹有薄层泥炭及木本植物碎块,红色锈斑呈波纹状;15.64m深度以下,为灰色、暗灰色夹棕色的粉砂及细砂层,质地均匀,有机质含量明显减少(中国科学院西部地区南水北调综合考察队,1965)。

黑河下游谷地沉积物与上述有所不同。如黑河下游嫩洼附近,表层约有0.6m厚的黑色土层;0.60~1.60m为黄色粉砂层,夹有粗砂砾,锈斑呈坚硬的片状;1.60~4.60m为灰色或灰绿色粉砂层,层理清晰,颜色向下变暗,锈斑向下减少,层间含有

小水螺贝壳。

古冰斗沉积物很薄，泥炭层仅 0.20~1.50m 厚，其下为细砂或粗砂，大于 3m 深度为角砾层和基岩。

白河流域沉积物较粗，中游以下，阶地发达，堆积阶地多以粉砂、细砂为主，夹有砂砾，一般层间常夹有亚黏土，比较黏重。两河上游，沉积物均较粗，多为砂砾。

该区地貌较为复杂，在第四纪冰川时期受到冰川的作用，冰川的末期有较长时间的、间歇性的、不等量的地壳下沉，下沉的中心大致在黑河中、下游，随着地壳的升降，河湖几度变迁，造成黑河中下游地面较为平坦低洼，河曲发育，排水能力差，地面长期积水，几次出现较大的湖群，形成了黑河中、下游湖相的普遍堆积，沼泽发育，只是存在的时间较短。白河流域及黑河上游与此不同，下沉时间较短，间歇性回升时间较久。这些地貌特征为沼泽的形成与发育提供了良好的基础。