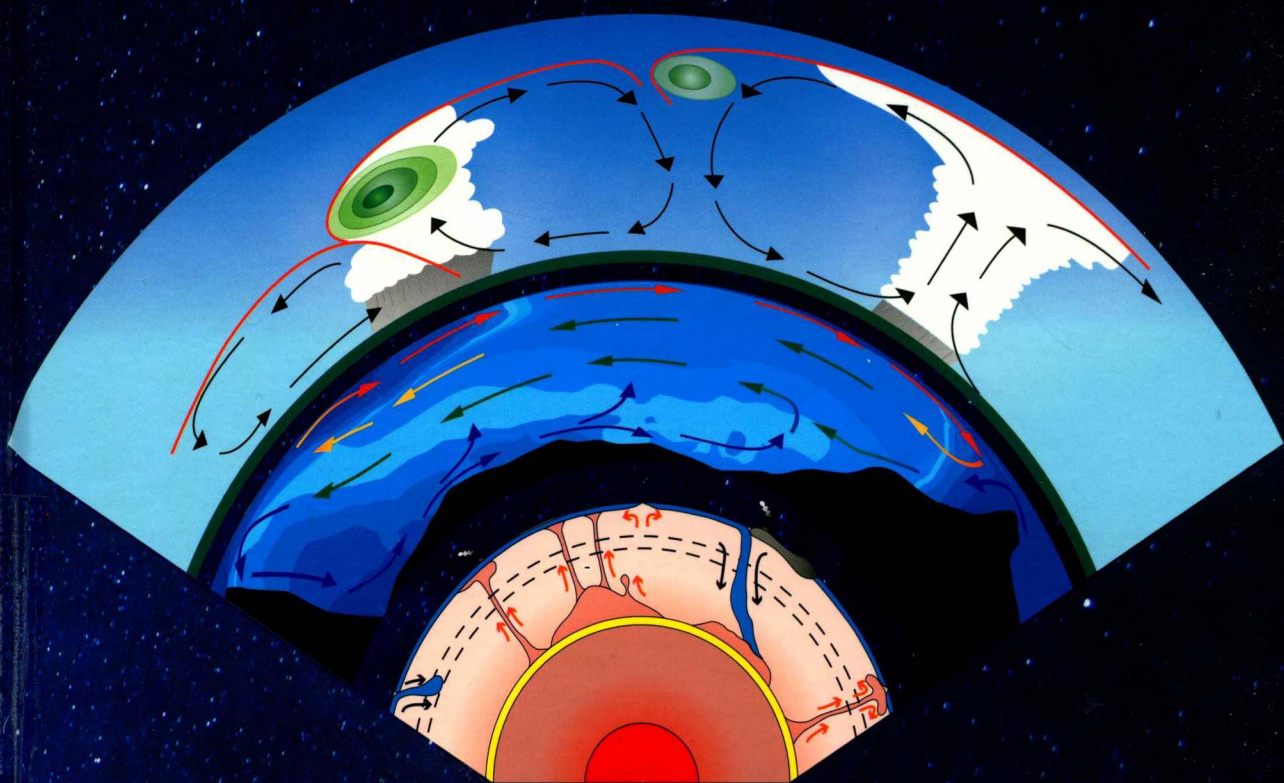
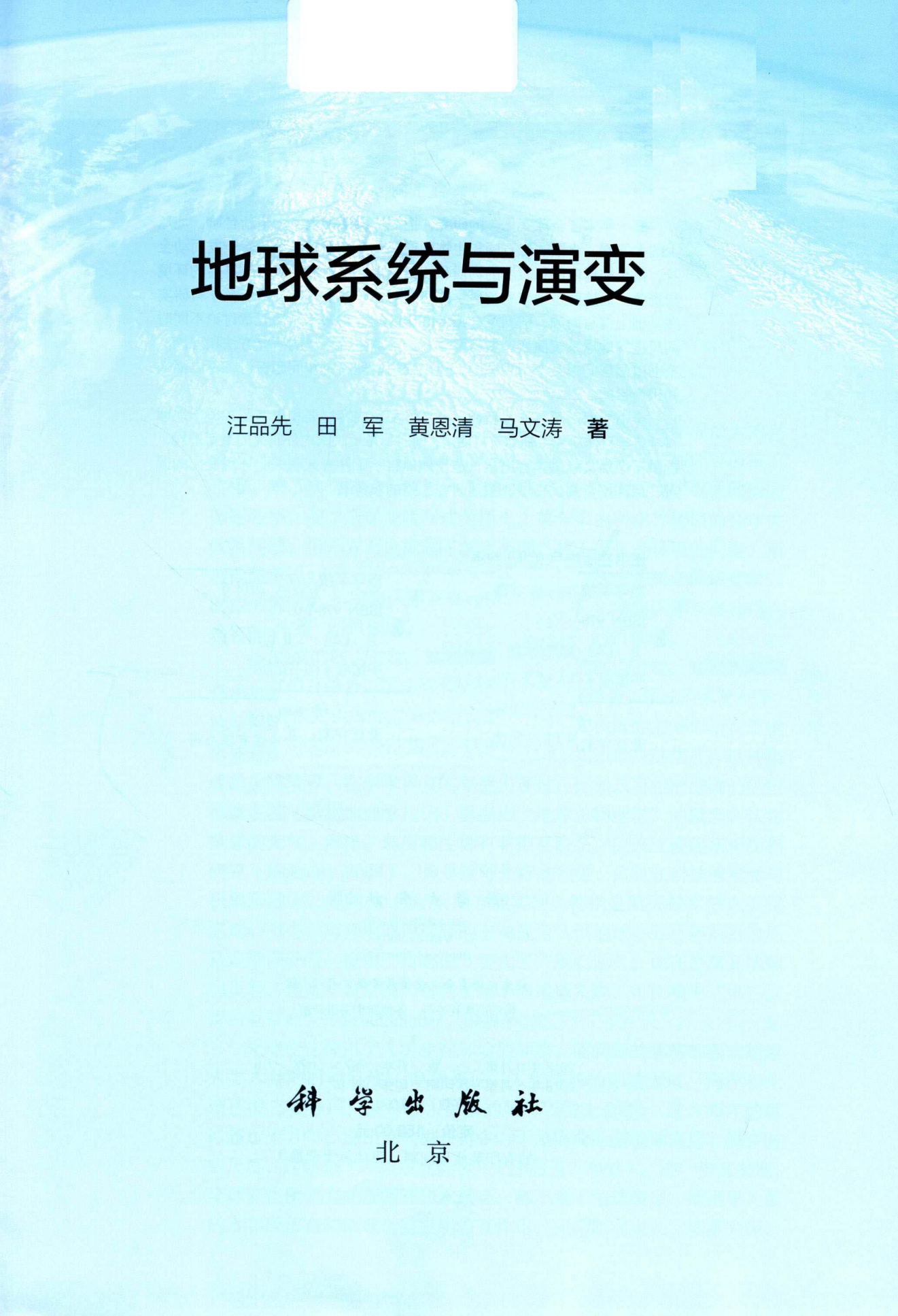


地球系统与演变

汪品先 田 军 黄恩清 马文涛 著



科学出版社



地球系统与演变

汪品先 田 军 黄恩清 马文涛 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

三十年来“全球变化”的研究，把地球科学推上了一个新台阶。地球上的大气圈、水圈、岩石圈和生物圈连成一个完整的系统，牵一发而动全身，甚至地球内部和表层的物质和能量交换，也在影响着人类享用的环境与资源，而这正是地球系统科学的研究对象。本书是在二十年教学科研实践基础上编写而成，前五章介绍各圈层的构成与来历，后五章讨论不同时间尺度的地球系统演变，最后两章介绍地球系统科学的研究方法和理论。全书以圈层间相互作用为主题，重点突出机理追究和问题探讨，不以灌输知识为目的。

全书版面活跃、形式新颖，各章均配有内容提要和思考题，适于地球科学各学科作研究生辅助教材使用；同时尽量反映国内外研究的最新进展，提供千余篇文献供读者追索，适于地球科学工作者或者关心环境变化的读者，用作拓宽知识领域、激活研究思路的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地球系统与演变 / 汪品先等著. —北京: 科学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-03-057604-0

I. ①地… II. ①汪… III. ①地球系统科学 IV. ①P

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 110035 号

责任编辑: 韩 鹏 孟美岑 / 责任校对: 张小霞
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世文化传媒有限公司

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 36 1/2

字数: 839 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

20 世纪 80 年代开始的全球变化研究，是 20 世纪科学界最大的亮点之一。为了追踪人类排放碳的去向，科学界从大气、海洋到植被、土壤，来了次空前的大清查。研究的结果，一方面引发了气候政治的国际斗争，使“全球变暖”成为历史上第一个由科学界提出的全球性政治问题；另一方面也掀起了学术高潮，将人类生存环境的问题，拓展到整个地球系统的科学研究。“全球变化”提出的科学问题要求向时空伸展，驱使学术界将地球表层看作整体，从宇宙大爆发追踪到人类智能的产生，诞生了研究“地球系统科学”的新领域。

现代科学的发展，经历了从分解到集成的回返过程。起先的趋势是学科越分越细，到一定程度又回过头来相互结合，集成为系统科学，地球系统科学就因此而诞生。在大数据时代知识爆炸的背景下，不但需要有综述的书刊加以汇总，更需要有科学知识本身的集成。这种集成的思想境界，在学术界其实早就出现过，比如二百年前德国的洪堡德就在其《植物地理学札记》里提出“地球总物理学”的概念，认为全球的大气、海洋、地质和生物有着相互联系，应该连接起来观测和研究（Jackson, 2009）。但是这种先哲的预见，只有在科技的发展与积累基础上，等到 20 世纪后期方能实现。特别是航天技术使人类克服地心引力，离开地球用遥感的宏观视角认识地球。五百年前哥白尼从地球向外看，提出“日心说”替代了“地心说”；现在是离开地球向里看，通过“显宏镜”看到了整个的地球系统，可比喻为“第二次哥白尼革命”（Schellnhuber, 1999）。

全球变化提出了人类生存环境的问题，而问题的解答却要求超越人类本身的时空尺度。拿碳来说，人类排放的碳被大气、海洋和土壤植被三者分担，但是进入土壤的碳可以待上百年，进入海洋的可以超过十万年，都比大气里长得多。于是需要跨越地球圈层、横穿时空尺度，这就是“地球系统科学”（汪品先, 2003）。进一步又发现，全球变化所研究的碳循环和水循环，都不限于地球表层，地幔里大量的水和碳都在和地球表层发生相互作用，只是时间太长、埋藏太深，

不易被人类发现。于是又提出了地球内部和表层过程相结合的研究，称为“行星循环”或者“地球连接”（IODP，2011）。

回顾历史，地球系统科学的源头在于全球变化的研究。1983年，美国国家宇航局建立了“地球系统科学委员会”，1988年发表了“地球系统科学”报告（Earth System Sciences Committee，1988），提出著名的“Bretherton图”，展示大气、海洋、生物圈之间，有着物理过程和生物地球化学循环的相互作用。1996年，美国提出将“地球系统科学”列入教学计划。从此之后，“地球系统科学”的课程和教科书接踵而来。在我国，地球系统科学的新方向早就受到重视，课程和出版物也为数众多，只不过出于理解的不同，有的变成了地球科学的“百科全书”，有的用作遥感观测或者数值模拟的新名称（汪品先，2014）。本书出版的目的一就是想正本清源，展示出这是探索地球圈层相互作用，整合各种学科，将地球作为一个完整系统来研究的学问。

在地球科学的诸多领域中，环境变化的研究和地球系统有着特殊的关系。这是因为环境变化涉及的地球圈层最多，环境变化中时间尺度的叠加也最为复杂。因此，这本教材最适合的读者，可能是有关环境变化学科的研究生。同时，地球科学任何学科的研究生，都可能从这本教材里找到与自己所研究问题的学科连接，拓宽视野，从相关学科的进展获得启发。为了便于自学，每章之前都列有提要，每章之后附有思考题，并且对书中重要的观点和论据，都提供了文献出处，便于读者进一步追索。

本书是作者20年课堂实践和三年编写工作的产物。同济海洋学院从1996年起开设“全球变化”课，2001年开设“地球系统”课，2011年两课合并为“地球表层系统与演变”，是一门随着国内外学术发展而与时俱进的研究生课程。三年来，全书和各章的结构均经反复修改，最终由分属3个部分的12章组成。第一部分从圈层结构入手，用五章的篇幅分别介绍地球系统的组成与起源、地球的表层与地幔、水循环、碳循环和生物圈；第二部分以时间尺度为纲，从第6章到第9章分别讨论构造尺度、轨道尺度和人类尺度的过程，并且对气候演变的转型和突变进行专门介绍；第三部分即最后的三章探讨地球系统的研究历史、方法与展望，包括全球变化、定量研究和地球系统运行机制的探索。本书是集体劳动的成果，除作者外，全书每章还特邀相应专家审阅，承陈大可、郭正堂、黄奇瑜、焦念志、林间、柳中晖、石耀霖、孙立广、孙枢、孙卫东、田丰、赵美训、周力平教授大力相助，提出宝贵意见，改进了本书的质量，谨此深表谢忱。感谢同济大学研究生院教改项目和海洋地质国家重点实验室的资助。

全书图片由魏小丽清绘。李科、杜金龙、冯华、凤羽、李金澜、李方舟进行了初期的文字编辑和图片校对工作。

参考文献

- 汪品先 . 2003. 我国的地球科学向何处去 ? 地球科学进展 , 18(6): 837–851.
- 汪品先 . 2014. 对地球系统科学的理解与误解——献给第三届地球系统科学大会 . 地球科学进展 , 29: 1277–1279.
- IODP. 2011. Illuminating Earth's Past, Present, and Future. The International Ocean Discovery Program, Scientific Plan for 2013–2023. Washington DC: IODP-MI. 84.
- Jackson S T. 2009. Alexander von Humboldt and the General Physics of the Earth. Science, 324: 596–597.
- NASA. 1988. Earth System Science: A closer View. Report of the Earth System Sciences Committee of the NASA Advisory Council January, 1988.
- Schellnhuber H J. 1999. “Earth system” analysis and the second Copernican revolution. Nature, 402: C19–C22.

内容提要:

● 地球各个圈层（除内核不了解外）内都有环流，自上而下圈层的密度加大，流速减慢。圈层间的界面，都有物质和能量的穿越。

● 氢和氦是宇宙大爆发的直接产物，占宇宙中元素丰度的 98% 以上。地球上众多的元素是在恒星演化中产生的，比 Fe 更重的元素由超新星爆发形成，只能来自太阳系之外。

● 地球的年龄为 45 亿年，与太阳和月球几乎一道产生，相差不过几千万年。月球是在地球形成约三千万年的时候，由一颗星体撞击熔融后形成，地球上层也熔融为岩浆海。

● 地幔占地球体积的 2/3、质量的 4/5，是地球的主体。地幔与地核的分异推测是通过“铁灾变”快速完成，地幔与地壳的分异则是长期的复杂过程，至今还在进行。

● 地球在距今 40 亿年进入太古宙后才有地质记录，此前的冥古宙由于不断的外来撞击和内部喷发，不可能有稳定环境。地球冷却后，大气中水蒸气凝聚降落，方才形成海洋。

● 最早的生命很可能出现在海底的热液活动区，属于化学自养、不产氧的嗜热微生物。最早的化石是微生物和由其生命活动产生的叠层石，至少在距今 35 亿年前已经产生。

● 最早进行有氧光合作用的是蓝细菌，起始于 27 亿年前。被吞噬的蓝细菌通过“内共生”变为叶绿体，产生了藻类；以后再发展为多细胞和陆生植物，使地球的生物生产力提高了几个数量级。

● 地球大气圈最大的转折是 24 亿年前的“大氧化事件”，从 CO_2 为主的还原大气变为含 O_2 的氧化大气。这次事件发生的背景，推测是太古宙末陆壳增多、岩浆活动成分变化的转折。

● 大气氧化后的陆地风化作用产生大量 SO_4^{2-} ，输送入海后与有机质相遇，在深海产生 H_2S ，使得元古宙的海洋只是表层氧化，深层水却是还原环境，导致生物演化的停滞。要到元古宙末发生第二次氧化事件，大气含氧量才接近现代水平，从而引发生命的大发展。



目 录

第 1 章 地球系统的组成与起源···001

1.1 地球系统的圈层结构·····	002
1.1.1 地球系统的圈层及其构成·····	002
1.1.2 圈层中的环流和圈层界限·····	006
1.2 地球的起源·····	008
1.2.1 宇宙大爆炸和元素起源·····	008
1.2.2 太阳系和地球的形成·····	012
1.2.3 月球的碰撞产生和地球的岩浆海·····	013
1.3 地球圈层的分异·····	016
1.3.1 地核、地幔和地壳的形成·····	016
1.3.2 水圈与大气圈的形成·····	017
1.4 生命和光合作用的起源·····	019
1.4.1 生命起源的证据和理论·····	019
1.4.2 光合作用起源的探索·····	022
1.5 氧化大气圈的形成·····	024
1.5.1 大氧化事件·····	025
1.5.2 硫化氢海洋·····	027
参考文献·····	030
思考题·····	034
推荐阅读·····	035

第 2 章 地球表层与地幔···037

2.1 地壳的形成和板块运动·····	038
2.1.1 洋壳的产生与俯冲·····	039
2.1.2 大陆地壳及其古老性·····	043
2.1.3 大陆增生与“俯冲带加工厂”·····	046
2.1.4 陆壳形成期与形成机制之争·····	048

2.1.5 板块运动起源的假说·····	050
2.2 威尔逊旋回与超级大陆·····	052
2.2.1 联合大陆的聚合与瓦解·····	052
2.2.2 地质历史上的超级大陆·····	055
2.2.3 内大洋与外大洋的演变·····	059
2.3 地幔柱与大火成岩省·····	063
2.3.1 热点与地幔柱·····	063
2.3.2 大火成岩省·····	064
2.4 地幔环流及其两极性·····	067
2.4.1 地幔底部低速区的不均匀性·····	067
2.4.2 地幔环流与地球的东西两极结构·····	071
2.4.3 威尔逊旋回的前因与后果·····	073
2.4.4 西太平洋演变的深部原因·····	076
参考文献·····	079
思考题·····	084
推荐阅读·····	085

第3章 地球系统的水循环···087

3.1 水的特性与地球表面过程·····	088
3.2 地球系统中水的赋存·····	093
3.2.1 地球表层水的分布与变化·····	093
3.2.1.1 气态水·····	094
3.2.1.2 液态水·····	097
3.2.1.3 固态水·····	100
3.2.2 地球内部的水与板块运动·····	104
3.2.2.1 地球内部水的储量与分布·····	104
3.2.2.2 地球表层与内部的水交换·····	106
3.2.2.3 板块运动与水·····	107
3.3 地球表层系统的水循环·····	109
3.3.1 水循环的全球视野·····	109
3.3.2 水的三相转换与气候·····	112
3.3.2.1 气态与液态的转换·····	112
3.3.2.2 固态与液态的转换·····	118
3.3.2.3 三相转换的气候意义·····	124
3.4 追踪水循环的地质标志·····	125
3.4.1 水文循环中的氢、氧同位素分馏·····	125
3.4.2 水文循环的其他替代性标志·····	128
参考文献·····	131

思考题	138
推荐阅读	139

第4章 地球系统的碳循环···141

4.1 引言：温室气体与碳	142
4.2 地球系统各圈层中碳的赋存	143
4.2.1 大气圈	144
4.2.2 陆地生物圈	146
4.2.3 水圈	147
4.2.4 岩石圈与地球深部	148
4.2.5 碳储库与稳定同位素	149
4.3 地球表层系统的碳循环	151
4.3.1 寻找失踪的碳	151
4.3.2 表层海的碳汇与碳源	152
4.3.3 深层海的碳汇与碳源	154
4.3.4 陆地的碳汇与碳源	156
4.3.5 生命过程与水、碳循环	158
4.4 冰与碳：冰期旋回里的碳循环	159
4.4.1 海洋碳泵	160
4.4.2 陆地碳库	162
4.4.3 碳循环的时间尺度	163
4.5 地质碳储库的演变	164
4.5.1 地质碳储库	164
4.5.2 早期地球的碳储库演变	166
4.5.3 显生宙的碳储库演变	168
4.5.3.1 海洋碳同位素变化	168
4.5.3.2 海洋碳酸盐沉积	170
参考文献	173
思考题	178
推荐阅读	179

第5章 生物圈及其演化···181

5.1 重新认识生物圈	182
5.1.1 地球系统里的生物圈	182
5.1.2 微生物——地球生态系统的基础	183
5.1.2.1 微型光合生物	183
5.1.2.2 黑暗食物链和深部生物圈	186
5.1.2.3 微生物与地球系统科学	192

5.1.3 生物重新分类	195
5.1.3.1 从形态分类到化学分类	195
5.1.3.2 真核生物的演化和分类	197
5.2 生产力与化学过程	202
5.2.1 新陈代谢途径的多样性	202
5.2.2 生源要素的循环	204
5.2.2.1 氮循环和碳循环	204
5.2.2.2 限制性营养元素：磷还是氮	207
5.2.2.3 硫循环和生源要素的耦合	210
5.2.3 生物泵和海洋有机碳	212
5.2.3.1 微生物碳泵和溶解有机碳	212
5.2.3.2 两种类型的碳循环	215
5.2.3.3 海洋有机碳库的演变	217
5.3 生物演化与地球系统	219
5.3.1 生物圈的发展	219
5.3.1.1 真核生物和多细胞生物的产生	219
5.3.1.2 底栖动物及其骨骼的出现	221
5.3.1.3 生物圈登陆	224
5.3.2 浮游生物演化与环境	224
参考文献	228
思考题	234
推荐阅读	235

第6章 构造尺度的演变···237

6.1 地球系统演变的时间尺度	238
6.1.1 能量和物质的转移	238
6.1.2 构造运动概念的变更	241
6.1.3 构造运动的时间尺度	244
6.2 海陆分布与环境演变	245
6.2.1 海陆分布的环境影响	245
6.2.2 海道启闭的环境效应	248
6.2.2.1 白令海道开启和北冰洋的演变	249
6.2.2.2 巴拿马和印尼海道关闭与大洋的不对称	253
6.2.2.3 德雷克和塔斯马尼亚海道开启与南极冰盖的形成	257
6.2.3 大陆破裂的环境效应	260
6.3 岩浆活动与环境演变	262
6.3.1 地幔柱与大洋缺氧事件	262
6.3.1.1 白垩纪大火成岩省	262
6.3.1.2 白垩纪缺氧事件	264

6.3.1.3 白垩纪环境变化	266
6.3.2 火山喷发与生物大灭绝	266
6.3.3 海底扩张与海水化学	270
6.4 地形改组与环境演变	274
6.4.1 古高度再造	275
6.4.2 地形和水系	275
6.4.3 剥蚀与沉积	278
参考文献	280
思考题	287
推荐阅读	288

第7章 轨道尺度的演变···291

7.1 地球上的周期性过程	292
7.1.1 循环, 周期, 韵律	292
7.1.2 冰期旋回及其轨道驱动的发现	294
7.1.3 地球过程中的天文因素	296
7.2 轨道驱动的气候变化	298
7.2.1 轨道参数的周期变化	298
7.2.1.1 斜率	299
7.2.1.2 偏心率与岁差	302
7.2.1.3 轨道参数的不稳定性	305
7.2.2 气候旋回的轨道驱动	306
7.2.2.1 冰期旋回的轨道驱动	307
7.2.2.2 低纬过程的轨道驱动	309
7.3 地球过程轨道驱动研究的发展	311
7.3.1 地质历史上的轨道周期	311
7.3.1.1 前第四纪的轨道周期	311
7.3.1.2 地质计时的天文标尺	314
7.3.2 轨道驱动的计算和应用	316
7.3.2.1 轨道驱动的计算问题	316
7.3.2.2 轨道驱动的机制研究	317
7.3.3 地球表层过程中的轨道因素	320
7.3.3.1 轨道驱动下的潮汐作用和海洋过程	320
7.3.3.2 轨道周期与内力作用	321
7.3.3.3 地外星球上的轨道周期	322
参考文献	326
思考题	332
推荐阅读	332

第 8 章 周期转型和气候突变···335

8.1 冰期旋回的多样性与跨冰期变化·····	336
8.1.1 冰期的多样性·····	336
8.1.2 间冰期的多样性·····	338
8.1.3 跨冰期变化·····	342
8.2 气候周期变化的转型·····	343
8.2.1 暖室期和冰室期的轨道周期·····	344
8.2.2 南极冰盖发育中的气候转型·····	346
8.2.3 北半球冰盖发育中的气候转型·····	348
8.3 气候环境的突变·····	352
8.3.1 冰消期的气候突变·····	352
8.3.1.1 末次冰消期·····	353
8.3.1.2 历次冰消期的比较·····	354
8.3.2 火山爆发事件·····	357
8.3.3 天体撞击事件·····	360
8.3.3.1 从微陨石到小行星·····	360
8.3.3.2 白垩纪末撞击事件与生物大灭绝·····	361
8.3.4 特大洪水事件·····	362
8.3.5 突发升温事件·····	366
参考文献·····	369
思考题·····	376
推荐阅读·····	377

第 9 章 人类尺度的演变···379

9.1 人类尺度环境变化的研究·····	380
9.1.1 人类尺度演变的记录载体·····	381
9.1.1.1 冰芯·····	381
9.1.1.2 纹层, 石笋, 珊瑚, 树轮·····	383
9.1.2 人类尺度演变的测年方法·····	385
9.1.3 人类尺度演变的驱动机制·····	386
9.2 千年尺度演变的发现及其机理探索·····	387
9.2.1 冰芯记录的千年尺度变化·····	387
9.2.2 深海记录的千年尺度变化·····	388
9.2.3 石笋记录的千年尺度变化·····	391
9.2.4 “大洋传送带”·····	394
9.3 外因驱动下的人类尺度演变·····	399
9.3.1 轨道驱动的千年尺度变化·····	399
9.3.1.1 半岁差和 1/4 岁差·····	399

9.3.1.2 潮汐作用与月球轨道周期	401
9.3.2 太阳活动周期与气候	405
9.3.2.1 太阳活动周期的发现	405
9.3.2.2 气候演变中的太阳活动周期	407
9.4 现代环境的周期变化	410
9.4.1 厄尔尼诺 - 南方涛动	410
9.4.2 年际 - 年代际尺度的气候涛动	412
参考文献	415
思考题	422
推荐阅读	423

第 10 章 全球变化与古环境研究···425

10.1 全球变化的提出与研究现状	426
10.1.1 全球变化科学问题的提出	426
10.1.2 全球变化与气候外交	428
10.1.3 全球变化的观测证据	430
10.1.4 全球变化研究的国际合作	433
10.1.4.1 国际研究计划的演进	433
10.1.4.2 国际地圈 - 生物圈计划三十年	434
10.2 全球变化的科学问题与争论	437
10.2.1 温室效应的历史争论	437
10.2.2 围绕全球变化的科学争论	441
10.2.3 关于气候工程学的争论	443
10.2.4 关于地球未来的争论	444
10.3 全球变化与古环境研究	446
10.3.1 “人类世”——在“古”“今”之间拆墙	446
10.3.1.1 “人类世”的提出	446
10.3.1.2 “人类世”的争论	447
10.3.2 地质时期的全球变化	450
10.3.2.1 早新生代的高温期	451
10.3.2.2 高温期的全球变化	452
10.3.3 地外星球的全球变化	453
10.3.3.1 火星上的全球变化	453
10.3.3.2 金星的大气圈	456
10.3.3.3 外行星卫星上的全球变化	457
参考文献	460
思考题	468
推荐阅读	469

第 11 章 地球表层系统的定量研究…471

11.1 从定性到定量：地球科学的演变	472
11.1.1 地球科学量化的起步	472
11.1.2 多元统计方法的应用	474
11.1.3 地球科学量化的发展	477
11.2 地球表层的观测系统与数据管理	478
11.2.1 遥感观测平台	478
11.2.2 地面 / 海洋观测平台	480
11.2.3 海底观测平台	481
11.2.4 地球内部的观测	483
11.2.5 大数据和互联网	484
11.3 古环境定量再造与替代性标志	486
11.3.1 海水古温度——替代性标志的实例	486
11.3.2 替代性标志的应用和错用	490
11.3.3 替代性标志的发展前景	491
11.4 地球系统的数值模拟	492
11.4.1 数值模拟的产生	493
11.4.2 数值模拟的类型	494
11.4.3 地球系统模式	499
11.4.4 数值模拟的前景和局限性	502
参考文献	504
思考题	510
推荐阅读	510

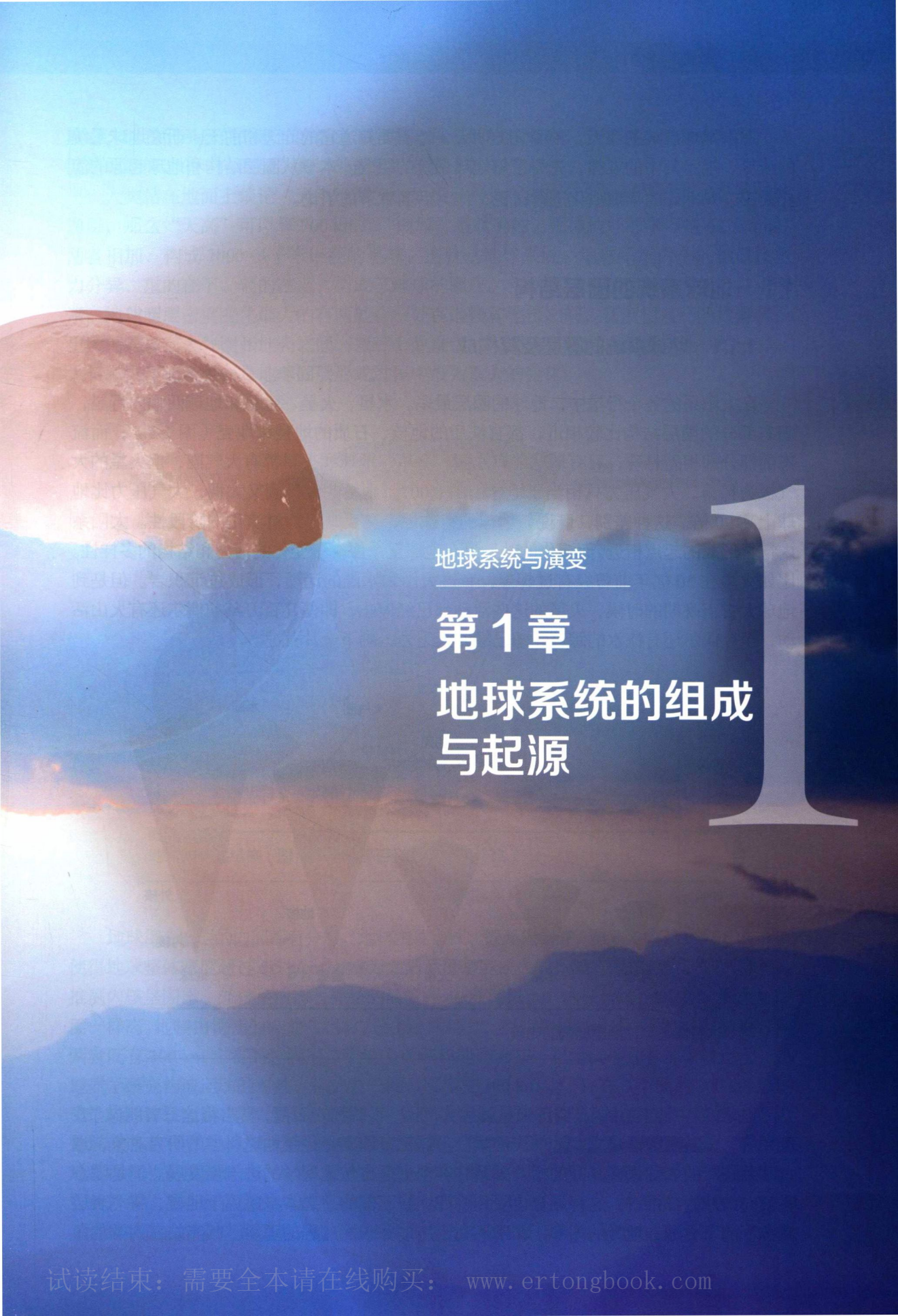
第 12 章 探索地球系统的运行机制…513

12.1 地球科学的历程：从现象描述到机理探索	514
12.1.1 地球科学的视野	514
12.1.2 地球科学的理论探索	516
12.1.2.1 地球科学中的定律	516
12.1.2.2 19 世纪的进化论	517
12.1.2.3 20 世纪的活动论	518
12.1.3 寻求地球系统科学的理论	521
12.2 地球系统：理论探索的展望	523
12.2.1 行星循环和比较行星学	523
12.2.2 能量和熵	527
12.2.3 生物圈大电场	532
12.3 地球演变：变化历程与运行机制	536

12.3.1 从元素起源到生命产生	536
12.3.2 生物圈和地圈的协同演化	538
12.3.3 地球系统运行机制的探索	541
12.3.3.1 跨越时间尺度的现象	541
12.3.3.2 穿越空间圈层的交换	542
参考文献	543
思考题	547
推荐阅读	548

缩写名词···549

索引···554



地球系统与演变

第 1 章 地球系统的组成 与起源

1