

中国工程科技论坛

中国盐湖产业的 绿色发展

● 中國工程院

高等教育出版社

中国工程科技论坛

中国盐湖产业的绿色发展

Zhongguo Yanhu Chanye De Lüse Fazhan

高等教育出版社·北京

内容提要

盐类涉及以锂、钾及盐碱地为代表的战略矿产和土地资源,盐类产业的可持续发展对我国新能源产业、农业粮食安全等至关重要。当前我国盐类产业已经出现了发展不足的问题,本次中国工程科技论坛——“中国盐类工程科技中青年研讨会”的召开,对于促进我国盐类产业的可持续发展具有重要意义。

本次论坛以“中国盐类工程科技的机遇、挑战、发展”为主题,围绕盐类地质、资源调查研究与油盐兼探,盐类化学化工,盐类矿山、采选、工业设计,盐类产业战略,盐湖生物与盐湖农业等5个专题展开讨论,呈现了我国盐类产业战略态势,阐述了我国盐类产业面临的诸多挑战。面对这些挑战,我国中青年专家在钾、锂、硼战略矿产的勘察,高镁锂比卤水提锂,稀释成硼,锂、钾产业化工业设计、盐湖农业等方面取得较大进展,同时也认识到,需要进一步加强产学研合作,需要国家政策引导、项目支持才能真正解决我国盐类产业面临的诸如钾战略储备不足、锂生产不足、盐湖毗邻湿地、盐碱地绿色利用等挑战。

本书系“中国工程科技论坛”系列丛书之一,收录了本次中青年研讨会的主要发言内容,可为盐类产业领域科技工作者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国盐湖产业的绿色发展 / 中国工程院编著. — 北京: 高等教育出版社, 2016.8

(中国工程科技论坛)

ISBN 978-7-04-045747-6

I. ①中… II. ①中… III. ①盐湖-化学工业-节能-研究-中国 IV. ①P942.078 ②TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140514 号

总 策 划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖

责任编辑 沈晓晶

封面设计 顾 斌

责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100120

印 刷 北京汇林印务有限公司

开 本 787mm × 1092mm 1/16

印 张 9.5

字 数 178 千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

版 次 2016 年 7 月第 1 版

印 次 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价 60.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 45747-00

编辑委员会

主 任：郑绵平

委 员：孔维刚 徐建明 伍 倩 牛新生

余疆江 赵小庆

目 录

第一部分 综述

综述	3
----------	---

第二部分 主题报告及报告人简介

行星盐类研究的重要性	孔维刚	7
当雄错盐湖卤水提钾盐田日晒工艺扩大试验研究	伍倩,等	16
含锂水盐体系相平衡及热力学性质研究进展	李琬,等	28
高盐体系油田水有机物研究	杨克利,等	41
西藏杜佳里盐湖湖水的自然蒸发及析盐规律	余疆江,等	52
高镁锂比盐湖卤水体系相平衡与相图研究	王士强,等	64
五元体系 $\text{LiCl-NaCl-KCl-SrCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ 298.15 K Pitzer 热力学模型研究	孟令宗,等	80
盐湖卤水中铷资源的萃取开发	高丹丹	92
青海盐湖资源特性及其综合利用工程技术研究探讨	王石军,等	100
核磁共振与水文地质钻探联合技术确定盐湖晶间卤水层富水性	马金元,等	107
蒸发岩盆地油气藏的形成	赵小庆,等	117
基于解磷真菌的柴达木盐碱地土壤改良初探	陶瑾晋,等	131
附录 主要参会人员名单		139
后记		143

第一部分

综 述

综 述

2015年11月20~21日,第218场中国工程科技论坛——“中国盐类工程科技中青年研讨会”在北京召开。论坛由中国工程院能源与矿业工程学部、中国地质科学院矿产资源研究所、中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心共同承办。中国工程院王振海副局长、能源与矿业工程学部郑绵平和赵文津院士,中国科学院青海盐湖研究所常务副所长段东平及学术委员会主任宋彭生等专家出席指导,会议代表有100多人,来自中国地质科学院矿产资源研究所、中国科学院青海盐湖研究所、天津科技大学、化工部长沙设计院、中国海洋大学、成都理工大学、青海盐湖集团等科研机构、大学及企业。

我国拥有得天独厚的盐类资源优势,不仅有广布国土1/3的多样性盐湖,而且有隐伏多半国土的地下盐卤宝库,这些盐类宝藏涵盖钾、锂、硼、溴、碘、铷、铯、锶、铀等重要战略和新兴产业矿种。钾盐是我国急缺的大宗矿产,是粮食的“粮食”;锂盐是21世纪国际新能源领域的战略矿产,锂电池被赋予清洁能源的美誉;我国拥有约15亿亩(注:1亩 $\approx 667\text{ m}^2$)的盐碱土和盐水域,发展新概念“盐湖农业”(盐土农业),对守住18亿亩耕地“红线”,保障中国粮食安全的生命线具有重要的现实和战略意义。

盐类工程科技涉及以锂、钾等为代表的战略资源和盐碱地开发利用“盐湖农业”等科技,盐类产业的可持续发展对我国新能源产业、农业粮食安全等至关重要。在当前经济新常态下,随着国家“中国制造2025”及“一带一路”战略的推进,盐类科技和产业已经出现了发展滞后的问题,在锂资源丰富的中国,锂的产能严重不足,定价权由国外掌控。虽然我国钾肥自给能力有显著提升,但战略资源储备仍非常有限,很多问题亟待解决,得到了国内专家的重点关注。本次举办的第218场中国工程科技论坛聚焦新形势下盐类产业发展的机遇与挑战,为国内外同行搭建了全方位的交流平台。

本次论坛主题为“中国盐类工程科技的机遇、挑战、发展”,共有来自盐类资源勘查、盐类化学化工、矿山设计、采选、产业战略分析等盐类产业各环节的近40位专家发言。发言和交流围绕:①盐类地质、资源调查研究与油盐兼探;②盐类化学化工;③盐类矿山、采选、工业设计;④盐类产业战略;⑤盐湖生物与盐湖农业等5个主题,开展了富有成效的学术交流,并就迎接和应对盐类产业发展中的各种工程科技挑战进行热烈的研讨。

会议认为,经过近 60 年的发展,我国在盐类资源勘查、开发利用方面取得了卓著的成绩,已找到一大批钾锂硼资源,建立了我国最主要的钾盐、锂资源基地;与此同时,发展了盐湖学理论、陆相成钾、“稀释成盐”。但在新形势下,仍面临诸多挑战和问题,迫切需要有针对性地解决几个突出问题:① 盐类资源开发利用具有跨学科、跨地域、跨部门的特点,而我国目前尚无全国性管理统筹协调机构;② 我国隐伏地下钾、锂等主要战略资源尚未查清;③ 盐类资源综合开发利用程度低,盐类资源的整体效应尚未形成;④ 盐类资源科技创新支撑严重不足。

会议期间,与会中青年专家还共同商讨,为国家献计献策,旨在向国家建议重视我国盐类科技与产业的可持续发展。鉴于我国盐类工程科技力量分散在各个部门,难以进行多学科交叉、高效应对盐类工程科技复杂系统的诸多综合性挑战;为切实贯彻“创新驱动发展”,加快我国综合盐类资源的合理高效开发,充分发挥我国优势盐类资源效益,建立中国强大盐类综合产业,占领世界盐类科学前沿,谨提出以下 3 点建议。

(1) 将盐类产业纳入国家规划,在国家发展和改革委员会建立针对盐类产业的办公室,统一协调、规划、管理盐类产业发展。

(2) 设立“国家盐类生态资源科技重大专项”。将此专项纳入国家相关的重大工程中,并付诸实施。大力支持盐湖和地下盐卤资源综合评价、盐类资源综合开发利用、发展盐类地学-化学-生物关键共性技术、中高端产品研发与产学研应用示范、盐区生态保护与产业污染防控体系以及人才培养为一体的专项计划。

(3) 在国家发展和改革委员会成立“国家盐类工程中心”。按照国家发展和改革委员会该工程中心的要求,将以盐类矿产资源、盐碱地资源的合理、高效、环保综合利用及工程化、产业化为目标,开展盐类资源科技开发和新技术的产业化、高值化研究和推广,以加快我国盐类资源综合利用和建立盐类产业链进程,为钾肥、锂盐资源安全提供保障,为我国锂产业链的建立和强大提供组织保证。

第二部分

主题报告及报告人简介

行星盐类研究的重要性

孔维刚

中国地质科学院矿产资源研究所

一、引言

20 世纪,人类对地球盐类的研究取得了巨量成果。郑绵平院士在前人研究成果的基础上,基于半个多世纪的盐湖实际研究工作积累,并对前人成果进行了高度概括,发展了“盐湖学”这一重要的科学领域。21 世纪开始,行星科学领域盐类研究得到科学家越来越多的重视,中国地质科学院盐湖中心则成为国内最早关注这一新领域的团队,郑绵平院士在基于更高层次对盐科学、盐体系的探讨中对该领域进行了初步的介绍。基于对地球及火星盐类的深入对比分析,郑绵平院士团队进一步对火星盐类研究提出了若干重要的科学问题,为国内开展火星盐类研究提供了重要的思路。本文除阐述火星盐类研究外,将补充其他类地行星盐类研究的进展。并在前人研究的基础上,阐述盐类研究对于行星科学的重要性,并围绕可能对行星盐类研究有意义的方向进行讨论。

二、行星盐类探测现状

人类对地外行星盐类的认识最早来源于火星,早在 20 世纪初就有科学家认识到火星存在低于零度的天然卤水。经过 21 世纪初行星探测的热潮,迄今为止,在火星、木卫二和土卫二上已发现大量盐类矿物,木卫三、木卫四也可能存在盐类,可见盐类矿物在类地行星上可能普遍存在。

(一) 火星

随着 20 世纪 70 年代美国对火星的一系列探测任务的成功,人类对火星的认识发生了质的变化,获得了大量火星地质信息。当时,科学家就已经据火星着陆器所返回的土壤化学成分数据推测,火星可能存在多种盐类矿物。在过去的 10 余年,多个火星轨道及着陆器获得了空前的成功。目前,已在火星表面探测到了碳酸盐、硫酸盐、氯化物等一系列地球常见盐类矿物。通过对大量遥感光谱数据及高分辨率相机数据的综合分析,科学家已经掌握了火星地表各种盐类的

大致分布特征:火星靠近北极的高纬度地区分布着大量以石膏为主的硫酸盐;在北半球中低纬度地区水手峡谷及附近洼地分布着广泛的镁、钙硫酸盐;在南半球中低纬度高原地区探测到了分布广泛的氯化物。郑绵平院士团队已对火星蒸发盐探测现状作了详细的综述,这里不再赘述。除了遥感测量外,几个火星车(精神号、勇气号、凤凰号、好奇号)也都在着陆地区发现了一系列蒸发盐矿物。此外,凤凰号在着陆后机械臂上附着的液体中探测到了大气成因的高氯酸盐。同时,还发现在火星近地表很可能赋存高浓度孔隙卤水。

(二) 木卫二

木卫二是距离木星较近的卫星之一,半径约为地球的 1/4。它是一个典型的冰态行星,具有一个铁-镍的核、硅酸盐质地幔和冰质的壳。早在 20 世纪六七十年代,地基望远镜就已经发现木卫二表层主要由冰覆盖,此后针对木星系统的伽利略号探测飞船确认了这一认识。通过对其冰壳漂移与轨道关系的研究及对伽利略号所测量的木卫二磁场数据分析,科学界已普遍确信木卫二冰壳与硅质地幔之间有厚达上百千米的海洋层,理论模拟也已证实,这种冰态行星存在冰下海的现象比较普遍。

如图 1 所示,木卫二表面除了光亮的冰面外,还有暗红色的沟壑。目前认为这些沟壑是反映冰壳漂移所产生的破裂特征,伽利略号木星探测宇宙飞船上携带的近红外成像光谱仪在这些暗红色区域探测到了大量镁、钠硫酸盐(图 2),很可能有七水泻盐、芒硝,而且可能还有钠碳酸盐。这些裂隙区域的物质应该是壳底海洋溢出的沉积物,揭示了木卫二壳底海洋很有可能拥有类似地球海洋的卤水。

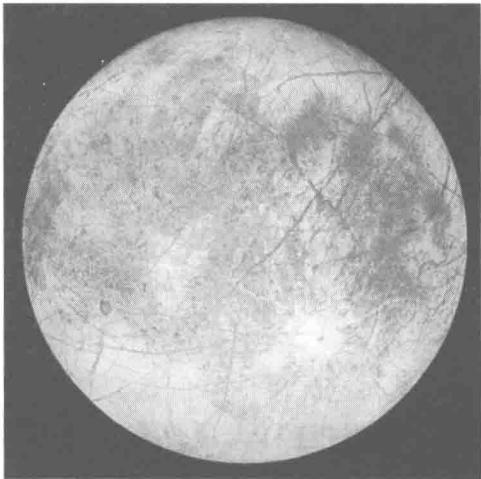


图 1 木卫二背面照片(NASA, JPL)

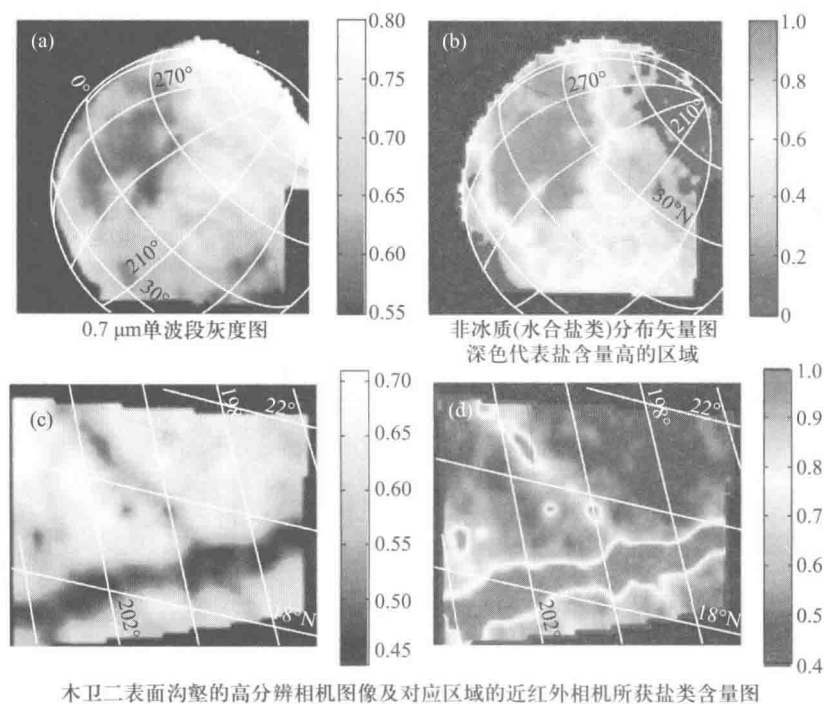


图 2 伽利略所携近红外成像光谱仪所探测到的木卫二表面盐类分布

(三) 土卫二

土卫二(Enceladus)是土星第六大卫星,半径只有地球的 4%。土卫二密度约为 1.6 g/cm^3 ,具有冰质外壳及硅铁质的内核。目前对其硅铁质内核是否经历了分异的问题还存在争论。土卫二存在相对较厚的大气,主要成分是 91%水蒸气、4%氮气、3.2%二氧化碳及 1.7%甲烷。

卡西尼-惠更斯号土星及其卫星探测器在土卫二南极地区探测到了冰火山喷发(图 3),其所携紫外光谱仪指认喷发物主要为水蒸气,揭示了冰壳覆盖下的海洋。由于土卫二轨道位于土星 E 环内,动力学模拟表明 E 环并不稳定,目前普遍认为土卫二冰火山喷发物是维持 E 环存在的主要物源。质谱仪及微尘探测器在临近土卫二时对 E 环中的微尘及气体做了分析。分析结果揭示了微尘中含有数量不等的钠盐和钾盐(可能是氯化物、碳酸盐或重碳酸盐),这些盐类应该来源于土卫二的冰火山喷发。其中钾钠比相对较低,反映低温水岩风化过程。土卫二冰火山喷发物中含盐量较高且密度大的颗粒倾向于落回其表面,反之则倾向于逃逸并补充到土星 E 环中。

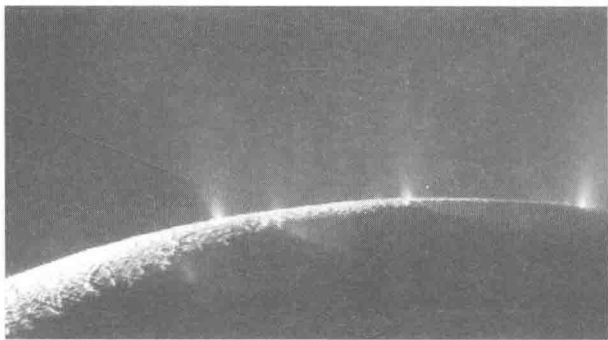


图 3 卡西尼-惠更斯号拍摄到土卫二南极表面物质喷射 (NASA, JPL, SSI)

三、盐类研究对于行星科学的意义

(一) 盐类研究对于行星探测的促进作用

过去数十年中,盐类基础研究为行星探测提供了大量基础数据,其作用主要包括直接为探测器科学载荷提供对比参考数据或是在探测数据不能给出明确结果的情况下基于盐类基础物理化学性质,对探测结果进行评估及约束。

首先,行星探测器上相关科学载荷在实验室及野外所采集的盐类矿物样品数据是行星探测数据应用的基础。特别是,盐类矿物的晶体结构通常较有序,其光谱特征明显,探测遥感光谱和盐类实验室光谱往往有高程度的吻合(图 4)。例如,火星遥感探测几个至关重要的发现,实验室盐类光谱数据库都提供了关键的帮助。此外,实验室盐类光谱研究对于理解行星登陆车所采集的数据也有很大帮助。

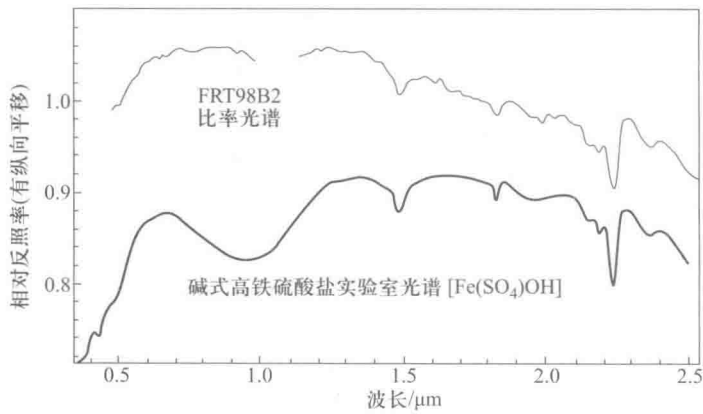


图 4 实验室光谱与火星遥感光谱的类比

因为行星探测实际条件复杂,地球行星类别点光谱研究也对行星探测具有重要作用,盐湖中心团队自 2008 年起在青海大浪滩火星类比点开展了相关的研究,并取得了较好的国际影响。

除了直接用于行星探测数据解译,盐类基础研究还可以帮助对探测结果进行约束。例如,对硫酸盐温湿度相图的研究极大地帮助了火星硫酸盐的精细探测;水合盐类的稳定性质对于约束木卫二表面盐类矿物的定相也起到了重要作用。

(二) 盐类研究所反映的行星地质过程信息

对于地球而言,盐类是各圈层相互作用的产物,这一规律可推广至其他有盐类出现的行星。因而盐类必然记录了行星各圈层相互作用过程中的大量信息,这些信息对于研究行星的地质过程,乃至行星的起源及演化都很重要。

根据成因,盐类可粗略分为内生、表生和大气成因盐类 3 种。内生盐类对 3 种盐类的研究所反映的行星地质过程有所侧重。内生成盐指与岩浆活动、火山活动或陆块深部俯冲密切相关的火成盐或热水成盐,如硼锂盐类矿床多与深部过程相关。表生盐类指地表及次地表水岩相互作用产生的蒸发盐类,地球上大规模的盐类沉积绝大多数属于这类成因。大气中颗粒与气体以水蒸气为媒介发生反应(多为光化学反应)产生第 3 类成因的盐类,智利硝石矿床就是这种成因。

蒸发盐类记录了其沉积时的古环境信息,尤其是研究古气候良好的指标之一。通过对火星蒸发盐的研究已获得许多重要火星古气候信息。黄钾铁矾是一种水生铁硫酸盐,火星黄钾铁矾的发现首次确认火星地质历史上曾经存在水溶液环境。通过火星不同年龄地区盐类分布的规律,对火星地质历史不同时代的水溶液环境进行了初步的划分,发现火星在 30 亿年前左右由早期沉积碳酸盐、石膏、镁硫酸盐及石盐的中性偏弱碱性的水溶液环境开始逐渐变为沉积铁硫酸盐等反应的酸性溶液环境。火星广泛分布镁硫酸盐,通过大浪滩火星类比点硫镁矾的类比研究揭示火星地质历史上气温应该普遍较低,这与火星大气模拟结果一致。冰态行星所探测到的高水合状态的盐类(七水泻盐、芒硝、水合钠碳酸盐等)则属于典型的冷相矿物,反映沉积环境温度较低,其中水合态的钠碳酸盐很有可能是冷相矿物泡碱。

大气成因的盐类主要记录了行星大气成分、结构及大气中悬浮颗粒的信息。行星大气成分通常与地质过程密切相关,因此通过对行星大气成因盐类的研究不仅可以获取行星大气的成分信息,还可以间接地获取行星地质演化的信息。火星凤凰号登陆器发现高氯酸盐就属于大气成因的盐类,反映了干燥、强氧化环境下的光化学作用,因火星大气早期倾向于还原性,该矿物被认为是火星地质历

史后期才有可能出现的产物。

内生盐类主要反映行星深部的地质过程。由于深部含盐流体对于多种火成-热水型矿床至关重要,地球内生盐类的研究较多。但限于探测技术,人类目前对地外行星内生盐类的了解还较少,相关研究也比较罕见。虽然木卫二、土卫二上的盐类严格意义上应该还属于表生蒸发盐的范畴,但这种冰态星球巨厚冰壳给其覆盖的卤水提供了巨大的压力,因此水盐系统高压下的性质也得到关注,这也给研究冰态行星内部过程提供了重要参考。

虽然目前针对行星内生盐类的研究较少,但内生盐类与行星内部过程密切相关,是研究行星内部演化的重要指标之一。例如,大量探测表明月球不存在盐类,但科学界普遍接受了月球曾经有岩浆洋的观点。岩浆演化过程不出现盐类矿物表明月球岩浆缺少氢元素,比较干,因此进一步的模拟可以利用月球缺失盐类这一特征约束月球岩浆的化学成分。

(三) 盐类研究对地外生命探测意义

生命起源所需营养元素主要赋存于星体的硅酸盐中,只有通过水岩相互作用将其溶于水体中,才能为生命的起源所利用。郑绵平院士等已经总结了成盐元素(图 5),这些成盐元素大部分都是生命产生的必需元素,因此水岩相互作用的另一产物——盐类是生命产生过程的必然产物。

Al								
H ⁺	II A	VII B	VIII	III A	IV A	VA	VIA	VII A
1.0079*								
Li [△]				B [△]	C ⁺	N [△]	O ⁺	F
6.94				10.81	12.011	14.0067	15.999	18.998403
Na ⁺	Mg ⁺			Al	Si [△]	P	S ⁺	Cl ⁺
22.98977	24.305			26.98154	28.085	30.97376	32.06	35.453
K ⁺	Ca ⁺	Mn	Fe			As		Br
39.098	40.08	54.9380	55.84			74.9216		79.904
Rb	Sr [△]							I
85.467	87.62							126.9045
Cs	Ba							
132.9053	137.33							

* 相对原子质量
+ 主要成盐元素
△ 次要成盐元素

图 5 元素周期表中的成盐元素分布

此外盐类离子在生命产生的有机反应过程中作为组分或者催化剂等,也必然扮演了重要的角色。例如,在原始细胞膜形成后,作为细胞液的主要成分之一,盐类扮演着调节细胞液浓度,以平衡细胞与环境溶液渗透压,促进选择性吸