

地球排气作用:

地球动力学、地球流体、石油与天然气

主编 黄学 牛彦良 陈树耀

The Outgassing Function
of the Earth:
Geodynamics,
Fluids of the Earth,
Oil and Gas

 上海远东出版社

**地球排气作用：
地球动力学、地球流体、石油与天然气**

**The Outgassing Function of the Earth:
Geodynamics, Fluids of the Earth, Oil and Gas**

主编：黄 学 牛彦良 陈树耀

上海遠東出版社

图书在版编目(CIP)数据

地球排气作用:地球动力学、地球流体、石油与天然气/黄学,牛彦良,
陈树耀主编. - 上海:上海远东出版社,2008.3

ISBN 978-7-80706-640-8

I. 地…II. ①黄…②牛…③陈…III. ①地球动力学-文集②地球物理学:
流体力学-文集③石油天然气地质-文体 IV. P541-53 P618.13-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第012502号

特约编审:黄正鹏

责任编辑:黄政一

地球排气作用:地球动力学、地球流体、石油与天然气

主编:黄学 牛彦良 陈树耀

出版:上海世纪出版股份有限公司远东出版社

地址:中国上海市仙霞路357号

邮编:200336

网址:www.ydbook.com

发行:新华书店上海发行所 上海远东出版社

制版:上海永正彩色分色制版有限公司

印刷:上海精英彩色印务有限公司

装订:上海精英彩色印务有限公司

版次:2008年6月第1版

印次:2008年6月第1次印刷

开本:889×1194 1/16

字数:540千字

印张:16

印数:1-1050

ISBN 978-7-80706-640-8/P·2

定价:98.00元

序

大约在 20 年前,在工作中即察觉到地球科学总是局限于固体物质的研究可能要出大问题,因为大量新进展表明地球内部动力学的根子并非固体热活动而是流体,特别是气体(和熟知的大气无论在成分上还是状态、能量上有本质区别)。于是在 1987 年正式提出了“烃碱液体幔汁”假说,1993 年又提出“地球五个气圈”、“气体地球动力学”、“从固体地球观要向流体(特别是气体)地球观进行概念更新”。很明显,如果忽视地球内部气体(哪怕只占地球的 1% 体积)及地球排气作用就不可能找到大地构造运动及海陆形成的真正内因;就不可能发现中地壳和上地幔还存在尚待开发的巨大油气能源;不可能破译众多重大自然灾害,如地震、大旱、大水(来自突发的特大暴雨)台风突然拐弯、森林草原区域性大火、沙漠化、热灾、沙尘暴、霾雾、臭氧洞、厄尔尼诺、赤潮、海啸以及许多海难、空难等等的原因。

当今国际上对地球排气作用研究最早、最多、最深的是苏联或独联体。这和俄国学派维尔纳茨基(1912 年)、维诺格拉多夫(1959 年)、克鲁泡特金(1976 年)等先驱的领军开拓有密切关系(另外,美国上世纪 70 年代的鲁比和戈尔德也对其有重大学术影响)。

鉴于国内地球科学学术界对俄文信息较为生疏(在众多论文著中极少俄文文献引用即为证明),在大庆油田编译者们的努力下,曾于 2003 年出版过《地球排气作用与大地构造》(上海辞书出版社)。那本译作反映了苏联 1991 年前的研究成果。而现在译本《地球排气作用:地球动力学、地球流体、石油与天然气》反映的是 2002 年独联体同名会议文集集中的新成果。关于地球排气作用的专门大型讨论会在独联体一共开过 4 次:1976 年、1985 年、1991 年、2002 年。我曾对此四次会议的论文及作者数量作了统计:1976 年会议(1980 年出版)论文 35 篇,作者 63 人;1985 年 127 篇,作者 200 人;1991 年 185 篇,作者 276 人;2002 年 202 篇,作者 389 人。研究阵容急速扩大。

这次译本中有以下突出的创新或由此得出的启示值得推介:

- (1) 地球排气作用是当代地球动力学的理论核心,是地球科学发展最重要的学术前沿。
- (2) 地球排气作用是众多重大自然灾害深层次决定性的孕育因素。
- (3) 和金属热液矿床一样,形成石油、天然气藏的也是热液作用,甚至可以认为石油天然气实乃超临界态的地幔流体(幔汁)沿深断裂带上升减压降温的相变产物。
- (4) 元古界、太古界基底以及盆地深部的火成岩、变质岩今后有巨大的油气远景。要注意盆地中不少所谓的粗面质、安山质、流纹质、花岗质岩石并非真正的岩浆岩,而是高温热液下原玄武岩或沙泥岩系的硅碱(硅化、长石化)交代岩,蚀变强孔隙度极佳,是很理想的储体和深部找油气的新的重要标志。
- (5) 地球物理测定的中地壳低速高导体及上地幔软流体实际上都是气储体、气源体。另外,二维、三维地震剖面中的模糊带并不是简单的信号紊乱而是很宝贵的排气通道反映。
- (6) 除地层圈闭、沙体分布等原有判据外,今后要更加重视对气流通道深断裂的探测。
- (7) 过去对海底、陆上冻土带水合甲烷量估算偏低,应当把其下源源不断供应的游离天然气也统计在内,其量就更可观。
- (8) 俄罗斯、乌克兰同行强调要拟定新的理论、方法和技术,以弥补我们所熟悉的上地壳找油气理论对找深气的不足。

杜乐天

2007年10月

前 言

2002年5月20日至24日,在莫斯科召开了《地球排气作用:地球动力学、地球流体、石油和天然气》学术讨论会。会议发布的论文内容涵盖广泛,诸多成果是以前三次地球排气会议(1976年,1985年,1991年)专项研究的延续,仍以地球流体、石油和天然气成因研究为主要议题。

这次会议主题有以下几个方面:

- (1) 地球排气的宇宙观和全球化:在地球各圈形成、演化上流体系中氧和碳的来源。
- (2) 全球碳平衡中的烃类;地球的近代和晚中生代排气作用;气水化合物。
- (3) 在深部流体出口处的生命;地球深部生物圈;排气作用的地学生态观;地球排气对气候的影响。
- (4) 地球流体动力学,流体系统的能量和演化,流体的不稳定性;地幔缕和超缕;地震构造作用和流体机制。
- (5) 深部烃类产生和转化的化学和能量;同位素;流体地球化学。
- (6) 排气通道和油气矿床;深部烃类的局部流;上涌高度;流体源。
- (7) 排气的地球动力学控制、分带性及油气积聚;油气积聚的全球规律;烃类超巨型积聚。
- (8) 烃类矿藏找矿的新思路、预测和战略;可开发油气矿床的近代补充。
- (9) 排气和金属、非金属矿床的形成,它们和烃类的共生等。

由 A. H. 德米特里耶夫斯基和 П. С. 瓦里阿耶夫编辑的《地球排气作用:地球动力学、地球排流体、石油和天然气》论文集,汇编了“地球排气作用的宇宙和全球观点、近地表层圈中排气对地质过程的作用”、“地球流体动力学、排气作用的构造和地球动力学控制,流体地球化学,同位素”、“烃类成因和转变,从地球排气观点看油气聚集作用”三部分研究成果。这些成果突出表明了以下几个方面的新进展。

(1) 研究流体介质不均一性,推动了非线性地球动力学在工作方法和术语方面的新发展、地球流体动力学研究的新进展。主要成果内容:

- ◇ 地球流体状态与高频地球动力学
- ◇ 油气聚集过程中流体系统动力学及其演化
- ◇ 岩石圈的地球流体动力结构
- ◇ 挤压带内具有膨胀储集层之油气次生储层生成的地球动力学控制
- ◇ 鞍状隆起的流体动力学系统的特点
- ◇ 地球排气与地球动力构造重组规律、构造规律因素关系及其结果
- ◇ 油气饱和系统的分形地球流体动力学

(2) 深部排烃(运移通道)概念有预测和找矿价值。大量的研究成果论证了烃类聚集与各种类型切入基底的断裂构造的联系。主要研究成果:

- ◇ 烃藏的流体动力学模型——探寻油气田的理想基础
- ◇ 地球排气的近垂向烃地带
- ◇ 排气的地质筒与天然气田
- ◇ 在更大深度上局部预测探寻天然气藏的新途径
- ◇ 含油气区域基底固结年代-油气分布的区域性分带性的主要原因
- ◇ 裂谷带新生盆地沉积物的现代排气作用
- ◇ 岩石圈地质变形过程中的地球排气机制
- ◇ 黑色页岩的含矿性
- ◇ 岩石圈与油气生成的热液缕
- ◇ 揭示传导烃类的近垂直通道的方法
- ◇ 控制油气运移的环状构造
- ◇ 沉积盆地的壳内地球动力学与预测油气存储带
- ◇ 石油和天然气矿藏行星网状分布机制和性质等

(3) 近年来完成了一些个别油田规模级的调查研究工作,查明了由于有石油通道的原因而表现出储量分布和产油性的不同。研究表明不论对找矿还是油气田开发都需要制定新的战略。主要研究成果:

- ◇ 用深部流体的观点看罗马什金油田形成过程的阶段性
- ◇ 复原性旋回—开发油田增补可采储量的基础
- ◇ 石油供给通道和油田当代补充等

(4) 利用多学科研究方法评价地球流体、烃藏和储层性质。主要研究成果:

- ◇ 根据三组分地质声波测井资料揭示地球流体和气体的垂直和水平运动
- ◇ 大地块体积变形时与流体流动有关的温度异常模拟;
- ◇ 用宇宙方法研究活跃大地构造区和现代地球动力学
- ◇ 根据航天遥感和射气测量资料进行地质低密化带的填图
- ◇ 用遥感资料解释结果预测不同类型的油气田
- ◇ 油气聚集地区的局部地球动力概念的油气探查建模
- ◇ 研究钻井中诱发地震声波发射评价烃类储油层饱和度
- ◇ 采用古水文地质方法研究沉积盆地流体系统
- ◇ 重力场和地球化学异常组成的综合动力学分析
- ◇ 根据油井地声观测构造断裂带的地球排气
- ◇ 技术经济地球物理学等

(5) 《地球排气》问题研究扩展的新前景。这些研究和以前一样主要是查明地球排气过程动力学过程中深部流体的作用、规模和深部排气过程对地球烃排气分支近地表地壳带体作用的机制,包括灾变事件,涉及生物圈、生态学和气候的变化等

(6) 对大洋底部烃的排泄进行了大量的研究,特别强烈地表现为泥火山,研究成果表明它与烃聚集破坏无关而与深部流体的局部流有关。研究成果指出与在近地表沉积层中同样属性的烃流量和烃的溢流共生的是天然气水化物。由局部流携带出的烃的规模和速度与烃生成来自沉积岩的有机物质的传统概念不一致。

探讨非生物油气的地质基础理论问题和资源前景是当前学科前沿之一。世界诸多学者坚持不懈地探索,已取得的重要进展表明该领域油气资源令人鼓舞。我国学者通过广泛而深入的研究,已在松辽盆地发现了非生物成因天然气藏。从科学发展思路看,改变传统观念,创新知识和理论具有重要的科学性和国家能源需求上的迫切性,是拓展我国油气资源勘探领域、改善能源结构的重大战略实践课题。

本书介绍的研究成果对我国深入探讨非生物成因的地质基础理论和资源前景研究有极重要的参考价值,为石油地质勘探科研工作者、石油院校和地质院校的教师和学生提供了丰富的资料。

参加本书翻译工作的有黄学、牛彦良、陈树耀、崔永强、要丹、苏勇、章黎萍、段荣杰、马启贵、王公举、任俞、陈林凤、张威、刘颖、王兴无、陈琳琳。校对工作由陈树耀、陈祖伊完成。

在本书编译过程中,核工业部北京地质研究院杜乐天教授给予了指导,也得到了大庆油田有限责任公司勘探开发研究院原副总地质师郭占谦的帮助,特此表示衷心的感谢。

译者

2007年8月

目 录

地球排气问题研究的主要成果及前景	1
地球排气乃是全球性自组织过程	2
地球排气作用的地质效果	3
一 地球排气作用的宇宙和全球观点、近地表层圈中排气对地质过程的作用	5
甲烷的来源和甲烷流	6
建立“贝加尔湖”大系统模型的方法	6
自然界中水循环和油气聚集的形成	8
行星和卫星内生活跃性的解释:内生活跃性周期性的性质和机理	9
有益矿产石油和天然气矿藏行星网格状分布的机制和性质	11
论地球氢呼吸问题	12
雅库茨克冬季条件下地球深部排气作用可能对平流层化学性质有影响	15
液压火山(地热水力冲量)及地球深部排气作用的脉冲是 2001 年春天里海中部鱼类大量死亡的可能原因	16
地幔还原流体与地球物质化学分异的关系	17
地球排气对形成黑海硫化氢地带的影响	18
地球和金星全球性排气作用的特点	19
系统的特征,地球、超大型矿床和前生命的流体——岩浆成因性质	20
地球流体系统演化的周期性	21
地球排气作用与生物圈碳循环	26
地下水氧的成因	27
微生物过程在岩石圈中气体改组的作用	28
微生物在岩石圈中分子气态氮的形成中所起的作用	28
再论地球的汞排气作用	29
地球排气的宇宙观,烃的起源与分布	31
全球大地构造流体说	32
地球流体的活动性和自然界的灾害、风险	34
黑海内的排气规模	35
深部排气作用是大洋异常生物产率的原因	36
地球排气作用和主要的气候变化	38
植物矿物供给气田区	39
地球排气 - 生命 - 石油	41
二 地球流体动力学 排气作用的构造和地球动力学控制 流体地球化学 同位素	43
形成地球、月球轨道旋转运动可比性的涨潮力对地球、月球内部的耗散性加热	44
地震和火山喷发的气溶胶前兆与地壳变形的联系	44
监测阿斯特拉罕硫凝析气藏地壳大地构造活跃性方法的选取	46
构造断裂地区氢排气研究的新方法和地震预报(以 1999 年土耳其的地震为例)	46
含油气盆地的形成机制	47
根据水文地球力学及重力测量资料对地球潮汐进行分析	48
地幔缕分形构造系统及其与地球排气作用和金属矿床成矿的关系	50

流体卸载于外生作用圈强度的地质动力学指针	51
地球固粒子和地球排气作用	53
土层和淤泥中气体对海洋钻台设备和油气工业建筑稳定性的影响	54
有机化合物及其他形式的碳在宇宙中的分布	55
中央亚洲褶皱带巨大断层带中流体动态与地震构造作用的相关性	56
达格斯坦和里海水域可能是前行星成因的还原气体(分子氢)排泄区之一	58
含铜沙岩矿床与含烃类沉积页岩的共生联系	59
冰岛裂谷区热液矿物及火山岩中的多环芳烃	61
轻气体的上升流,岩石圈的不稳定性和地震作用	62
巨型油气田和金矿床矿物中流体包裹体地球化学与构造-地质控制的相似性	64
大洋和大海条件下自然天然气显示的某些特征	64
交代岩体系中的还原流体	65
地幔橄榄岩的蛇纹石化和地球的流体动态	66
用宇宙方法研究活跃大地构造区和现代地球动力学	67
研究钻井中的诱发地震声波发射评估烃类储油层饱和度	68
变质成因的碳流体可能是地台铝土矿形成的原因	69
地壳排烃作用可能是引发通古斯事件的原因	71
俄罗斯科拉半岛 CT-3 井和德国 KTB 及瑞典格拉夫贝尔格科学超深研究钻井 结果的可选的通用评价	73
烃类气体的扩散晕圈是西伯利亚地台南部沉积地层油气藏排气作用的指示剂	74
蛇绿杂岩岩区形成的深部条件与气体的联系(以小高加索为例)	75
根据三组地质声波测井资料揭示地球流体和气体的重直及水平运动	77
地壳的固相和液相分界面上铀同位素组分的形成	78
地壳的深部褶皱作用和排气作用	79
固结地壳的地球排气作用和流体体系	80
论氦高活动性的可能本质	82
黑海水域重力场和地球化学异常组成的综合动力学分析	83
大地块体积变形时与流体流动有关的温度异常的模拟	84
穿地幔流体和成矿作用	86
泥炭形成的内生因素	86
地球大陆半球的扇形构造及其对地壳内烃类聚集和金刚石分布规律的影响	86
阿斯特拉罕鞍状隆起的流体动力学系统的特点	88
根据物理-化学特性预测海洋地震带的地震	89
烃类和黄金共生组合的同位素——地球化学特征	90
地球上碳同位素循环中的分馏作用	92
前寒武纪的“黑烟囱”	93
地幔排气和分异过程中碳同位素成分的演化	95
高温、高压条件下由矿物合成烃类	96
塔曼(俄罗斯)和格鲁吉亚东部泥火山流体生成的深度	97
论烃类参与鲍托戈利(东萨彦)碱性岩体中石墨矿形成的可能性	99
贝加尔裂谷带——最古老的地球深部排气构造	100
含水花岗质岩浆的排气作用:岩浆成因流体形成时氯和某些成矿元素(Zn、Pb)的性状	101
论生成 CO ₂ 和 CH ₄ 的某些条件	103
乌克兰喀尔巴阡热液矿脉形成时古流体动力学的某些特点	105
西伯利亚地台南部烃类流的主要迁移相和方向性	107
地核中的大爆炸“诞生”了石油、天然气、金刚石和金属	109

地球动力场构造重组的规律性·····	110
沃罗涅日台背斜南坡石炭纪沉积流体组分形成时北卡缅斯基断裂的作用·····	111
希宾和洛沃泽尔霞石正长岩体矿物中及与其相关的磷灰石和铈铷钙钛矿矿床上 烃类气体的分布与成因·····	111
形成科拉省古生代碱性岩杂岩和碳酸杂岩时氦同位素是岩浆排气作用的来源及其程度的指示剂·····	112
化学元素合成与裂解的动力学中地球物质的排气作用·····	113
铜-镍侵入体的排气作用·····	114
锡-钨矿床形成的氧化-还原体制与深部物质排气作用的联系·····	116
岩石圈的地球流体动力学结构·····	117
地台沉积盖层中水成矿作用·····	119
根据地震声波断面资料分析阿尔戈盆地沉积盖层中的流体化源·····	120
地球流体动力学:油气聚集过程中流体系统的动力学及其演化·····	121
热列兹诺沃茨克油田气体地球化学测量结果·····	122
海底(黑海)泥火山分布区中碳酸盐的碳和氧同位素成分·····	123
(大西洋的加地斯湾)流体水下排泄区中天然碳酸盐岩筒碳和氧同位素成分·····	124
洋底喷溢的拉斑玄武岩冷凝边玻璃中的挥发组分——准地幔岩浆的脱流体化产物·····	125
大洋岩石圈的蛇纹石化作用和深水海槽区强大的轻质同位素甲烷流·····	126
岩石圈地质变形过程中的太阳系宇宙和全球性韵律及其地球排气机制的反映·····	127
煤化流体的形成及掌握列依夫曼-瓦索萨耶维奇系数变化动态的必要性·····	128
恒定条件下热分解时矿物对 II 类有机物质的影响·····	129
根据航天遥感和射气测量资料进行地质环境低密化带的填图(以莫斯科域为例)·····	131
自然过程中不同形式的氢和碳的作用:烃成因的新观点·····	131
采用古水文地质方法研究沉积盆地流体系统·····	133
论黑色页岩系的含矿性·····	134
地幔流体在形成东西伯利亚隐生宙烃类系统中的作用·····	136
气体-流体流对深层黏土岩储层和烃潜力的影响(以秋明 CT-6 钻井地区为例)·····	136
环状构造是地球排气的结果·····	138
地壳中的块状底辟构造和矿床·····	138
在暗色岩建造中烃类流体流·····	139
高加索西北地区沉积物流体组分的同位素地球化学特征·····	140
决定全球性排气的出现、构造和规律的因素·····	141
根据油井地声观测构造断裂带的地球排气·····	143
造山带流纹岩中含金属显微包裹体的成分变化——下壳层烃类流体演化的指示剂·····	143
卡累利亚早元古代有机物质的迁移方式·····	144
不同类型热液系统沉积的烃成分·····	145
大洋热液沉积的沥青和烃中碳同位素的异常分布·····	147
论爆发金伯利岩筒中石油和金刚石推测的共生组合·····	148
水文地质回返、石油聚集和金属成矿·····	149
与蛇纹岩底辟形成有关的地幔烃流体的上升和改组·····	150
从高频地球动力学的角度看地球流体状态·····	152
非传统地震勘探方法的发展·····	153
三 烃类成因和转变,从地球排气观点看油气聚集作用·····	155
沉积盆地的壳内地球动力学与预测油气存储带的新希望·····	156
含油气境域的现代地球动力学是地球深部排气作用的反映·····	157
西西伯利亚北部排气的地质固体筒柱与天然气田·····	158

西西伯利亚超大型油气田分布和油气存储的地球动力学控制及规律性·····	159
俄罗斯地台深部(地幔)烃类气体:资源量以及烃气藏所在的最可能位置·····	160
岩浆作用对西伯利亚地台含油气岩组中含金属卤水成分的影响·····	161
纳迪姆河-普尔河-塔佐夫河间地区甲烷碳同位素组分的变化规律·····	162
硫酸盐还原对地球深部烃保存程度的影响·····	163
西西伯利亚北部油气田天然气碳同位素组分分布特点·····	164
阿斯特拉罕凝析气田的奥伦堡凝析气田地层水与地表水中氢氧同位素成分的对比研究·····	166
卡尔平斯基山脊海洋延伸部分深部流体排泄的地震证据·····	167
古地台含油气省深部流体化作用的显示·····	167
用深部流体的观点看罗马什金油气田形成过程的阶段性·····	169
含油气性盆地流体系统转变的岩石成因学特征·····	171
地球近垂向烃类排气地带·····	172
深部烃类流体的局部流动地带与气体水合物聚集之成因·····	172
索宾烃类聚集田之上的地表地球化学场·····	174
油气分布的区域分带性是地球烃类排气的结果·····	175
基于流体动力学基础的烃类聚集的评价、预测和普查技术·····	176
复原性旋回——开发中油田增补可采储量的基础·····	178
油气饱和系统的分形地球流体动力学·····	179
西伯利亚地台石油和天然气的地幔生成假说·····	180
技术经济地球物理学:在预测和开发油气田中地球物理学的新机遇和任务·····	182
地壳内非生物催化合成烃类物质的模拟结果·····	183
贝加尔裂谷带新生代盆地沉积物的现代排气作用·····	184
挤压带内具有膨胀储集层之油气次生储层生成的地球动力学控制·····	185
季曼山脉的生油潜力·····	187
天然烃类系统的双源——双组成部分·····	188
西西伯利亚早侏罗世、前侏罗纪岩组断面中断裂带和动力集中带及其在形成烃藏中的作用·····	189
岩浆生油的途径:流体包裹体——构造运动——排气——油田·····	190
沉积岩层中深部流体构造指示剂·····	191
形成烃藏的流体动力学模型——探寻油气田的理论基础·····	192
西伯利亚地台的地球动力学及其在形成分散状和浓集状物质形态中的作用·····	194
石油烃成因的新观点·····	195
在更大深度上局部预测和探寻天然气藏的新途径·····	195
人造天然气圈闭以及屏蔽层在气田形成中的作用·····	196
石油供给通道和油田的当代补充·····	197
地球的旋转运动及世界上最大含油气省的分布·····	197
季曼油气省的岩石地球化学和水文地质化学判据·····	198
环烷成因有机概念和无机概念的趋近·····	200
论天然气水合物和石油的性质·····	202
天然烃类体系的同位素——地球化学模型·····	203
通古斯台向斜地下水和天然气的排泄带·····	205
从地球烃排气的概念看第聂伯-顿涅茨盆地含油气性的特征·····	206
在第聂伯-顿涅茨盆地边缘找烃藏的新战略·····	207
基底的碳酸和氢的喷气对形成石油成分的影响·····	208
濒皮亚特坳陷的地动力学控制,排气作用的分带性与其含油气性·····	208
地质介质异常的地球物理和地球化学参数中深成作用的反映以及烃聚集预测的 新方法和探查的新策略·····	210

地球排气问题研究的主要成果及前景

A. H. 德米特里耶夫斯基 B. M. 瓦利亚耶夫 俄罗斯科学院应用地球物理学科学研究所

在 20 世纪后半叶地球排气问题引起地球科学各个领域专家们的注意。Y. 拉比和 A. П. 维诺格拉多夫^①的著作曾指出了不仅仅在大气圈和水圈形成中地球排气过程起主导作用。并非是熔融物体,而是流体和气体,在携带出一系列元素(对于生命和形成可燃矿产矿藏最为重要的)到近地表地壳中以及随后它们在地球物质分异作用过程中重新分布起着决定性作用。包括与火山现象有关在内的排气作用是生物圈中严重的灾变(H. M. 斯特拉霍夫著作中的生命《爆炸》,生物灭绝)的原因。稍后,A. E. 罗诺夫断言地球上的生命处于深部排气作用的完全控制下,这些作用不仅决定着规模而且也决定着本身地球上生命延续的可能性。

研究和了解地球排气作用的新阶段是在 50 年前开始的,在 П. H. 克罗泡特金在《欲写不能》一书中揭示了地球排气的烃(《冷》非岩浆)分支之后。与此同时,在 Д. C. 科尔任斯基著作中确定出现在这种《穿岩浆》溶液中还原流体(氢)最重要的作用,这些流体决定着岩浆的和交代作用过程的特征。因此,不仅在岩石学方面而且在大地构造方面以及在金属矿床和含油气矿藏的形成方面查明了地球排气过程流体更为活跃得多的作用。在一系列科学研究方向中(B. A. 扎里科夫,Ф. A. 列特尼科夫,A. A. 马拉库舍夫)深部过程的流体动态具有系统的方向性。

从 1976 年到 1991 年期间,П. H. 克罗泡特金曾以发起人并主持进行了三次全俄《地球排气与大地构造》会议。正是这些会议为专家们提供了从地球科学不同分支中共同收集和讨论发展成熟的问题的可能性。在最后一次也是第三次会议(1991 年)在它的题目中凸显出三个主要方向:成矿—岩石学;石油—天然气和地球流体动力学。还拟定了两个新的方向。其中之一即第四个方向与近代排气及其对大气圈、水圈和生物圈影响中的过程的相互作用有关。另一个,即第五个方向把涉及深部流体(首先是还原性流体)在成岩过程、层状金属矿床和固体可燃矿产矿床形成过程中的研究工作综合在一起。

本次地球排气会议在许多方面保留以前的三次会议专题继承性。虽然会议命名有某些变更,但是地球流体、石油和天然气永远是本次会议议题的根本。究竟什么样的资料 and 思想在本次会议能够获得基本的反响?首先,什么样的问题和课题已经成熟有待讨论并进一步予以解决?

在最普遍和最主要的层面上依然是地球流体在大地构造和岩石学过程中能量的作用。这里 Ф. A. 列特尼科夫和 A. A. 马拉库舍夫著作中把核心作用赋予氢,并且是来自地核的氢。和原先一样,在许多岩石学家的著作中还原性流体仍然没有其位置及被认可;这恰是这次研究会议讨论的主要对象之一。应当指出,随着层析方法的发展,全球地球动力学作用的根源的研究已从上地幔的水平发展到地核。

从 1991 年起的过去 11 年间,由于大气圈的地球化学监测,世界大洋研究结果获得了有关地球排气问题大量资料。这些资料以及从格陵兰和取自南极洲冰岩心的天然气研究结果不仅查明,地球烃排气的规模,而且还查明了地球排烃参与对地壳表层过程中的相互作用,有时对海洋和大洋的近底部环境的生命活动和气候产生灾难性的后果。实际上,在沉积作用中沉积物异常富集有机物质本质上由于利用了深部还原流体。然而,考虑到深部甲烷进入到大气圈中的规模,它的氧化产物对于光合作用和有机物质本底含量的聚集提供了重要的补充碳源。从而提出重新审视,至少是从本质上改变在研究深部的、区域的、局部规模上现代和古代碳平衡这个误区的必要性。

最近 10 年来研究流体在地球动力学方面的作用发生了变化。对于与地震活动性和地震预报有关的流体变化、流量的不稳定性、同位素化学组分变化给予如此大的关注。与认识由于流体介质不均一性有关的成果获得了进一步发展,这些成果推动了非线性地球动力学在工作方法和术语方面的发展。流体迁移通道研究已经不仅仅将其与断裂变形相联系,而且深入到地质介质(空间)构造重组的框架。在海洋和大洋底部的沉积剖面中,深部流体侵入和溢流通道常常与贯入构造(底辟褶皱和前底辟褶皱—VAMP'S)有密切的联系。其实,像地球地幔这样的构造属性(地幔缕、超地幔缕)一样,同样是深部能量释放和深部流体排泄的最重要构造。

最近几年在上地幔烃系统状态的热力学的建模中和在它侵入沉积剖面沿途径上的转变研究已取得颇大的进展,完成了近似自然条件下(在催化剂上)非生物合成石油。开始重新审视化学石化物(在石油中的生物标志)的性质,看来它们大部分不能认为是生物标志。发现可能有外来生物标志物加入石油组分,它是深部烃流体石油天

^① A. П. Виноградов—Александр Павлович Виноградков (1895—1975 年), 苏联地球化学家, 苏联科学院院士

然气聚集形成过程中细菌活动的结果。

大洋底部烃的排泄研究,特别强烈地表现为泥火山,表明它不是与烃聚集的破坏有关而与深部烃流体的局部化流有关。与在近地表沉积层中同样属性的烃流和烃的溢流共生的是天然气水化物。由局部流携带出烃的规模和速度与烃生成来自沉积岩的有机物质的传统概念一致,需要开发有局部烃流参与的烃聚集形成的新模式。

深部排烃的概念有预测和找矿价值。在大部分著作中论证了烃聚集与各种类型切入基底的断裂构造的联系。当然,有许多著作在近几十年来的时间内在鉴别这样属性的断裂及与其有关的烃迁移通道贡献了大量的成果。

近年来,完成了一些个别油田规模级的调查研究工作,以查明由于有石油通道的原因而表现出来的资源分布(储量)和产油性的不同。在如此规模的工作中,由于可能产量为了乐观应用使它的实际价值急剧的提高,利于不论是找矿还是开发都需要制定新的战略。

然而,在最近几年来不只在俄罗斯而且也在西方出现越来越多油田开发过程中可能增补其资源问题方面的工作,其中包括由于最终采油量与计算的初始储量之间有很大的偏差。从深部烃排气机制和油藏的形成和再形成的角度,可能存在开采进程中资源的补偿,实际上重要的问题需要认真的研究以探索更有效地开发矿藏的可能性。在这方面研究中最重要的一部分应当是深部烃侵入通道和烃的局部流。

在第五个方向的研究中与深部排气对岩石成岩作用的研究、对固体燃料矿产的成因和一系列层状矿床的成因的研究等,在这些方面获得的进展主要与地球排气的《热》分支的认识有关。

地球排气的《冷》分支产物的成因在许多方面仍有争议。产生额外的复杂性是由于那些同位素地球化学判据没能够给出单义的解释。确实,再循环沉积和地壳物质在地幔中的再循环可能导致在地幔流体和熔融物中显示出活化和再生的结果。甚至采用以前(如在研究石油)未曾使用过的同位素体系(Pb, Nd, Sr)来揭示它的成因有可能得出有选择的解释和理论。因此,深部烃成因问题的讨论是非常及时的,特别是以大量的单义的地质资料为依据的讨论。

一段简短的评述中不可能引用到具体的著作及其完成的研究。由于这个原因评述也远远不是完全的,还想指出《地球排气》问题研究的扩展最新前景。这些研究和以前一样主要与查明地球动力学过程中深部流体的作用、规模和深部排气过程对地球近地表地壳体作用的机制,包括灾变性事件,这首先涉及生物圈、生态学和气候。在形成有益矿物的矿床上,在矿产的预测和找矿上,了解矿床中有用的少量组分(杂质)的成因方面对烃排气分支还没有足够的研究。特别是对于固体可燃矿产的矿床需要建立可燃矿产(包括天然气水生物,泥炭,可燃页岩,含沥青岩)的更新的成因观点。

地球排气问题科学研究协作不论是以前还是现在均很困难。额外复杂性是由于这个问题涉及许多科学学科的结合,其中包括地球科学以外的范畴。况且通过俄罗斯、乌克兰、阿塞拜疆和一系列其他进入独联体成员国家的科学院的共同研究,将能够取得非常好的效果。本次大会结论之一是最好能通过一项决议,联合不同国家专家们的力量研究不仅具有重大的基础意义,并且有着巨大实际意义的《地球排气》问题。

地球排气乃是全球性自组织过程

Ф. А. 列特尼科夫 俄罗斯科学院西伯利亚分院地壳研究所

Earth's degasation is the act of it's self-organization. We can distinguish two main branches of supplying fluid systems; the whole planetary near surface systems and deep ones, which connected with non-linear development of the liquid Earth core, where the fluids are ejected as plumes. The carbon concentrations in sedimentary layers are formed at cooperative influence of deep carbonaceous fluids and the carbon from sedimentary rocks.

行星地球最初由气体—灰尘物质形成其随后的演化是地球的自组织行为。太阳和月球的万有引力作用是地球的外部支配参数(形式),而根据 Ю. Н. 阿弗休库的意见太阳—地球—月球系统中质量中心状态的变化是这种互相作用的结果。这个系统中发育的非线性特征在很大程度上决定着作为一个宇宙体的地球发育的动力学参数。地球是一个开放的不平衡的动力学系统;在地球形成的地质时间区间(~45 亿年)发生间歇—连续的从地球内核排泄流体组分。这一过程包含着地球全球排气的概念及地球排气在地质过程中起决定性作用的概念—这是 П. Н. 克罗泡特金在其著作中不止一次强调过的根据地球的内生活活动性判断从太古代到新生代排气过程可划分

为两个分支:

(1) 全行星单调衰亡式排气,具有岩石圈上层流体组分耗尽和流体前缘陷入深部的特征。因为深部流体是万能的热载体,则在太古代—新生代期间深部流体系统的能势不断下降。内生系统这一作用的结果是:从太古代为面式的,元古代为区域性的,在显生宙为线性的,在新生代为不连续性的。全行星排气源地是岩石圈(一、二百公里)。

(2) 在全行星单调式排气的背景上出现被解释为地幔缕的强烈的地球液态核排气的脉动,根据地质化学和岩石学资料判断,地幔缕以其构成组分的主要成分相区别。还原性气体,首先是氢为构成地幔缕的基体。在地幔缕作用下,根据岩石圈岩石改组产物划分出两种主要的不同类型地球液态核产生的流体系统:氢—碳和氢—硫的流体系统。可能萌生于液态核的不同深度层。以氢—碳系统基础上生成碳酸岩而在较小深度上—聚集烃。烃—硫的类型乃是形成硫化物聚集和在较小深度上火山杂岩的硫—硫化氢系统的基础。

地幔缕是通过热爆炸机制从液态地核中析出的,这种热爆炸决定着系统的不稳定性和把气体聚集排出液态地核,进入地幔。在地幔缕脉冲式析出的背景上,发生地球整个液态核的全部不稳定性,导致超地幔缕的喷发,这种喷发对岩石圈的热效应可持续几千万乃至几亿年。

从液态地核排出的地幔缕气体流,其温度 $T \sim 4000^\circ\text{C}$ 和压力 $P > 10$ 万 MPa。这样的喷射流“烧穿”地幔;氢流大量地同氧基体相互作用并且这个过程是放热反应。热能损耗的补偿能使地幔缕达到岩石圈上部层和激活软流圈的流体系统。沿着自己的路径在地壳沉积岩系中形成和聚集烃是一个合作的协同的过程,当发生两大还原系统相互加强的时候;深部的氢—碳来自深部大断裂系统和碳处于沉积岩中。因为地球的“老化”过程为单向的和不可逆的,它的每种状态均对应于自己的排气体制,而在内生的流体系统占优势的类型反映出全行星水平上的地球自组织不同的阶段,而对于个别的排气段则也反映岩石圈成熟度的水平。

该项成果(工作)是在俄罗斯联邦基础研究基金会的财政支持下完成的(项目号 02—05—64065)(项目号 00—15—98573)。

地球排气作用的地质效果

A. A. 玛拉库舍夫 俄罗斯科学院矿物学实验所

The Earth initially separated from its parent hydrogen protoplanet as a molten core. Under the action of the Sun the protoplanet has experienced surface outgassing and lost its hydrogen envelope. The rock-iron layering of the Earth occurred under high pressure of the hydrogen envelope of the protoplanet and Earth's iron liquid core has accumulated a great quantity of hydrogen and other fluid components. The paper deals with the Earth's endogenic activity governed by fluid flows ascending it's core.

地球的独特性在于其超常的内生活活动性已持续了 46 亿年,而金星、火星和水星的内生活活动的发育总共只有 20—30 亿年。行星的这种差别是由于其早期原行星在其与木星相似的母体原行星核部以熔融核形式发育的特殊性。在这些原行星发育中地球比地球族的其他行星演化得更远,这表现为在其流体壳巨大压力下在原地核核部发生铁—硅酸盐的分层。这就决定了在地球熔融的铁质内核流体的高度浓集和相应的内生活活动的持续性。与地球不同其他行星的分层较晚,在太阳的作用下母体原行星的流体壳失去之后的行星演化的自身行星期。由此决定了没有很多流体组分保存在熔融的核内并且完全凝固的时间是有限的这个观点出发,金星、火星和木星的发育,与致密的巨行星的卫星相似,由在离心力作用下与其流体壳剥离,并逸散到宇宙空间的真空中。

在地球内核中聚集了氢—氢流体,它含有许多组分(CO 、 CH_4 、 H_2S 、 HCL 、 HF 等)和重烃类和能量密集型物质,和与氧的化合物— $\text{C}_7\text{H}_5(\text{NO}_2)_3$ 等。在流体向上迁移情况下,它是向地球构造圈中输送地球内核能的特殊载体。氢流把能量从地核携出进入地幔和地壳而自身属于一种亚稳定态的聚集,在此基础上,生成地震源,并由于下列稳定化反应: $14.5\text{H}_2 + \text{C}_7\text{H}_5(\text{NO}_2)_3 = 3\text{H}_2\text{O} + 7\text{CH}_4 + 3\text{NO}$, 随其析出巨大的能量。可见,地震确认了向上运动的流体流。

地球内核排气过程有助于在地核核心部位的固体镍—铁微粒的结晶,结晶作用伴随熔融地核中流体压力增大但又被地核排气的脉冲所中断。

大洋断裂构造(中脊)是地球排气的主要方向,浅震源地震的震源(达 60~70km 深都趋附于这些构造)。它

们有规律地卷入这些构造的流体—岩浆活动,这些活动决定着大洋岩石圈板块从其向两侧伸展,表明着扩张(Spreading)。

在大洋板块缓慢扩张时出现其沿被动大陆边缘下沉的条件,补偿了由大陆剥蚀来的碳酸盐—陆源沉积的地槽堆积。

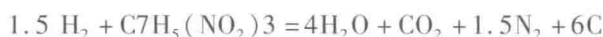
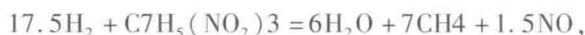
在全部地质史期间这样的地槽沉积状态被地核排气中断构成了地壳变动周期。在这些周期,大陆边缘的地槽沉积在大洋板块侧向压力作用下转变成褶皱带,移向大洋中部裂谷构造的一侧。随后通过俯冲作用板块楔入新生成的褶皱带之下,与大洋深海槽分开。大陆和大洋构造的分界处表现为深海槽,并与达到地核的深断裂一起下沉于大陆之下。正是这些深断裂缔造了由活动大陆边缘固有的地震震源所记录的排气作用的方向。

按照其最大震源深度把地震划分为,与造山隆起带(褶皱带)一致的中深地震(60~300km);和投影到边缘海和造山带后方和大陆上的其他裂隙洼地深地震(300~700km)。大陆活动边缘的深部(地幔)地震活动性与达到地球表面的浅深的(地壳的)地震活动性共轭,表现为其固有的火山和构造现象。

地震特征,所提及的活动大陆边缘和构造带呈共轭发育,然而造山带地表隆起带发生在活动大陆边缘转变为被动大陆边缘(地槽)进程中,叠置在造山隆起带之上的裂隙洼地之前。

形成地壳的造山带构造在深部流体流向上移动作用下经受彻底的改造,发生在所谓大陆壳深部400~600km处地幔在它的影响下经历了强损耗(纯橄榄岩化)。流体把来自地幔的硅铝组分进入地壳解释了由于地幔物质的加入而使地壳厚度增大,地壳的总体去基性化,主要为地壳性质的造山火山和深成岩浆作用的发育。

相反,裂隙洼地的造山带构造以发育地幔岩浆作用为特征,此岩浆作用决定着在上升流体流作用下地幔物质的大量熔融。经过超基性的熔融体的过滤,流体促使地幔熔融体侵入地壳,并交代其下部,同时,流体对于硅铝壳来说具有侵蚀性,因而在流体的作用下硅铝壳物质发生溶解并被携带到地表水体中,因而生成裂隙构造所固有的洼地,这些构造具有与莫霍面隆起区共轭的特征。在渗入被交代物质的穿岩浆流体流的参与下发生岩浆交代,从被交代物质中迁出对于侵入的岩浆是多余的组分。因此,超基性岩浆交代伴随着被交代岩石硅铝质组分特别有效的携出。为所见到的,洼地硅铝壳厚度减小,直至在超基性地幔最大隆起带上硅铝壳完全消失现象作出一个主要解释。根据充填洼地岩石的组分,地台上的拗陷划分为沉积的和火山的(暗色岩)。它们对应于引发地震源的上升流体流的不同特征,例如:



在烃—水成分时原生岩浆侵入到地壳底部下层时发生微弱的分异作用,这里的拗陷内充填的主要是沉积岩石。

这种状态下岩浆作用局限于深成相,不论是对于火山成因的还是碳酸盐—陆源陆台型的洼地,确保了莫霍面的抬升。

以沉陷是其固有性质的含油盆地属于类似的建造类型,深部烃的进入刺激着拗陷中生物群的发育,这决定着烃藏的多元成因。石油的生成有规律地卷入地球内生活活动性系统,对应于其有节律的特征。

流体的碳酸—水的特征使地幔熔融体的基性—超基性岩分层致使增强了其活动性。与此同时,与超基性熔融体的贯入同时的洼地中(暗色岩)基性岩浆到达地表,形成玄武岩覆盖这个过程能够具有巨大的幅度并与大陆地壳洋壳化(陆地成浅海变成海湾过程)相结合,导致形成次生大洋的边缘海。

地台洼地的形成很有规律地与沿其周边地震壳源震源的发育有关,壳源震源然后移向其中心地带,例如里海盆地。

这一规律性通过地震高发区(例如中亚地区)的震源迁移凸显出来,这些地区的地震震源随时间逐渐集结在其中心地区。可能这在属于“古陨石坑”地台洼地的发育中能得到反映。这些洼地的发育通常以其中心部位地台结晶基底的爆炸式逆断层结束伴随发育爆发岩颈,其中包括含金刚石的岩颈。

一 地球排气作用的宇宙和全球观点、
近地表层圈中排气对地质过程的作用

甲烷的来源和甲烷流

B. B. 阿图什金 俄罗斯科学院地质圈动力学研究所

Represent new results about investigation of the methane sources and streams. Determination a total methane stream from surface of Earth into atmosphere depend on intensity of the methane concentration increase, quantity of methane into atmosphere and distribution of the methane concentraton depend on altitude.

在温室效应机能活动中起重要作用的当属甲烷。根据现代观点,甲烷在平均温度的增量中约占总温室效应的15%。研究表明,目前在大气层中甲烷浓度的增长比二氧化碳气要快,现今的浓度在50年后可能增长一倍。

考虑到不同的甲烷和碳酸气物质释放在温室效应中,甲烷的单位^①贡献几乎是碳酸气单位贡献的30倍,甲烷在形成温室效应中的作用在未来的世纪中将超过碳酸气的作用。本文列举甲烷从天然的和人类活动源进入大气圈的研究成果,这些源既可以在地表,也可以在地球深部。是进行大气圈中甲烷浓度变化的历史数据的小结。

本文列举了不论是分布在地表还是地球深部的自然的和人类活动成因的甲烷进入大气层的研究成果。对大气层中甲烷浓度变化的历史数据进行了小结。在地球的不同地点和一年不同的时间测量的近地表的大气层中甲烷浓度颇大的情况下,甲烷现在的平均增长速度是 17 ± 1 ppbv/年($1 \text{ ppbv} = 1 \times 10^{-9}$ 单位体积),相应于甲烷在大气层中的量^②增长额为 48 ± 3 百万吨/年。在最近200年内工业化发展的时期,大气层中甲烷浓度由700 ppbv增加到1700 ppbv,而且目前在大气层中甲烷全部量大约是5000百万吨。根据大气层中已知的甲烷量、近代甲烷浓度增长率和观察的甲烷浓度的高程分布计算出要满足上述数据的来自地球表面的甲烷流的值。

在解决这项任务的过程中考虑到以下因素:甲烷浓度随高程的分布取决于甲烷在光化学作用中的分解和甲烷从地表向上迁移之间的平衡,因为在大气圈中不会生成甲烷。曾研究了光解作用太阳辐射对甲烷氧化及其分子破坏的所有必要的物理-化学作用。结果确定,随着因大气圈高度和温度而变化的氢氧化物浓度分布必须有其量为 3000 ± 600 百万吨/年的甲烷流从地表进入大气圈。而根据许多研究甲烷循环工作的数据,进入大气圈的整个甲烷流只有500~1000百万 t/a。以前的评价与获得结果有如此巨大的差别,按我们的看法是因为在以前研究成果中没有充分考虑到来自岩石圈非生物成因的(热系统OX、扩张带地区、流体的“嘶啸”、变质作用过程、泥火山、天然气水合物矿藏、天然气田、石油田和煤矿)甲烷流。

根据所进行分析结果指出,全部甲烷流来自3组来源:

- 自然界生物成因甲烷,数量上大约为540百万吨/年;
- 岩石圈和水圈的非生物成因甲烷,数量上大约为1360百万吨/年;
- 人类活动成因的甲烷,包括由农业活动进入的、开采有机燃料时散失的、和工业废弃物的甲烷,数量上大约为1100百万吨/年。

建立“贝加尔湖”大系统模型的方法

O. Ю. 阿斯特拉罕采娃, И. К. 卡尔波夫 俄罗斯科学院西伯利亚 A. П. 维诺格拉多夫^③地球化学研究所

“贝加尔湖”热力学多系统系指最终的相组合及其各构成组分,这些组分能在给定温压变化区和系统的总体化学成分变化区先验上处于相互平衡状态。

究竟这个组合的哪些相及其构成组分及什么量在给定的固定温度、压力值和化学成分下将代表平衡成分,先验上是未知的。

在确定平衡相及其组分成分是地球化学和岩石学研究中进行物理-化学建模的主要任务。

我们工作的目的是以用热力学势能极小化方法和引入现代的协同的矿物和水溶液组分热力学数据库建立物理化学模型为基础,确定贝加尔湖的基本物理-化学参数。随平衡控制因素(温度、压力和生物化学流量)变化

① 原文中没有“单位”的概念,但从全文理解应当是“单位贡献”。

② 原文为“含量”,但无论从上下文的意思,还是所表示的单位,都应当是“量”,这恐怕是作者的笔误。

③ A. В. Виноградов, Александр Павлович, 维诺格拉多夫, 1895—1975, 苏联地球化学家, 苏联科学院院士。

的主要规律性。

为了实现提出的目标我们开发了构建“贝加尔湖”模型的步骤(图1)。

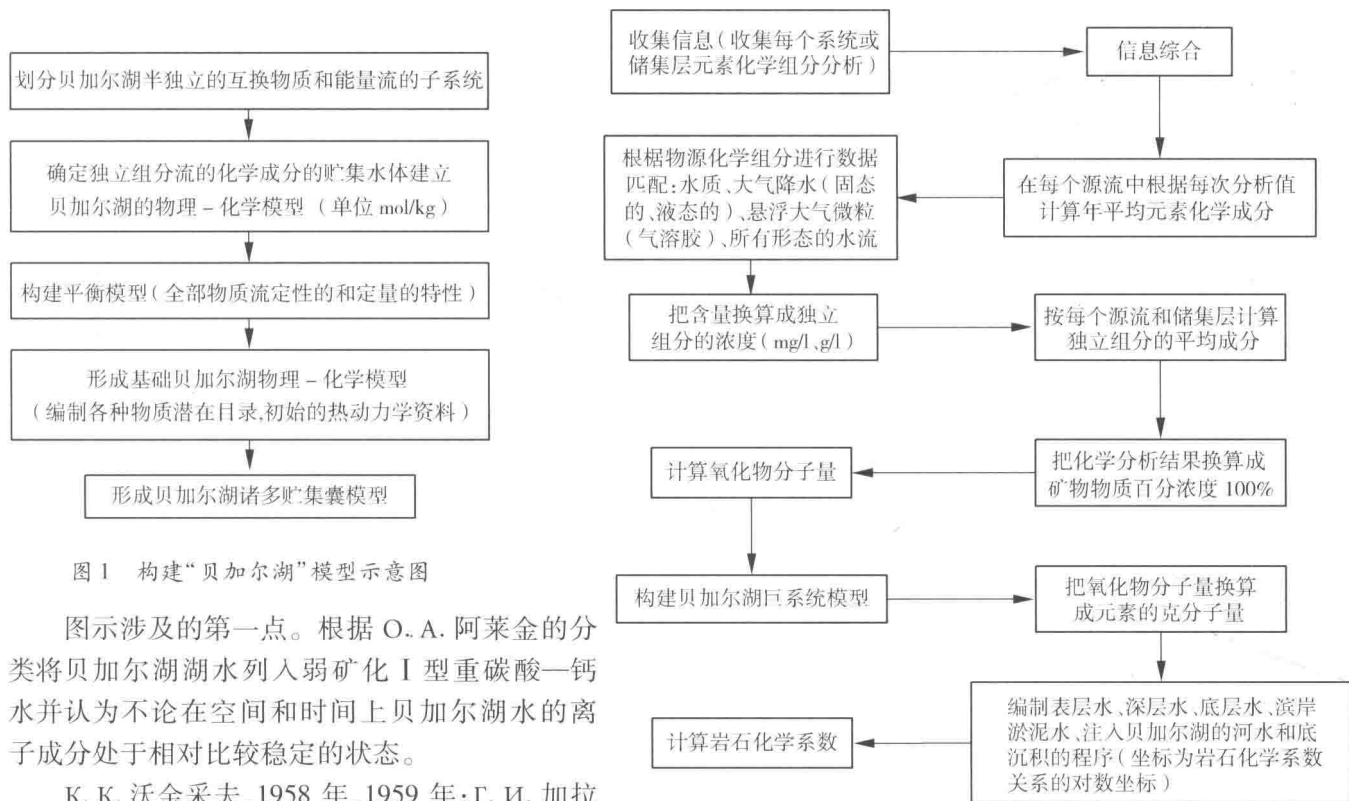


图1 构建“贝加尔湖”模型示意图

图示涉及的第一点。根据 O. A. 阿莱金的分类将贝加尔湖水列入弱矿化 I 型重碳酸—钙水并认为不论在空间和时间上贝加尔湖水的离子成分处于相对比较稳定的状态。

K. K. 沃金采夫, 1958 年, 1959 年; Г. И. 加拉齐检测到的水中组分变化可认为是在允许的一个等级框架之内。

为了实现我们的目标必须给出贝加尔湖的水质量的分类, 该分类可以划分局部孤立的各系统(各储集水体), 在时间上保持其物理-化学特性的稳定并确定各储集水体(系统)之间物质和能量的动态交换的平衡特征, 使贝加尔湖总体上(如同一个大系统)在长时间内处于稳定状态。

在引入水文和气候特征^[1]资料后, 将贝加尔湖划分为五个大地区: 贝加尔湖南区; 受色楞格河影响最大的地区; 贝加尔湖中区; 乌什康叶奥涅斯特洛夫斯基区和贝加尔湖北区。把个别的海湾划分为: 小海、巴尔古津湾和奇维尔库伊湾。考虑到 B. A. 托尔玛切夫(1957 年)、M. H. 希玛拉叶夫的工作把贝加尔湖水由上而下地划分下列储集层: 表层水、深层水、底层水, 底层水还进一步划分为滨岸水和湖心水及淤泥水。

为了证明这些水在洼地里和这些洼地的各层中是不同的, 我们开发贝加尔湖水的下列分类方法。

在图2中可以看出, 水的岩石化学特征各不相同(所以代表着个别的系统), 同一定类型的岩石水类似: 湖水—与沉积岩水、河水—与硅质水、底沉积—与碳酸盐岩石。淤泥水与其他岩石中的水显著不同, 代表着一种独立于底沉积的类型。不同地区的水同样也不同。底沉积水和体积水(湖水)的干燥残留物按岩石化学系数比值可以划分若干部分(区块)。湖水干燥残留物在图上投射在火成岩岩石—底岩, 这很清楚是因为注入贝加尔湖的河流冲洗基岩。底沉积干燥残留物在图上落入了沉积岩和火成岩区, 这是因为进入底沉积的沉积物的性质是内部的、自生的、加上外来带入, 也就是说其成因是化学成因的和外来的。

图2 岩浆岩的、沉积岩的、底沉积的平均化学组分与贝加尔湖河流和水的干燥残留物对比图。

在图解上水的不同证明了贝加尔湖是一个多源的、由多个

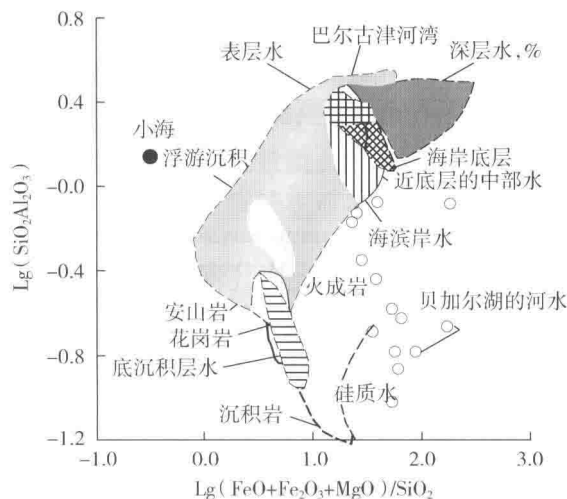


图2 贝加尔湖水物质分类方法图示