

垂向时间：地质学家的计时簿

TIMEFULNESS: HOW THINKING LIKE A GEOLOGIST HELP

SAVE THE WORLD / 马西娅·比约内鲁德

序言 垂向时间的魅力

1. 时间是人类公认的超自然力量。——哈尔多尔·拉克斯内斯《冰川之下》；
2. 时间暂且被“废止”；成人世界中压抑的日程表魔法般地暂停了，向大自然的权威让步；
3. 过去的事情仍然存在，甚至觉得这些时间会在未来某一天以迷人的面貌再次上演；
4. 这种感受并非窥探到了“时间无限”（timelessness），而是洞见了“时间无处不在”（timefulness），敏锐地意识到了世界是如何被时间塑造——确切地说，由时间“构成”的；

第一章 垂向时间的意义

1. 时间恐惧症（chronophobia），虚荣心与存在主义恐惧的结合；
2. 地球历史中恢弘篇章的持续时间、过去环境不稳定期之间的变化速率，以及地下水系统在内的自然资本（natural capital）的固有时间尺度；
3. 对地球历史的无知削弱了人类对现代性所宣告的所有抱负；
4. 在地质学入门课程的早期阶段，学生们就会明白“岩石”并非名词，而是动词，因为其见证了各种地质过程的演化……人类目光所及之处，岩石是历史长河中各类地质时间留存下来的证据；
5. 在过去 200 多年里，全球各地的岩石所讲述的区域性故事被逐渐地整合在一起，织就了一幅壮丽的地球图景——地质年代表……由来自不同文化和信仰的地层学家、古生物学家、地球化学家和地质年代学家辛苦构建而成；
6. P. T. Barnum “世界上不存在负面的曝光”；
7. 石油的勘探全部依赖于对地质年代沉积记录的缜密认知；
8. 尽管人类对长远视野的需求正变得更加急切，但我们注意力的持续时间正在缩短，因为我们都忙着在封闭又自恋的“当下”发短信和推文；
9. 由于物理和化学这两门学科的研究工作可以做到精确量化，两者在学术追求中位于最高梯队。但是，要想如此精确地描述大自然的运作机制，必须将研究条件限定在高度受控的完全“不自然”的条件下，脱离任何特定的历史时刻；
10. 物理和化学之所以被称为“纯”科学，是因为两者在本质上是纯粹的，不受时间的影响，只专注于追求普遍的真理和永恒的法则；
11. 生物学和地质学领域在学术界体重处于较低的位置，因为两者经历了时间的反复冲刷，非常“不纯粹”，缺乏一锤定音的确定性；
12. 生物学和地质学的核心，是在宇宙这个特定角落的历史长河中孕育而生的独特而又缤纷的生物、矿物和景观；
13. 高中进阶先修课程（advanced placement program）；
14. 在 20 世纪 70 年代之前，地球科学本身尚未形成一套完善的分析工具，无法将复杂自然系统在十年到百年时间尺度上的运作方式概念化；
15. 对于错综复杂的自然系统而言，即使是微小的变化，也会产生巨大且意想不到的后果；

16. 换句话说，是时候了，所有的学科都应该采用地质学的方法来尊重时间，及其转化、破坏、更新、扩大、侵蚀、繁殖、盘结、创新和灭绝事物的能力；
17. 就像显微镜和望远镜把人类的视野扩展到了曾经无法看到的微小与巨大的空间领域中一样，地质学提供了一个镜头，让我们能够以一种超越人类经验限制的方式见证时间；
18. 极其缓慢（*larghissimo*）；
19. 我们都是地球的公民，地质构造、水文和大气的运作方式并无国界之分；
20. 无穷这一概念拥有多种尺度和形态；

第二章 时间地图集

21. 虽然我们仅仅寄居在地球表面，被束缚于太空中的一点，只存在了短短一瞬，但人类的头脑不仅能计算出凡人眼所不能及的世界，还能追踪人类诞生之前的年代不明的各类事件。——查尔斯·莱伊尔（Charles Lyell），《地质学原理》（*Principles of Geology*），1830 年；
22. 在地球上的每一处，即使新的篇章正在被书写，先前地质时代的遗迹仍然保留在地形的轮廓及下伏的岩石之中；
23. 地质学这门学科就像是一种能够“看到”地球书写在各个维度中的“文字”的光学器件；
24. 地质学关注的并非时间本身的性质，而是它无与伦比的转化之力；
25. 詹姆斯·赫顿（James Hutton）在岬角西卡角（Siccar Point）注意到两个沉积岩层序（*sequence*）
26. 之间是不连续的，以此做出两个假设并解释。赫顿基于对自家土地的侵蚀速度的估计，声称这种不连续的现象[即角度不整合（*angular unconformity*）]代表了一段极为漫长的侵蚀过程；
27. 赫顿用地质学的基本思想，即均变论（*uniformitarianism*），取代此前的世界观。均变论假设，当今正在进行的地质过程也以同样的方式发生于地史时期；
28. 赫顿的支持者查尔斯·莱伊尔更是通过其文采斐然的传世巨著《地质学原理》，将均变论提升为正统学说；
29. 如果没有赫顿和莱伊尔，查尔斯·达尔文（Charles Darwin）就无法领悟到时间的强大力量，即通过自然选择塑造生物；
30. 19 世纪初，世界上第一张经过良好校准的深时图表的初稿诞生。这归功于从事运河挖掘工作的威廉·史密斯（William Smith）的敏锐观察，他发现某些特定类型的贝壳化石以相同的顺序出现在英国各地的地层中；
31. 就像药盒帽（*pillbox hat*）与喇叭裤可作为特定年代的文化标志一样，标志化石（*index fossil*）同样能够指示特定的地质年代。据此，地质学家可以将空间上不连续的地层联系起来；
32. 经过数十年艰苦的测绘、收集、分类、编目、统合（*lumping*）和分割（*splitting*），地质学家们最终发现，全球各地的沉积序列存在相关性；
33. 1897 年，亨利·贝克勒尔（Henri Becquerel）意外发现放射性现象。仅仅 10 年后，放射性技术就已经被用来确定岩石的年龄；
34. 同位素（*isotope*）、母体同位素（*parent isotope*）、子体同位素（*daughter isotope*）；
35. 1902 年，巴黎的玛丽·居里和剑桥的欧内斯特·卢瑟福通过研究表明，放射性衰变（*radioactive decay*）如同天然的“炼金术”；在该过程中，一些元素（如铀）在转化成其他元素（如铅）时会自发地释放能量，而且释放能量的速率很稳定，与第一种元素的剩余量成比例；
36. 彼时地质年代学（*geochronology*）尚未成熟，若想将放射形同位素用作高精度地质“时钟”，就要借助核物理学、宇宙化学（*cosmochemistry*，研究元素在恒星中的起源）、岩石学（*petrology*，主要研究岩浆岩与变质岩）、矿物学方面的进展，以及能够在一种元素的多种同位素中进行区分的质谱仪；
37. 同位素测年法无法反映沉积物的年龄，只能指示原岩（岩浆岩或变质岩）的结晶时间；
38. 在地层露头处，生物地层年龄（*biostratigraphic age*）受到限制的沉积岩碰巧被岩浆岩包裹或切割。如此

一来，同位素年龄可与化石记录直接匹配。火山灰层便是实现这一目的的理想露头，因为他们代表在某一地质时刻，从空中落下的新形成的岩浆岩结晶，与彼时的沉积物和古生物交叠在了一起；

39. 主流的观点是，除了标记区域性或全球性突发事件（如大规模火山喷发或陨石撞击）的地层，横向延展的沉积单元（sedimentary unit）并不具有严格意义上的等时性（isochronous），即它们标记的并非同一时刻。相反，它们记录了地球表面的沉积环境随着海平面和环境条件的改变而缓慢演化的过程。用地质学术语来说，这些沉积单元具有穿时性（diachronous），即它们横跨时间；

40. 国际地层委员会（International Commission on Stratigraphy）、国际地质科学联盟（International Union of Geological Science）、全球界线层型剖面 and 点位（Global Boundary Stratigraphic Section and Point, 简称“GSSP”、俗称“金钉子”）；

41. 即便岩石[对应前文所指的“时机”（kairos）]不存在，时间（chronos）依旧存在；反之则不然。然而，时间会消逝，岩石却会留存下来；

42. 哈勃常数（Hubble constant）；

43. 克莱尔·帕特森（Clair Patterson）使用地外岩石用作参考值。陨石代表行星形成前的物质，以及与地球和太阳系其他天体同时形成的行星在遭遇不测后留下的碎片。因绝大多数陨石在宇宙真空环境中并未发生变化，在进入地球大气层并在地表停留时间中，形成的外壳保护内里太阳系形成初期原始物质保持稳定；

44. 帕特森使用含铅但不含铀的铁陨石（iron meteorite）作同位素分析的原始值，同时含有铅和铀的石陨石（stony meteorite）能够提供比所有地球岩石都更为可靠的地球整体现代值；

45. 帕特森为避免样品的污染问题，在美国阿贡国家实验室（Argonne National Laboratory）研发出第一个具备先进空气净化和通风系统的“洁净实验室（clean laboratory）”，并于1956年测定出至今依旧公认的地球年龄——45.5 亿±7000 万年；

46. 如今，仪器精密度的提升使我们能够检测到矿物中浓度低至十亿分之一甚至万亿分之一的元素；

47. 一些岩石包含两种及以上的矿物，其中每一种矿物都可以使用不同的母体—子体同位素体系来定年，并得到不同的年龄结果。上述现象是因为组成岩石的矿物拥有不同的封闭温度（closure temperature），对矿物的形成有重大影响；

48. ^{14}C 的半衰期仅有 5730 年，无法用来测定年龄超过 6 万年的物质；

49. ^{14}C 是由大气层高处的氮-14（ ^{14}N ）原子被宇宙线（cosmic ray）撞击所产生的，宇宙线的能量足以将一个质子从氮的原子核中撞出。其中的一些 ^{14}C 会到达地表，被光合作用系统（藻类、植物等）及以它们为食的生物体（如鱼类、真菌、哺乳动物）吸收；

50. 在生物存活的过程（进行光合作用、呼吸、进食）中，它的碳同位素组合（稳定的 ^{12}C 和 ^{13}C ，以及具有放射性的 ^{14}C ）就会反映出环境中的碳的相对丰度。在生物死亡后碳储量会固定，而后放射性 ^{14}C 会逐渐减少，而稳定的碳同位素会保留下来；

51. 与其他同位素测年法相比， ^{14}C 定年技术是基于碳的当前活性（activity）——单位时间内内每克碳的衰变事件数。因为 ^{14}C 会衰变成 ^{14}N ，由此产生的氮气往往不会停留在样品之中；

52. 因与高层大气中 ^{14}C 形成速率相关的宇宙线会受地球磁场的影响而变化， ^{14}C 测年不确定性较大。虽然其结果可以用树木年轮（因在给定年份中，只有树木外层积极与环境交换碳）、珊瑚生长带来校准，误差会缩小至几百到几千年间；

53. 人类过往的核试验和化石燃料的大量使用改变了大气层中 ^{14}C 的含量，测定的年龄常被汇报为 1950 年之前的年份；

54. 化石燃料的苏斯效应（Suess effect）；

55. 为解决 K-Ar 定年法中氩对结果的影响，新方法应运而生。其主要是在加热样品（模拟变质作用）后使用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测定样品在各个阶段的表现年龄（apparent age）；

56. 一般而言，从最初捕获的几个氩（代表晶体外部最容易逸出的非大气圈氩）样品中获得的年龄比晶体内部样品的年龄要小。如果通过持续加热获得的表现年龄稳定在一个恒定值附近[地质年代学家称之为“ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄”（ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age）]，那么就有充分的理由认为：晶体内部没有经历过显著的氩

损失，测出的同位素年龄具有地质学意义；

57. 沃尔特·阿尔瓦雷茨（Walter Alvarez）建议测量边界黏土层中某些铂系元素（platinum group）稀有金属的浓度，比如铱（Ir），其主要随着缓慢但持续的微陨星辰（micrometeoritic dust）降落到地球表面。根据黏土层与石灰岩层中铱浓度的差异，其推测可能有“天外来物”带来相关物质；

58. 20 世纪 80 年代末，玻璃陨体（tektite，岩石在高速撞击下熔融形成的球状和泪滴状玻璃）的踪迹表明，加勒比地区（Caribbean region）最有可能是白垩纪末的“原爆点”（ground zero）的所在地；

59. 在该地采集的三个样品 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄加权平均值为 65.07 ± 0.10 百万年，与国际地层委员会定义的白垩纪终结的准确时间相同；

60. 锆石是地质年代学家的“梦想之石”（也是阿瑟·霍姆斯在第一次测定地质年代时使用的矿物）。在结晶时，锆石会让铀进入它的晶体结构，但不接受铅。而且，铀本身有两种放射形母体同位素，两者会衰变为不同的子体铅同位素，因此锆石本身就能交叉检验是否有子体同位素损失。如果 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的年龄匹配，则称该数据为一致（concordant）年龄；

61. 对某块岩石中不一致（discordant）锆石进行统计分析，不仅能够得出它们的结晶年龄，而且往往能够获知导致铅损失的变质事件发生时间；

62. 古老的锆石晶体通常具有同心圆状的环带（如同年轮），晶体的核心记录了其最初从岩浆中结晶出来的过程，依序分布的环带则反映了锆石在后续的变质事件中生长的过程；

63. 超高分辨率离子微探针质谱仪（Sensitive High Resolution Ion Micro probe，简称 SHRIMP），能够识别宽度为 10 微米的单条“生长环带”，进而确定其同位素比值；

64. 西澳大利亚州杰克山区（Jack hills）锆石论文——100 多年来同位素地球化学研究的巅峰；

65. 绘制地质年代表是一项凝聚了全人类智慧的大工程，需要的就是互换想法；

第三章 地球的步伐

1. 冰岛近海的叙尔特赛岛（Surtsey）；

2. 多亏了地质年代学的高精度分析技术、从太空直接观测地球过程的卫星，以及一个世纪以来对地球“生命体征”（气温、降水、河流径流量、冰川动态、地下水储量、海平面变化、地震活动）的监测，许多从前人类似乎无法直接观测到的地质过程，都能够被实时记录下来；

3. 我们发现，与此前认知不同，地球的步伐既没有那么慢，也没有那么恒定；

4. 大陆地壳（continental crust）是由年代和演化历史不同的多种类型岩石混杂而成的；大洋地壳（oceanic crust）的成分简单且均一；

5. 洋壳全部由玄武岩组成，而且这些玄武岩都是以相同的方式形成的：以高耸的洋中脊（mid-ocean ridge）为标志，由海底火山裂谷下方的地幔部分熔融而成；

6. 地幔对流（mantle convection）是地球主要的热损失机制；

7. 造成地幔岩石熔融的原因并非热量的输入，而是压强的降低；

8. 减压熔融（decompression melting）：如果岩浆在地下某一深度的温度接近熔点，并且压强降低（例如向地表上升），那么岩石更倾向于转化为低密度相态的熔体，岩浆就此形成。即使岩石正在冷却；

9. 对于滑雪者和滑冰者来说，冰雪表面随压强增加导致的融化现象，正是涉及冰面湿滑的冬季运动的基础原理；

10. 洋中脊像刚出炉的舒芙蕾一样高高耸起；

11. 海底扩张（seafloor spreading）外现出的洋中脊，其横截面形态本质上是一对呈镜像分布的冷却曲线（cooling curves）——两个滑雪板头对头放置在地上的形状；

12. 从洋中脊的山脊线向外，地形和磁场强度的读数均呈镜像对称；

13. “寒冷”海水会自玄武岩之上的裂缝和气孔竭尽所能地偷走热量，然后通过水下间歇泉——黑烟囱（black smoker）溜走，过程中钙、钠元素发生交换，该机制亦会调节海洋盐度；

14. 据估计，世界上所有的海水会在约 800 万年里流经洋中脊的岩石；
15. 并非所有渗透到玄武岩中的海水都能再次回到水循环，其可能停留在岩内并与矿物形成化学键，从而长期封存在洋壳中；
16. 水循环是一种相对短暂的现象，水分子滞留在大气层内的平均时间约为 9 天，淡水湖中水分滞留百年，深层地下水可能储存有上千年。地球内部存在一个周期长达一亿年的水循环，而将水添加到地幔中，实际上是“制造陆壳”的关键步骤；
17. 水使俯冲板块上方的地幔楔形体（mantle wedge，地幔楔）中的固态岩石在较低温下也能熔融，如同盐会降低冰的熔点；
18. 现代地球的板块构造是一个超凡系统。洋壳的形成、成熟与最终消亡，都是陆壳形成的必要条件——包含出生、死亡和重生的完美轮回；
19. 山脉并非静态的不朽的纪念碑，而是动态事件的记录；
20. 山脉“和谐”的形态代表“山体内部的抬升力”与“水流对山体外部的雕刻力”相互抵消的结果；
21. 一旦应力开始造山，高效的“侵蚀团队”便会就位，并开始拆除。因此，我们需要找到方法来单独衡量这些相互抗衡的地质过程；
22. 掘升作用（exhumation）、裂变径迹年代测定（fission track dating）是测算山体剥蚀量的方法之一；
23. 另一种山体剥蚀量的测算方法是观察堆积在山脚下的沉积物体量；
24. 喜马拉雅山的剥蚀岩屑在海底聚集成了一座巨大的扇形沙滩——印度河海底扇与孟加拉海底扇。侵蚀作用（剥蚀）搬离的岩石比现存的喜马拉雅山更多；
25. 山脉（或任何景观）的无常天性，是岩石记录中的不整合面如此迷人的原因之一。不整合面保留了被埋藏的地形，使人们得以窥见早已消失的远古地貌；
26. 美国威斯康星州巴拉布山区（Baraboo Hills）；
27. 体量巨大的沉积物也强调了一项关于地球的惊人事实：由地球内部的放射性衰变热（radioactive heat）驱动的构造作用的速度，与由重力和太阳能驱动的外部侵蚀营力（如风、雨、河流、冰川）的速度，碰巧势均力敌；
28. 塑造了地貌的各种过程此起彼伏又如此相称，这是地球卓越的属性之一；
29. 强有力的证据表明，在志留纪早期（约 4 亿年前），植物在陆地上的扩张减缓了全球的侵蚀速度，并造就了河道清晰的溪流；
30. 在地质年代中，生物演化的速度与构造演化和地貌变迁的速度十分吻合；
31. 或许在另一颗截然不同的星球上，由于地表形态变化得过于快速，宏观生命的演化无法与之匹配；好比芭蕾舞乐团演奏得太快，舞者们跟不上节奏。幸运的是，地球“乐团”的所有成员（火山、雨滴、蕨类植物、鸣禽等）都在同步演奏；
32. 侵蚀速度取决于天气和气候，而构造地形能够同时改变两者
33. 在分泌方解石的生物体死亡后，它们的矿物质残片会落到海底，形成石灰岩，将大气层中的二氧化碳以固体形式封存起来，保存数千万年。这就是地球的长期碳固存（carbon sequestration）计划，而且当大量新鲜的岩石表面可以进行化学风化作用时，碳固存的效率会更高；
34. 喜马拉雅山的生长不仅影响了局部和区域性的天气模式，还影响全球范围内的气候甚至地形，并最终帮助地球进入冰期，其间形成的冰川和冰帽重塑了世界各地的地貌；
35. 山脉的形成源自构造碰撞与地壳增厚，如此巨量的岩石堆积在上地幔（软流圈，asthenosphere）会导致其发生位移；而当侵蚀作用占主导并减轻上覆岩体重量后，发生位移的上地幔逐渐“流回”原来位置，山脉整体随之上升。此即为地壳均衡回弹（isostatic rebound），同样会发生在冰川覆盖区；
36. **在山脉的整个生命过程中，地壳变形、气候、侵蚀和上地幔位移好像在共同演绎一支舒缓的互动式舞蹈，每位“舞者”都影响着其他人的运动。不过大家的慢动作“编舞”有时会被突如其来的跃步和小跳打断（地震）；
37. 近一个世纪，地震学研究将弹性波（elastic wave）理论、实验岩石力学（experimental rock mechanics）

与古今断裂带的分析成果整合在了一起，能够从地震图（seismogram）与记录的曲线中提取多种类型的定量推论；

38. 断层带（fault zone）；

39. 假玄武玻璃（pseudotachylite）是局部摩擦熔融的产物，该现象仅在地壳的滑动速度达到每秒数米时才会产生，即地震期间；

40. 慢地震（slow earthquake）是介于以背景构造速度进行的长期“蠕变”（creep）事件与在几秒到几分钟内发生的常规地震事件之间的中等事件，持续事件为几天到几周，产生极低频率的震动，从前常被认为是噪声；

41. 美国华盛顿州和加拿大不列颠哥伦比亚省沿海的卡斯凯迪亚俯冲带（Cascadia Subduction Zone）处，存在 14 个月周期的慢地震，其意义尚未可知；

42. 人类在千岩万壑的高山景观中瞥见了永恒。当山脉引发人们对于无限的思考时，它们本身却在步入死亡；

43. 雄伟的山峰与壮丽的岩壁只是造山运动暂留于世间的痕迹，是一个“痴迷于雕刻的团队”最新的作品——水、冰、风在重力的作用下进行的艺术性合作；

44. 地貌学（geomorphology，研究景观的演化）领域的一些研究表明，在山区，偶发的滑坡与大规模的边坡破坏（slope failure，边坡岩体变形、滑动、塌落、倾倒）是山体最重要的侵蚀机制，而河流（此前被认为是侵蚀作用的始作俑者）只是在山体被侵蚀的几十年到几百年间清理残局；

45. 山地景观的形成与破坏是密切相关的，两者的主导因素可能并不是长期且乏味的均变现象，而是短期的突发性灾变现象；

46. 人类对景观的大规模破坏，会造成广泛且持久的影响；

47. 在自然界中，河流会持续塑造山坡的形态，甚至达到夷平（graded）阶段——山体坡度刚好能够让水流的速度与沉积物在山谷中的堆积速度保持一致；

48. 在全球范围内，人类移动的岩石和沉积物，比地球上所有河流搬运的总物质还要多；

49. 轻率地忽视过往的地质作用，意味着人类放弃了对自身未来的掌控；

50. 研究固体地球的习性，可以教会人类尊重塑造地貌的地质作用（均变与灾变）的力量；

第四章 大气层的变化

1. 大气层的历史与生命的演化密不可分，生命本身打造了现代大气层（在某种意义上书写了自己的化学组成）；

2. 在过去的 70 万年里，被封存在远古冰雪中的气泡，以极地冰（polar ice）的形式保存；

3. 大气层的历史是一部讲述地球随着成熟而自我改造的成熟小说（Bildungsroman），就像建筑物里的空气一样（烟雾缭绕、散发霉味儿、通风良好或弥漫着烹饪的香气），地球大气层揭示其居民的诸多生活习惯；

4. 深入探索这层包裹着地球的隐性封套（保护罩），或许会让我们对每一次呼吸都心生感激；

5. 格陵兰岛西南部伊苏阿上地壳带（Isua supracrustal belt，又称伊苏阿表壳带），其层序中包含多种沉积岩（记录到地表水的侵蚀作用与沉积作用），以及绿岩（经历变质作用却仍然可辨识的“枕状”玄武岩，其球状形态是海底火山喷发的标志）；

6. 随着时间的流逝，海洋—大气系统与固体地球之间的摩擦作用如同软制动装置，使地球的自转速度逐渐变慢；

7. 暗淡年轻太阳悖论（faint young sun paradox），曾经黄矮星（yellow dwarf）的太阳比如今暗淡 30% 左右，而充盈的温室气体效应对此有补偿，是早期地球的气候表现较为温和、足以让远古的河流奔流入海；

8. 无论温室气体的确切组分是什么，第二代大气层都将持续存在 10 多亿年，并孕育出第一批地球生灵；

9. 间接证明生命存在的地球化学证据：生物碳的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值较未经过固碳生物处理的碳要低（千分之几）；

10. 含铁构造（iron formation）记录了早元古代时期（约 25 亿~18 亿年前）地表化学性质的一次巨变；

11. 大氧化事件（Great Oxidation Event，简称 GOE）：当氧气开始在浅水中聚集的时候，它会捕捉铁原子，

与其结合，并将其拉到海底形成含铁建造。氧气通过使铁“锈掉”的方式清除了海洋中的铁；

12. 大氧化事件彻底改写大气层-水圈的结构。游离氧的存在改变了雨水与陆地岩石之间的化学作用，使湖泊、河流和地下水的成分发生变化；

13. 早期植物进行的不产氧光合作用（anoxygenic photosynthesis）或能解释光合作用与游离氧出现的时间差，该新陈代谢策略至今仍被一些低氧环境中的细菌所采用，利用二氧化碳和硫化氢（H₂S）来产糖、并排放废弃物硫；

14. 另一种对上述现象的解释，从光合作用与分解作用（decomposition）的均衡出发。当光合作用与腐烂过程达到完美的平衡，空气中就不会积累氧气；

15. 第三种解释是光合作用产生的氧气快速与海底火山作用产生的硫化氢反应；

16. 水滴式构造作用（drip tectonics）；

17. 生活在全新世的人类，或许可以将元古宙（Boring Billion）中维持长期平衡状态的能力当做模板，以此来修正我们自己的生物地球化学习性；

18. 水分温室逃逸（moist greenhouse runaway）；

19. 罗迪尼亚（Rodinia）大陆是在 8 亿年前形成的超大陆（super continent），并于 7.5 亿年前随着裂谷作用分崩离析。它在热带地区造就了广阔的海岸线，暴雨补给的河流会将沉积物与从岩石中释放出来的元素带入海洋，生物便会在这些营养相对丰富的水域中繁衍生息。大陆架上的高沉积速率使得有机碳首次被大量地掩埋，进而降低大气层中的 CO₂ 浓度，让地球呈现出降温的趋势；

20. 正反馈的经典案例：常年性海冰开始在极地堆积，增大地表反照率（albedo），反过来导致地球进一步冷却；

21. 即使在海冰持续扩张的过程中，二氧化碳仍然会通过有机碳的埋藏与罗迪尼亚超大陆低纬度地区岩层的强烈化学风化作用从大气中持续排出（喜马拉雅山脉在新生代期间降低二氧化碳的浓度并使地球降温的机制）；

22. 一旦冰盖达到临界点，反照率效应就会让地球进入“雪球”状态——终年被冰雪覆盖；

23. “雪球地球”（Snowball earth）时期也被称为成冰纪（Cryogenian），是元古宙中为数不多的常见地质年代划分之一；

24. 由于地球的大部分水被锁在冰川冰（glacial ice）中，海平面会下降数百米，使大陆暴露在侵蚀作用下；

25. 雪球地球的结束标志着“大曝气”（Great Aeration）的出现，游离氧的浓度大幅度提升，地球延续至今的第四代大气层形成；

26. 元宇宙准富氧（quasi-oxygenated）的转化尚未有结论；

27. 一旦氧浓度上升，演化出能使用氧气进行新陈代谢的生物，它们就可以更高效地从环境中提取能量，发育出比之前所有的生物都大的体型；

28. 埃迪卡拉动物群（Ediacaran fauna）即是在雪球地球结束后的 100 万年间，出现于地球上的新型宏观生态系统，其中一些可能是腕足动物（brachiopod，或称 lamp shells）的前身；

29. 在随后大约 4000 万年的时间里，海底成为寒武纪大爆发（Cambrian explosion）疯狂的“解剖学上的修修补补”的场所；

30. 坚硬的碳酸钙质外壳成为一口大小的生物必备的防护罩，而大型肉食动物则发育出专门的游泳结构和猎杀装备；

31. 分子钟（molecular clock）的理论基础是，假设蛋白质编码基因在演化谱系中以恒定的速率积累替换（substitution）；

32. 对寒武纪大爆发期间生物演化速度的分歧，揭示了野外古生物学家与实验室分子生物学家之间又去的文化差异：前者习惯了化石生命的各种特性，乐意接受演化速度并不稳定的观点；后者观察到细胞结构中的生物机制，比地质学家更像正统的均变论支持者；

33. 寒武纪世界与现代生物圈并没有太大的不同——几乎所有主要的动物门（phyla）都已存在；

34. 在接下来 5 亿年的时间内，这些“玩家”将组成精密且依赖氧气的生态系统（具有多等级的食物网），

扩展到陆地上与天空中，发展出更专业的适应周围环境的能力。在此期间，每当生存环境（尤其是大气层）变化过快时，生物界就会遭受巨大的损失；

35. 化石记录中确实存在一些令人困惑的突发性缺失现象；

36. 集群灭绝（mass extinction）；

37. 古生物学家会根据偏离背景灭绝（background extinction）速率的等级，来量化不同种群灭绝的严重程度；

38. 缓慢推进的地质变化（造山带的生长、大陆的分离）可以激发生物圈的创新力，但突发性的转变可能会摧毁生物圈；

39. 芝加哥大学古生物学家杰克·塞科斯基（Jack Spekoski）通过将大数据应用于古生物学领域，推测间歇性的灭绝事件可能与地球周期性地通过银河系悬臂（spiral arm）有关（其可能会影响彗星轨道）；

40. 各类灭绝事件有一定相似：a.所有的灭绝事件（包括白垩纪末期恐龙的灭亡）都涉及气候的骤然变化；除了泥盆纪浩劫（热带海洋变冷），其余灭绝事件都与气候快速变暖有关；b.所有的灭绝事件都牵扯到碳循环和大气层中碳含量的重大扰动；此类扰动源于异常的溢流式喷发火山作用（如二叠/三叠/白垩纪），和/或生物圈封存的碳与已储存的碳氢化合物释放的碳之间的失衡现象（如奥陶/泥盆/二叠/三叠纪）；c.所有的灭绝事件都导致了海洋化学性质的急剧变化，包括酸化作用对分泌方解石生物的摧毁（如二叠/三叠/白垩纪），和/或广泛的缺氧现象（形成了缺氧的“死区”），除了嗜硫细菌，几乎所有的生物都窒息而死（如奥陶/泥盆/二叠纪）；

41. 生命具有永无止境的创造力，总是在修补与试验，并未被某种特定的前进路线束缚；

42. 所有的灭绝事件都与多个地址系统同时发生突变有关，而这些变化反过来又在其他地质系统中引发连锁反应；

43. 改造大气化学是极为危险的行为，可能会凭空出现无法控制的各种力量；

第五章 大加速

1. 描绘岩石单元和矿床、记录地层层序、绘制剖面图，以及揭示地貌的成因；

2. 科罗拉多州中部的萨沃奇岭（Sawatch Range）；

3. 伟晶岩代表一些花岗质岩浆凝固的最后阶段；其间，在过冷（undercooling）和岩浆气体含量高的环境下，警惕的生长速度会比平常快许多倍；

4. 通过农业、森林砍伐、焚烧等土地利用活动，人类支配了陆地上四分之一的净初级生产力（net primary productivity），相当于植物的总光合作用效应；

5. 在不到 100 年的时间里，人类引发的地球变化的规模，堪比终结某些地质年代的集群灭绝事件；

6. 冰川是自然界中变化十分迅速的实体之一；

7. 可调节温度的建筑物与全年供应的新鲜水果，让 21 世纪富裕国家的公民将天气视作日常生活的背景，而非主要情节；

8. 人类往往不会衡量好天气的价值，而是把恶劣天气事件（暴风雪、飓风、热浪、干旱、洪水）描述成代价高昂、剥夺了各种行业“正当”收入的异常现象；

9. 回顾近 2000 年的人类文明，我们会发现一个显著的模式，即社会不稳定、冲突多发的年代与气候异常（哪怕是略微偏离常态）的时期相吻合，相关数据呈现出较高的统计显著性；

10. 我们的食物生产系统建立在一种信念之上——古老且熟悉的天气模式总会复现；

11. 人类世的新规则甚至让地球科学家难以使用它们建立的定量模型来研究地质系统。此类模型基于平稳性（stationarity）这一概念，即自然系统在一个界限明确的范围内变化，而且上下限不变；

12. 漂砾（erratic）、洪积物（diluvium）、漂积物（drift）、无磧（音同弃）带（Driftless Area）；

13. 地球轨道的行为变化可能会影响阳光照射到地球上的方式，潜在地引发间歇性冰期；

14. 月球与邻近行星的引力影响下，导致地球在宇宙空间中运动时存在 3 个方面的周期性变化，称为米兰科

维奇循环 (Milankovitch cycle): (1) 地球环绕太阳运动的椭圆形轨道 (或指偏心率), 每 10 万年伸展和收缩 1 次; (2) 地球自转的倾角 (或指倾斜度), 在 21.5° 至 24.5° 之间变化, 周期为 4.1 万年; (3) 缓慢摆动的行星如同一个玩具陀螺, 该现象为岁差 (precession), 平均以 2.3 万年为 1 个周期在二至点 (solstices) 改变面对太阳的半球;

15. 米兰科维奇设法计算出上述周期性变化对地球的太阳辐照度 (solar irradiance) 综合效应;

16. 由于绝大多数的陆块集中在北半球, 岁差周期对北纬地区的影响实则主导了全球的气候;

17. 数据档案: (1) 通过新一代海洋学调查船获得的深海沉积物的岩心; (2) 英勇的国际钻井团队在南极洲和格陵兰岛采集的极地冰。两者都为沉积缓慢且连续的场所;

18. 在蒸发过程中, 较轻的氧 (^{16}O) 比较重的氧 (^{18}O) 更容易变成水蒸气。即在任意指定的时间, 降水 (包括极地雪) 会比海水含有更少的 ^{18}O 和更多的 ^{16}O , 该筛选效应会于寒冷时期进一步增强;

19. 冰期的水被固定在冰体内, 海洋与利用海水生成壳的生物含有特别高的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值; 反之, 冰川冰的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值非常低;

20. 普通的氢 (^1H) 和氘 (^2H) 的比值也以类似的方式变化, 因此冰川冰同样保存着气候变迁的痕迹;

21. 在米兰科维奇循环的三种轨道变化中, 偏心率对地球接收的太阳辐射的影响最小, 但出于某种原因, 这个周期达 10 万年的影响被地质作用放大;

22. 气候记录中也存在与轨道变化无关的高频“谐波” (harmonic), 所谓的丹斯高一厄施格旋回 (Dansgaard-Oeschger cycle), 即气温会在大约 1500 年内发生周期性振荡, 似乎是一种与全球洋流的时间尺度相对应的独特内部旋律;

23. 地球不仅仅是一个随着天文周期的节奏翩翩起舞的提线木偶, 它还会以自己的方式来演绎这些节奏;

24. 米兰科维奇旋回都是正弦波, 拥有对称的回文状波峰和波谷。曲线叠加会创造更复杂的图样, 但本身缺乏系统化的方向性;

25. 地球气候系统的诸多正反馈 (自我放大过程) 机制;

26. 火是快速氧化的戏剧性证据; 分解作用也可以实现同种效果, 但以肉眼不可见的缓慢速度完成;

27. 1.8 万年前末次冰盛期 (last glacial maximum)、11 700 年前新仙女木事件 (Younger Dryas);

28. 与当下气候最接近的情况, 是发生在 5 500 万年前 (新生代最早两个世的交界处) 的气候危机, 即古新世—始新世极热事件 (Paleocene-Eocene Thermal Maximum, 简称 PETM);

29. 悬而未决的古新世-始新世极热事件生物碳来源, 两大候选答案: (1) 北大西洋扩张期间的岩浆活动点燃煤或泥炭; (2) 笼形包含物 (clathrate) 或天然气水合物 (gas hydrate), 突然从海底沉积物中挥发;

30. 碳捕集与封存 (carbon capture and sequestration, 简称 CCS);

31. 虽然树木无法永久地储存碳, 但它们可以让碳在数十年甚至数百年间不参与循环;

32. 生物能源与碳捕获和储存 (bioenergy with carbon capture and storage, 简称 BECCS);

33. 而对于诸多复杂的由温度驱动的大气—海洋相互作用 (atmosphere-ocean interaction) 来说, 如厄尔尼诺, 以及每 (两) 个月发生一次的马登—朱利安振荡 (Madden-Julian oscillation, 控制太平洋盆地周边的天气), 控制气候变暖的地球化学措施如何影响这些机制尚不可知;

34. 消耗、改变或破坏自然现象所需的时间, 与替换、复原或修复自然所需的时间, 存在极大的不对称性;

35. 我们被自身创造的事物迷得眼花缭乱, 却忘记自己完全身处于一个更古老、更强大的世界, 而我们将它的“恒久”视作理所当然;

第六章 垂向时间、乌托邦与科学

1. 人类的世界观代表了“一种认知断裂 (epistemic rupture), 这种认知断裂极为激进, 以至于过往的一切都无法从中幸存”;

2. 地质学是一门认知“命运”的学科: 过往的秘密历史支撑着这个世界, 将人类罩于当下, 并设定了我们

的未来之路；

3. 科技进步的一个讽刺是，它创造了一个在诸多方面比工业化前的世界更缺乏科学性的社会；在工业化前的世界中，没有一位通过辛苦劳作理解物理现象，或者借由自给性农业认知气候的公民，认为自己不受自然法则的约束；
4. 科技进步的速度远远超过了人类认知成熟的速度；
5. 在未来 1000 年内，如果人类的碳排放没有受到严格的控制，并且气候系统中强大的正反馈被激活，那么地球可能会重演古新世—始新世极热事件；
6. 我们有能力为下一个千禧年书写一段截然不同的传奇；
7. 让学生能够将物理、化学和生物学的概念应用于极其复杂的地球系统；
8. 《脱离了演化，生物学的一切将毫无意义》（Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution）；
9. 20 世纪 90 年代的科普作家以“普适达尔文主义”（Universal Darwinism）观点扩展了演化思维的适用范围，引入了模因（meme）的概念，作为基因在文化领域中的等价物（尽管该术语如今已“发展”/“演化”为猫咪视频和表情包的代称）；
10. 我们需要空间：从幼年起，孩子就会看到，自己正走在一条古老、神圣且跨越时间的道路上，生命的丰富性来自普适的发展过程（演化），成长与变老是值得庆祝的，而不是令人畏惧的；
11. 地质学家“大器晚成”；
12. 地质学指出了一条折中之道，其介于人类对自身重要性的自恋式骄傲，与人类对自身的渺小所萌生的存在主义绝望之间；
13. 地质学肯定了 18 世纪波兰拉比 西姆哈·布尼姆（Simcha Bunim）的教诲，即我们每个人应该在口袋里放两张纸条：一张写着“我乃尘与土”，另一张写着“世界为我而造”；
14. 实践垂向时间的地质思维融合了命运观（wyrd）和 sankofa（感知过去的存在）、念（sati，持有当下的记忆），以及七世代思想（一种对未来的“乡愁”）；
15. 地球一直在对我们私语：每一块岩石，都揭示永恒的真理或质朴的经验法则；每一片叶子，都是发电站的雏形；每一个生态系统，都拥有运作良好的经济范本；

第七章 后记

.....

阅毕

2024.07.29