

同位素与全球环境变化

TONGWEISU YU QUANQIU HUANJING BIANHUA

杨杰东 徐士进 编著

地质出版社

同位素与全球环境变化

杨杰东 徐士进 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

全球环境和气候变化是目前世界各国都十分关注的问题,更是各国科学界研究的热点和前沿的课题。同位素示踪是全球环境变化研究中的一个非常重要的方法和工具。我们在近几年教学和科学研究经验的基础上编写了这一本教材。本书内容重点介绍氢、氧、碳、氮、锶、钕、铅同位素示踪,包括有关同位素示踪的基本概念(第一章和第二章),氢、氧、碳、氮、锶、钕和铅同位素示踪的基本原理(第三章到第十章),它们在环境变化研究中的主要应用,以及国际上最新和前沿的研究领域(第十一章到第二十章)。本书引用了大量参考文献可供参考。

本教材可供地球科学学科本科和研究生教学使用,也可供研究所、学校、公司、企业、机关等单位涉及这方面研究或工作的人员作为参考。

图书在版编目(CIP)数据

同位素与全球环境变化/杨杰东,徐士进编著. —北京:地质出版社,2007.1
ISBN 978-7-116-05136-2

I. 同... II. ①杨...②徐... III. 同位素应用—全球环境—研究 IV. X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 163068 号

责任编辑:蔡卫东

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324571(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:13.5

字 数:310 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2007 年 1 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:35.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-05136-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

全球环境和气候变化是目前世界各国都十分关注的问题，更是各国科学界研究的热点和前沿课题。同位素示踪是全球环境变化研究中的一个非常重要的方法和工具，它不仅对于前寒武纪、古生代和中生代的古环境变化研究有重要作用，而且对于新生代，特别是十几万年以来的末次间冰期—冰期和全新世的环境变化研究也具有重要意义。对于许多研究对象，例如大洋沉积物、冰心、湖相沉积物、洞穴碳酸盐沉积物、树轮、黄土、海洋生物碳酸盐等，目前每天都可以看到有大量应用同位素示踪的研究报告和成果。

自 1997 年以来我们就在南京大学开设了“同位素与全球环境变化”课程。有关这方面的教科书在国内尚没有出版过一本。在国外，虽然这方面的研究论文非常之多，但是专门对此介绍的书也非常少。我们在收集国际上发表的大量最新论文，以及集近几年教学和科研经验的基础上编写了这部教材。

本书内容重点介绍非放射成因稳定同位素氢、氧、碳、氮和放射成因稳定同位素锶、钕、铅同位素示踪，包括有关同位素示踪的基本概念（第一章和第二章），氢、氧、碳、氮、锶、钕和铅同位素示踪的基本原理（第三章到第十章），它们在环境变化研究中的主要应用，以及国际上最新和前沿的研究领域（第十一章到第二十章）。本书引用了大量参考文献可供读者参考。

本教材可供地球科学学科本科和研究生教学使用，也可供研究所、学校、公司、企业、机关等单位涉及这方面研究或工作的人员作为参考。

由于本书编写者学识水平所限，缺点或错误在所难免，恳请专家、读者给予批评指正。

目 次

前 言

绪 论	(1)
第一章 同位素的有关基本概念	(5)
第一节 同位素的定义	(5)
一、同位素的定义	(5)
二、同位素的分类	(5)
第二节 核内性质与核外性质	(6)
一、核内性质	(6)
二、核外性质	(6)
第三节 自然界同位素变化的原因	(6)
一、放射性同位素衰变	(7)
二、放射性同位素裂变	(7)
三、核聚变	(7)
第四节 稳定同位素的分类	(7)
一、稳定同位素的分类	(7)
二、放射成因稳定同位素	(7)
三、非放射成因稳定同位素	(8)
第五节 同位素组成表示的术语	(9)
一、同位素丰度	(9)
二、同位素比值	(9)
三、 δ 值	(9)
第六节 同位素标准物质	(10)
一、水样的氢和氧同位素	(10)
二、固体样品的氧同位素	(11)
三、碳同位素	(11)
四、氮同位素	(11)
第七节 同位素分馏	(11)
一、同位素效应	(11)
二、同位素分馏定义	(13)
三、同位素分馏的分类	(13)

四、同位素分馏系数·····	(14)
五、分子能量·····	(14)
第八节 同位素实验·····	(16)
一、同位素质谱仪·····	(16)
二、样品处理方法·····	(17)
第二章 地球形成各阶段的铀-铅、铷-锶和钐-钕体系 ·····	(20)
第一节 放射性衰变公式·····	(20)
第二节 影响放射成因稳定同位素比值变化的因素·····	(21)
第三节 元素与同位素的形成·····	(21)
一、太阳系形成的过程·····	(21)
二、元素和同位素的形成·····	(21)
三、太阳系内引起同位素发生变化的过程·····	(21)
第四节 在地球形成各阶段铀-铅、铷-锶和钐-钕体系·····	(22)
一、从太阳星云到地球形成之初阶段·····	(22)
二、地核形成阶段·····	(23)
三、壳幔分异阶段·····	(23)
第五节 同位素的均一化及母/子体元素分异的同时性·····	(24)
第六节 ϵ 值·····	(24)
第三章 氢、氧、碳和氮同位素在自然界的分布 ·····	(27)
第一节 自然界中的氢和氧同位素·····	(27)
一、自然界中的氢和氧同位素·····	(27)
二、沉积岩中的氢和氧同位素·····	(28)
第二节 自然界中的碳库·····	(28)
一、自然界中的碳库·····	(28)
二、沉积岩中的碳同位素·····	(31)
三、化石燃料中的碳同位素·····	(32)
第三节 有机物碳同位素在成岩阶段的转变·····	(33)
第四节 自然界中的氮库·····	(34)
一、大气圈·····	(34)
二、海 洋·····	(35)
三、湖泊、河流和地下水·····	(35)
四、陆地生物圈和土壤·····	(36)
第四章 大气圈的同位素 ·····	(38)
第一节 蒸发与凝结过程中氢和氧同位素·····	(38)
第二节 雨水线方程·····	(38)
第三节 氚 (^3H)·····	(40)

第四节	大气中二氧化碳的温室效应	(40)
第五节	大气圈二氧化碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 变化	(42)
第六节	大气碳库中 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 和太阳活动强度	(46)
第五章	水圈中的氢和氧同位素	(48)
第一节	水圈中的氢和氧同位素	(48)
一、	大气降水	(48)
二、	河 水	(49)
三、	湖泊水	(49)
四、	地下水	(49)
五、	海 水	(50)
六、	岩浆水	(51)
七、	地热水	(51)
第二节	氧同位素古海水温度的测定	(52)
一、	生物成因碳酸盐 - 海水	(52)
二、	其他海洋自生矿物 - 海水	(53)
第三节	第四纪冰期 - 间冰期旋回	(54)
第四节	第四纪海水氧同位素组成的演化	(54)
第五节	第四纪冰期 - 间冰期旋回的驱动力	(57)
第六章	水圈中的碳同位素	(60)
第一节	陆地水中的碳同位素	(60)
第二节	海洋中的碳同位素	(60)
一、	海洋中无机碳	(60)
二、	海洋有机碳及生物泵作用	(61)
三、	海水 $\delta^{13}\text{C}$ 剖面	(62)
四、	海洋碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海洋生物总量	(63)
五、	孔隙水的碳同位素组成	(64)
第三节	大气与海洋碳库间的交换	(65)
第七章	水圈中的钕和锶同位素	(66)
第一节	河水中的钕和锶同位素	(66)
一、	河水中的锶同位素	(66)
二、	河水中的钕同位素	(66)
三、	河水中锶和钕同位素反相关关系	(66)
四、	河水中的锶可以看做是两个端元的混合	(67)
第二节	海洋锶的来源	(67)
第三节	锶同位素地层学原理	(68)
一、	锶同位素地层学基础	(68)

二、铈同位素地层学优缺点	(68)
第四节 古海水铈同位素组成的演化	(69)
第五节 海水钕同位素	(71)
一、海水钕的来源	(71)
二、现代各大洋钕同位素比值的差异	(71)
三、同一海盆的不同水体钕同位素组成的差别	(72)
四、海水剖面 ϵ_{Nd} 值的变化	(72)
第六节 海水钕同位素组成的演化	(73)
一、显生宙太平洋和大西洋钕同位素组成的演化	(73)
二、距今 700 ~ 500Ma 中国海水钕同位素组成的演化	(73)
第七节 钕、铅同位素和 ^{14}C 在海洋环流中的应用	(74)
一、洋流与钕同位素	(75)
二、洋流与铅同位素	(78)
三、 ^{14}C 和深水洋流速率	(79)
第八节 铀、钍和钚同位素在海洋方面的应用	(80)
一、铀同位素	(80)
二、钍同位素	(80)
三、钚同位素	(80)
第八章 地表环境中的钕、铈和铅同位素	(82)
第一节 风化过程中的铷 - 铈同位素体系	(82)
一、全岩体系的风化	(82)
二、黑云母和白云母的风化	(82)
三、长石的风化	(83)
四、粘土矿物	(83)
第二节 地表环境中的铀 - 铅、钍 - 钕和铷 - 铈体系的差别	(83)
一、铀 - 铅与钍 - 钕体系比较	(84)
二、铷 - 铈与钍 - 钕体系比较	(85)
第九章 生物作用与同位素	(86)
第一节 陆地植物的光合作用和呼吸作用	(86)
第二节 依据光合作用的路径对陆地植物的分类	(87)
第三节 植物的 $\delta^{13}C$ 值	(88)
一、植物的 $\delta^{13}C$ 值分布	(88)
二、植物不同构成部分的 $\delta^{13}C$ 值差别	(88)
第四节 人类食物中碳同位素的差别	(89)
第五节 光合作用中氢和氧同位素的分馏	(90)
一、氢同位素	(90)

二、氧同位素	(90)
第六节 光合作用和呼吸作用对大气圈二氧化碳含量和碳、氧同位素的影响	(91)
一、植物光合作用影响大气二氧化碳的碳同位素组成的因素	(91)
二、北半球北方森林生态系统呼吸作用二氧化碳的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的变化	(91)
三、影响大气二氧化碳的氧同位素组成的因素	(92)
四、陆地生态系统对大气二氧化碳的氧同位素组成的影响	(93)
第七节 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与环境相对湿度的关系	(94)
第八节 生物成因碳酸盐形成中的碳同位素非平衡分馏	(96)
第九节 植物对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的提取和同化机理	(97)
第十节 有机物固氮作用、矿化降解作用、硝化作用和反硝化作用中的氮同位素	(98)
一、固氮作用	(98)
二、矿化作用	(98)
三、硝化作用	(98)
四、反硝化作用	(99)
第十章 碳和氮循环	(101)
第一节 化石燃料的燃烧对大气碳含量和碳同位素组成的影响	(101)
第二节 构造作用与大气碳循环	(103)
第三节 大陆碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化作用对大气碳循环的影响	(103)
一、碳酸盐岩风化作用	(104)
二、硅酸盐岩风化作用	(104)
第四节 碳循环	(105)
一、碳的生物循环	(105)
二、碳的地球化学循环	(106)
第五节 碳循环中的反馈	(106)
第六节 太阳的演化与地球地表温度的稳定	(107)
第七节 碳源和碳汇	(107)
一、碳源和碳汇表达式	(108)
二、“漏失汇”问题	(109)
三、陆地生态系统	(109)
四、森 林	(109)
五、土 壤	(110)
六、湿 地	(111)
七、计 算	(111)
八、目前存在的问题	(112)
九、可能引起气候变暖的主要因素	(114)
第八节 氮循环	(115)

一、生态系统中氮循环	(115)
二、早期的大气	(117)
三、古代地壳氮对现代生态系统的影响	(117)
四、氮在一个现代大陆架海的循环	(117)
第九节 人类活动对氮循环的影响	(122)
第十一章 冰心同位素	(123)
第一节 冰心参数	(123)
第二节 冰心同位素记录和末次冰期以来气候的高频变化	(126)
第三节 冰心同位素记录和全新世气候变化	(128)
第十二章 树轮同位素	(131)
第一节 树轮氢和氧同位素组成和古降雨、古温度	(132)
第二节 树轮碳同位素组成和古温度	(133)
第三节 树轮 ¹⁴ C/ ¹² C 和太阳活动强度	(134)
第十三章 洞穴碳酸盐稳定同位素	(135)
第一节 洞穴碳酸盐氧同位素的来源	(135)
第二节 在洞穴碳酸盐形成过程中同位素动力学分馏	(136)
第三节 洞穴碳酸盐的年层	(136)
第四节 洞穴碳酸盐碳同位素对植物类型和生态系统的意义	(137)
第五节 洞穴碳酸盐氧同位素对降雨量、季风和厄尔尼诺的意义	(137)
第六节 洞穴碳酸盐锶同位素对风化强度的意义	(139)
第十四章 土壤碳酸盐的碳和氧同位素	(141)
第一节 土壤碳酸盐的碳同位素	(141)
第二节 土壤中二氧化碳的来源	(142)
第三节 土壤二氧化碳释放量与土壤呼吸速率	(142)
第四节 土壤碳同位素模式	(143)
第五节 影响土壤碳酸盐碳同位素组成的因素	(144)
第六节 土壤碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C ₃ /C ₄ 植物比	(144)
第七节 从土壤碳酸盐得到 C ₃ 和 C ₄ 植物的分布	(145)
第八节 土壤碳酸盐氧同位素与古温度	(146)
第十五章 稳定同位素对古人类和动物食物再造	(148)
第一节 碳和氮同位素食物再造的基础	(148)
第二节 稳定同位素食物再造的简略历史	(149)
第三节 食物链网 (food web) 的稳定同位素组成	(150)
一、在不同植物类别中氮同位素的分馏	(150)
二、陆地生态系统氮同位素组成的变化	(150)

三、陆地生态系统碳同位素组成的变化	(150)
四、在水环境中碳同位素组成的变化	(152)
五、动物对氮同位素的分馏	(152)
六、动物对碳同位素的分馏	(153)
第四节 食物链网稳定同位素组成的天然变化	(155)
第十六章 大陆风化与全球气候变化	(157)
第一节 新生代气候的变化	(157)
第二节 新生代气候变化的原因	(158)
第三节 海洋 ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr 比值变化——大陆风化速率的指示	(159)
第四节 大陆风化与气候变化的成因联系	(159)
第五节 青藏高原的隆起与大陆风化速率的增强	(160)
第六节 新的研究进展	(161)
一、硅酸盐风化还是碳酸盐风化之争	(161)
二、有机碳的风化与埋藏	(162)
三、大陆化学风化与气温的关系	(162)
四、大气二氧化碳浓度与温度的反相关关系	(163)
第十七章 生物碳酸盐同位素的环境意义	(164)
第一节 珊 瑚	(164)
一、珊瑚氧同位素温度计	(164)
二、珊瑚碳和氧同位素波动与厄尔尼诺现象	(164)
第二节 有孔虫	(166)
一、有孔虫氧和钕同位素与全球大陆冰体积的变化	(166)
二、有孔虫碳同位素的环境意义	(167)
第三节 介形虫锶同位素与海侵-海退环境变化的指示	(168)
第四节 蜗 牛	(168)
一、蜗牛氧同位素与古降雨、大气环流模式变化	(169)
二、蜗牛碳同位素与古植物再造、古温度变化	(171)
第五节 脊椎动物	(173)
一、鲑鱼锶同位素与生长环境	(173)
二、大象碳、氮和锶同位素及其环境意义	(174)
第十八章 生物绝灭事件与同位素异常	(176)
第一节 白垩系/第三系界限	(176)
第二节 二叠系/三叠系界限	(180)
第三节 前寒武系/寒武系界限	(182)
参考文献	(185)

绪 论

我们星球的形成、后来的发展以及各种地球系统的发展进程出现在几个不同，但又相互过渡的时间范围：从大爆炸以来的宇宙演化用了大约 150 亿 a，地球的地质历史持续了大约 45 亿 a，生物演化持续了三十几亿年。人类的时间尺度仅仅是最近的几百万年，相对于生物进化来说，它也更加短暂，变化的节奏也明显的加快：从原始食物采集时代，到不知不觉之中的农业定居为特征的文明的转变，相对于地球历史而言只不过是短暂的一瞬间。

在地球演化史中，地球表面的环境一直在不断地被改造。通过地球动力作用，太阳辐射带来的能量和地球内部散发的热，地壳流动、海底扩张和陆壳断裂，提供地球表面海洋和大气循环的能量（太阳能的吸收和转化机制产生了陆地上的天气变化、干旱、暴风雨、海潮），并且在风化、搬运、沉积和成岩等作用建立了动态平衡。运动的大陆与海洋、大气环流的共同作用不断引起全球环境和气候变化，从而影响了生物的进化过程。生命的起源和演化，人类的生存与社会的发展都与全球环境和气候变化密切相关。

20 世纪 80 年代以来，全球环境变化研究在全世界受到广泛重视，许多国际性研究计划都与环境问题有关，例如世界气候研究计划（WCRP）、国际地圈 - 生物圈计划（IGBP）、国际地质对比计划（IGCP）、国际全球环境变化人文因素计划（IHDP）、国际生物多样性计划（DIVERSITAS）、国际大陆钻探计划（ICDP）、全球海洋大气陆地系统计划（GOALS）、欧洲南极冰心计划（EPICA）、格陵兰冰心计划（GRIP）、联合国环境计划（UNEP）、全球变化人文计划（IHDP）等。

如何利用天然的地质档案库去追寻全球环境和气候的变化？在这一方面，同位素示踪是一把利器。同位素在地球科学中归根到底有两大作用：定年和示踪。由这两大作用导引出的两大学科是同位素地质年代学 and 同位素地球化学。同位素地质年代学是利用放射性同位素衰变规律，测定各种地质对象年代的科学。同位素地球化学是研究各种同位素示踪剂在地球各层圈的运动及其变化，从而了解和揭示各层圈的相互作用及其演化规律的科学。每一种同位素示踪剂在地球各层圈中都有其特定的运动规律和变化方式。没有一种同位素示踪剂可以解决所有地球科学的问题，每种同位素示踪剂都有其独特的特点，具有其他示踪剂不可替代的作用。

通过同位素示踪来研究全球环境变化是同位素地球化学中的一个新的研究领域。它是研究各种同位素示踪剂在陆地、海洋和大气圈中运动和变化规律。近 20 年来，随着人类对全球环境问题研究的重视和深入，同位素示踪在全球环境演化的研究中获得了广泛应用和飞速发展。在对天然档案库（大洋沉积物、冰心、黄土、洞穴碳酸盐沉积物、树轮、湖泊沉积物、沉积岩、生物化石等）的研究中，同位素示踪已经为我们提供了许多重要的信息。

温室效应是人们关心的环境问题之一。它是指，一些气体对太阳辐射是“透明的”，

但它们却能吸收由地面反射的红外辐射，并将其反射回地面。温室效应的气体主要是二氧化碳、甲烷、一氧化氮、一氧化碳和氯氟碳化合物，它们都不是大气的主要成分。在过去很多年内大气中二氧化碳、甲烷、一氧化氮、一氧化碳和氯氟碳化合物的含量不断增长。

研究人员对新生代以来的环境和气候的研究得出，距今 5000 万 a 前大气中二氧化碳含量高达 1000×10^{-6} ，海平面比今天高出近 50m，世界一片汪洋。由于海洋有机物的光合作用固定了大气二氧化碳并将之埋葬在海底，或由于大陆风化作用对大气二氧化碳的消耗，大气二氧化碳的含量逐渐降低，导致距今 4000 万 ~ 3000 万 a 前南极冰原的形成。在大约距今 400 万 ~ 300 万 a 前，大气中二氧化碳含量进一步降低到约 290×10^{-6} ，北半球出现了永久性的冰原。

研究人员通过对大洋沉积物有孔虫和冰心氧同位素组成的研究揭示出，大约从距今 300 万 a 前开始出现了冰期—间冰期的交替变化，这个变化的一个主要周期是大约 10 万 a，它反映地球绕太阳运行的偏心率的变化。最近一次间冰期开始于距今 13 万 a 前，延续了大约 5 万 ~ 6 万 a。最近一次冰期开始于距今约 7 万 ~ 8 万 a 前，它结束于距今约 1 万 a 前。目前，地球正处于末次冰期结束以后的全新世时期。

研究人员通过对冰心样品氧同位素组成的研究还揭示出，在冰期—间冰期的行星轨道变化周期之上，还覆盖有千年—百年尺度剧烈的高频气候变化。发现了在北大西洋地区末次冰期（距今 12 ~ 74ka）气候经历了 20 个 DO（Dansgaard-Oeschger）事件，每一个周期延续从 500 ~ 2500a，由一个温暖的间冰段（interstadial），其升温幅度达 5 ~ 8℃，和一个冷段（stadial）组成（Johnsen 等，1992）；发现了比 DO 事件时间更长的北大西洋亨瑞奇（Heinrich）事件；发现了 DO 事件与亨瑞奇事件组合的 Bond 旋回，每个 Bond 旋回约 4 ~ 8ka；发现了最末一个 Bond 旋回，即 BOA（Bolling-Allerod）暖期—YD（Younger Dryas）（新仙女木）冷期。

美国哈佛大学的两位科学家保罗·霍夫曼和盖伦·霍尔沃森在《Science》杂志上发表的研究报告指出，距今 7Ma 前的一次冰期时，厚厚的冰层从南极到北极覆盖着地球表面，整个世界就像是一个巨大的雪球。河流结冰形成冰川，海洋被致密的冰层所覆盖。他们在今天位于纳米布沙漠的一处以前曾是海底的地方采集了石块，分析其中碳同位素组成显示，植物的活动在长达大约 100 万 a 中渐渐消失。生命必定是在海洋中休眠，就像是在温度很低的冰箱里一样。陆地上只有很少的地方能够保持不冰冻的环境，仅仅特定的菌类得以存活。他们认为，在其后肯定发生过一系列强烈的火山爆发，只有火山爆发才可能把地球从冰天雪地的冬眠之中惊醒，因为火山爆发会使足够的温室气体进入大气层，并由此导致全球变暖。

同位素研究还揭示，全新世气候是不稳定的，发生多次重要的千年尺度的冷事件，它们发生在距今 11、10.3、9.4、8.1、5.9、4.2、2.8、1.4ka 前，它们的间隔时间大约 (1500 ± 500) a。

对冰心样品中气泡测定结果表明，从末次冰期结束的大约 1 万 a 前到距今约 300a 前，二氧化碳和甲烷的含量大体保持不变，即

$$\text{CO}_2 \text{——} 260 \times 10^{-6}$$

$$\text{CH}_4 \text{——} 700 \times 10^{-9}$$

从人类工业化开始的大约 300a 前至今含量急剧上升，到目前已达：

$$\text{CO}_2\text{——}350 \times 10^{-6}$$

$$\text{CH}_4\text{——}1700 \times 10^{-9}$$

而且这种上升的速度在不断增加。

研究人员通过对冰心样品和树轮样品碳和氧同位素示踪得出了过去大气二氧化碳含量和大气温度的变化规律,并预测未来可能的变化趋势。对冰心样品分析结果表明,大气中二氧化碳含量越高,大气温度就越高。在目前的全新世与末次间冰期,冰心记录的局部温度比冰期最冷时期高 10°C 。同时期大气中二氧化碳含量比冰期时期高 25%,甲烷高 100%。

2002 年 4 月,同一期《Nature》上刊登了两个研究小组的相同的研究结果:到 21 世纪末,地球变暖问题可能比联合国“政府间气候变化工作小组”在 2001 年预测的更加严重。当时预测的是,今后 100a,由于温室效应,全球平均气温可能增加 5.8°C 。而由瑞士和英国研究人员分别进行的研究表明,比这个数字还要多 1°C 。

近年来,从南极离开的冰山越来越多。2002 年 3 月,南极半岛的陆缘冰出现大面积崩塌,达到 3520km^2 ,丢失重量达到 7200 亿 t。南极蕴藏着全世界 90% 的淡水资源。如果南极冰川融化 1%,全世界海洋的海平面就会上升 0.6m。一旦全部融化,将会使海平面升高 50~60m,那将是巨大的灾难。

全球环境变化最重要的现象之一是厄尔尼诺,它对海洋生物带来灾难性的影响,使得海洋生物大批死亡。它对于人类生活也有影响。厄尔尼诺是在印度—澳大利亚和中太平洋之间海区大气压的一次振荡产生的一系列异常的海洋变化。当压差大于正常值时,它使整个太平洋上大气和海洋环流发生异常。最近 45a 以来,主要由厄尔尼诺事件引起的海洋表面温度异常是大约 2.5°C 。

研究人员通过对洞穴石笋和珊瑚的碳和氧同位素组成的研究发现,厄尔尼诺发生的频率约 2~10a 发生一次。在过去 300a 间发生过约 100 次。

受地幔缓慢对流过程的驱动而发生的地球表面岩石圈大规模的水平运动,即板块运动,带动了大陆的漂移和大洋盆地的开合、火山活动,以及地壳的升降运动。在地球历史上,古海洋地理格局曾发生大的变化,几次出现了联合古陆和联合大洋,通过钐、铽和铅同位素示踪手段,科学家已经在追踪这些变化的轨迹。

在大洋中,由于不同区域海水密度差异形成的大洋环流的运动模式及其演变的一些信息已经被钐和铅同位素示踪所揭示。

突发地质事件在地质历史上发生过多次,特别在一些地层界限附近时期。这反映了当时全球的环境和气候曾发生过重大的变化,这种变化往往引起大规模的生物的灭亡或绝灭。在这种突发生物绝灭事件的地层中一些同位素组成表现出异常。例如在前寒武系—寒武系界线、奥陶系/志留系界线、泥盆系/石炭系界线、二叠系—三叠系界线、白垩系/第三系界线等都发现了一些同位素组成的突变。

由于外部的力量,地球气候系统已经发生过多次大的变化。人类可以从地球表面的天然档案库中详细了解驱动地球系统的物理—化学过程。在过去 10a 中,由于测定技术的进步,人类重建过去环境和气候变化的能力得到显著的改善。研究过去环境和气候的变化有以下 3 个目的:

(1) 重建在地球历史上观察到的气候和环境天然变化的范围。

(2) 使用过去环境和气候条件变化规律，建立和检验环境和气候模式，以便更好地了解现代环境和气候体系是如何运行的。

(3) 通过改进模式，可以更可信地预测未来环境和气候条件变化。

在人类关心的上述全球环境问题研究中，同位素示踪作为一个重要工具和手段发挥了重要作用，人类利用同位素示踪已经获得了许多重要信息和结论。如果我们已经了解操纵地球系统的物理 - 化学过程，那么预测未来环境和气候条件变化将变得可能。

第一章 同位素的有关基本概念

第一节 同位素的定义

一、同位素的定义

同位素的定义：核内质子数相同而中子数不同的同一种元素的原子。

二、同位素的分类

目前，地球上的同位素根据半衰期的长短分为三类：

(1) 同位素的半衰期特短，目前的仪器测不出。虽然它们可能在前太阳系期间丰度高，但是这些同位素目前已测定不到，目前仅可以测定出它们的子体同位素，这些子体同位素被认为是稳定同位素。

(2) 同位素的半衰期特长，目前的仪器测不出其同位素组成的变化，它们也被认为是稳定同位素。

(3) 同位素的半衰期介于前两类之间，目前的仪器可以测定出其同位素组成在发生变化，这类同位素被称为放射性同位素。

上面所述的第(3)类同位素被称为放射性同位素。上面所述的第(1)和第(2)类同位素被称为稳定同位素。

放射性同位素和稳定同位素定义如下：

放射性同位素：原子核不稳定，能自发进行放射性衰变或核裂变，而转变为其他一类核素的同位素称为放射性同位素。

稳定同位素：原子核稳定，其本身不会自发进行放射性衰变或核裂变的同位素。

在元素周期表中，原子序数 Z （或核内质子数） > 82 的元素均为放射性元素，因为其原子核内中子数多于质子数，呈不稳定。 $Z < 82$ 的元素大多为稳定元素，但也有例外。在目前已知的天然核素中，稳定同位素有 270 多种，放射性同位素有 60 多种。

核素是以有特定质子数、中子数和核的能态为标志的原子核。核素的稳定性有几个重要规则，其中的两个如下：第一称为对称规则，它表述为，在一个低原子序数的稳定核素中，质子数近似等于中子数，或中子与质子之比 (N/Z) 近似等于 1。在稳定核素的质子数大于 20 时， N/Z 比总是大于 1，对于最重的核素该比值最大可达 1.5。由于随着质子数的增加，核内正电荷质子电库仑排斥力迅速增加。为了维持核内稳定性，核内 N/Z 比增加。

第二称为 Oddo-Harkins 规则，它表述为，偶原子序数核素的丰度比奇原子序数的核素的丰度高。如表 1-1 所示，在 4 种可能的稳定核素的结合中，最多的是偶-偶结合，最少的是奇-奇结合。

表 1-1 原子核的类型和它们存在的频率

质子-中子结合	稳定核素的数目
偶-偶	160
偶-奇	56
奇-偶	50
奇-奇	5

(据 Hoefs, 1997)

第二节 核内性质与核外性质

一、核内性质

核内性质：由核内的质子和中子数目，以及质子和中子数目之间的比例所决定的性质叫核内性质。

核内性质决定了同位素的以下性质：①原子质量；②放射性（放射性衰变和放射性裂变）。

核内性质是原子核固有的性质。一般的外部地质环境与条件的变化不会引起核内性质的改变，即质量数、天然放射性衰变或裂变的半衰期均不受影响。这是稳定同位素示踪的基础条件之一。可以更清楚地说，在地球形成过程中，以及其后的所有阶段，例如，地核的形成阶段、壳-幔分异阶段、岩浆的部分熔融和分异结晶、构造作用、地表的各种风化和侵蚀作用等等都不会影响核内性质。

在特殊的条件下，如太阳内部核聚变反应，超新星爆炸，以及人造核裂变或核聚变反应中才可能引起核内性质的变化。

二、核外性质

核外性质：由核外电子的数量和分布所决定的性质叫核外性质。这即通常所讲的元素性质，它表现为不同元素之间的化学性质上的差别。

各种地质作用对于核外性质，即化学性质，都会有影响，包括各种化学反应的发生，元素的化学性质的变化等。

第三节 自然界同位素变化的原因

引起自然界同位素变化的原因有 3 种：放射性同位素衰变、放射性同位素裂变和核