2025-2026 学年
全国中学生地球科学奥林匹克竞赛决赛

试题册

注 意 事 项

在答题前请认真阅读本注意事项及答题要求

1. 本次考试时间为 180 分钟。如有调整，以考场实际通知为准。
2. 本次考试共分为两个部分，第一部分为实践试题，第二部分为理论试题。你将收到本**试题册**、**实践试题图册**以及**答题纸**，请在答题前检查上述材料是否完整，如有漏发、缺页、漏印等情况请第一时间报告监考人员。涉及试题内容的疑问，不得向监考人员询问。试题册背面可作草稿纸，不得另行索要草稿纸。
3. 本次考试为闭卷笔试，严禁交流、查阅资料或使用未经允许的电子设备
4. 答题前请务必将自己的姓名、考号用黑色签字笔填写在答题纸的规定位置。**考试开始前不得翻开试题册。**
5. 请将答案用黑色笔填写在**答题纸**相应位置；试题册和图册上的答案不计分。
6. 如无特别说明，选择题为不定项选择，每一个正确选项得 1 分，**有选错的该题得 0 分**，放空得 0 分。
7. 如无特别说明，非填空形式的计算题应写出必要的思路和步骤，只写最终结果不得分。试题题干中涉及的数值，有效数字位数均视为无限。
8. 对于规定了字数上限的题目，每个数字、字母和标点均算作 1 个字。超出规定字数上限的部分不计分。
9. 考试开始 120 分钟内不允许提前交卷，考试结束后立即停笔并停止答题，待监考老师确认方可离场。不得将试题册、实践试题图册或答题纸带出考场。

2026 年 4 月 25 日　山东 · 青岛

2025-2026 学年全国中学生地球科学奥林匹克竞赛
决赛实践试题图册



图 1（剖面 A）



图 2（剖面 A）

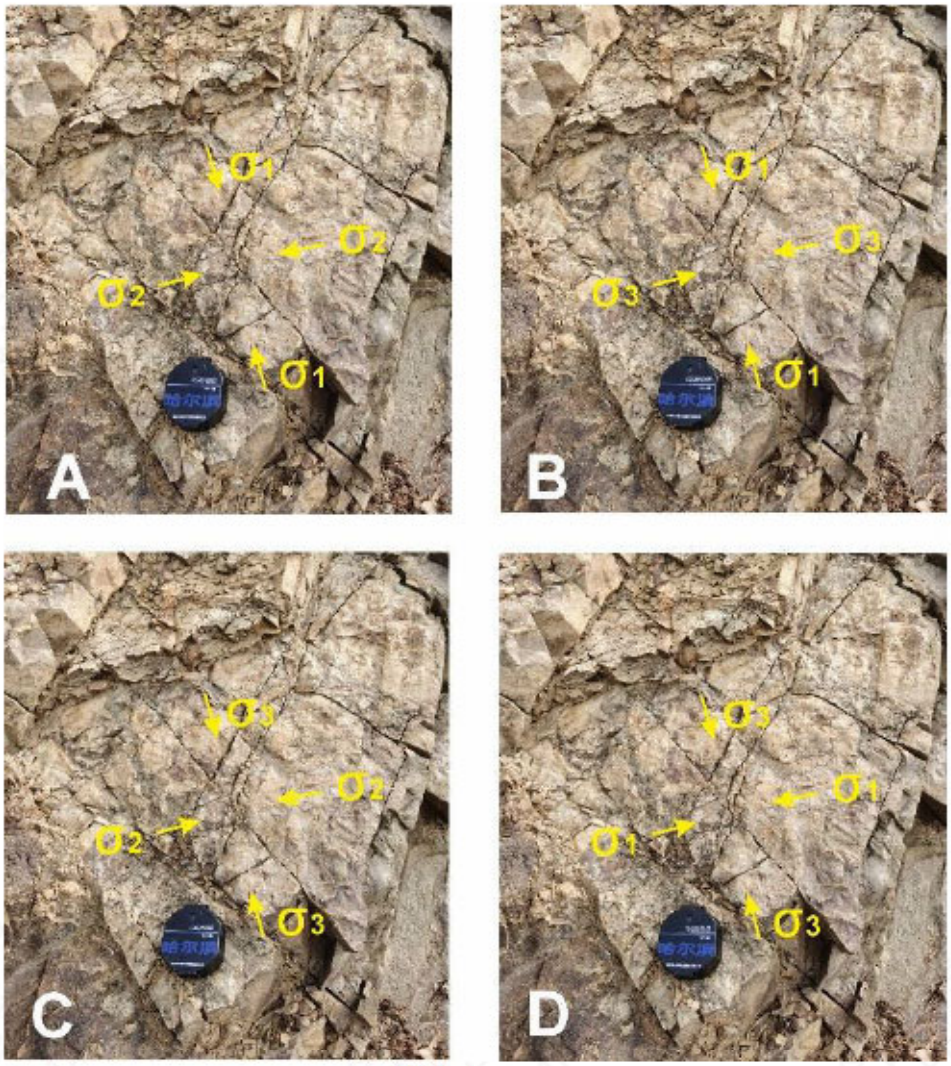


图 3（剖面 A）



图 4（剖面 A）



图 5（剖面 B）



图 6（剖面 B）



图 7（剖面 B）



图 8（剖面 B）

实践部分

（该部分中涉及的图件另外发放）

1.【单选】图 1 中 A 点所示的岩石属于

A. 砾岩　B. 砂岩　C. 斑岩　D. 团块砂岩

2.【单选】图 1 中 A 点所示的岩石最有可能形成于

A. 深湖　B. 深海　C. 半深海　D. 河流

3.【单选】图 1 中 B 点箭头所示的沟槽属于

A. 海沟　　B. 潮水沟

C. 沙波　　D. 遗迹化石

4.【单选】图 2 中 A 点是一处岩浆岩。从岩性上看，它最有可能属于

A. 酸性岩体　B. 中性岩体

C. 基性岩体　D. 超基性岩体

5. 关于图 2 中 A 点所示的岩浆岩，下列说法合理的有

A. 属于深成侵入体，矿物粒度较粗

B. 属于浅成侵入体，矿物粒度较细

C. 相比于围岩，该岩浆岩风化更加强烈是因为暴露地表时间比围岩长

D. 它发育有气孔结构

6.【单选】图 2 中 B 点层面上的沉积构造是

A. 解理　B. 虫迹　C. 雨痕　D. 波痕

7.【单选】图 2 中 B 点所在地层的沉积环境最有可能是

A. 深水湖泊　B. 浅水湖泊

C. 大陆架　　D. 大陆坡

8.【单选】图 3 位于图 2 中的 C 点，图 3 中节理与其对应的应力展布关系最合理的是（选项在图 3 中）

9.【单选】请综合图 4 中树木生长形态、地形条件及地质背景等信息分析，判断导致该区域树木呈现此种生长形态的主控因素是

A. 滑坡　B. 盛行风　C. 光照　D. 基岩类型

10.【单选】剖面 B 的沉积岩主要为

A. 砂岩　B. 页岩　C. 泥岩　D. 灰岩

11. 剖面 B 的岩层中常见白色矿物脉体，其矿物组成可能有

A. 石英　B. 石膏　C. 方解石　D. 高岭土

12.【单选】剖面 B 白色矿物脉体的成因最有可能是

A. 岩浆侵入作用　B. 差异风化作用

C. 热液流体活动　D. 沉积作用

13. 图 5 示意了一处断层。关于该断层，下列说法合理的有

A. 整体表现为正断层为主的构造特征

B. 整体表现为逆断层为主的构造特征

C. 发育于挤压构造环境

D. 发育于张性-张扭性构造环境

14.【单选】图 6 示意了一处断层。根据断层相关构造判断，该断层属于

A. 正断层　　B. 逆断层

C. 左旋走滑断层　D. 右旋走滑断层

15.【单选】图 7 所示岩层平均层厚最接近

A. 1 cm　B. 5 cm　C. 15 cm　D. 50 cm

16.【单选】图 8 所示构造现象最有可能是

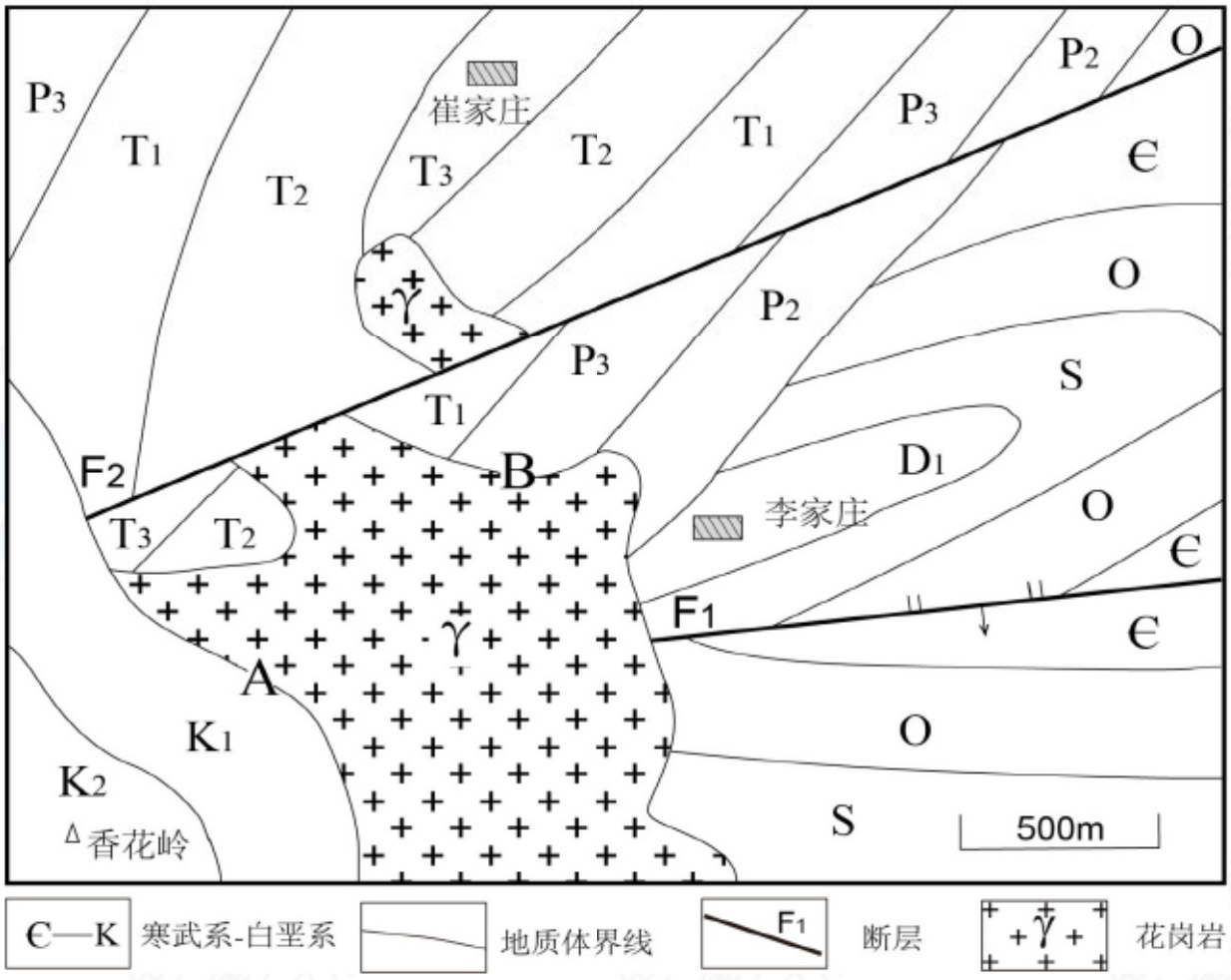
A. 断层　B. 劈理　C. 张节理　D. 剪节理

理论部分

第一题（共 18 分）

地质图是地球科学史上的伟大发明与创想，是将各种地质体的界线、特征、产状和地质构造以及有意义的地质现象按照规定的图例符号和比例垂直投影、概括缩绘在地形（地理）底图上所制成的图件。

香花岭地区出露地层为寒武系、奥陶系豹皮状灰岩、泥质条带灰岩、鲕状灰岩、竹叶状灰岩、石灰岩等；志留系-下泥盆统砂岩、粉砂岩和页岩、并夹有数层灰岩；二叠系和三叠系为砾岩、砂岩、炭质粉砂岩和页岩、并夹有数层可采煤层；白垩系下统为砾岩和砂岩，上统由玄武岩组成。阅读下面的香花岭地区地质简图，回答下列问题。



1-1 说明不同时代地层的接触关系，列出各种地质体和地质现象，并给出各种地质体和地质现象的发育顺序。（字数上限：360）

1-2 请说明如何根据图中 A 和 B 观察点的野外地质现象确定它们的接触关系。（字数上限：160）

1-3 假设花岗岩形成时的深度为 5 km，根据地质图判断它经历的地质过程有_____（按时间顺序），并估算它在白垩纪之前可能的最低剥蚀抬升速率是_____m/Ma。保留三位有效数字。

1-4 某地质调查组在 F_1 断层处测得断层面的倾角是 75°，南侧相对升高，断层面两侧产状和层序一致，且在断层面两侧找到了被切开的两半遗迹化石，它们直线距离 1000 m，其连线与水平面的夹角为 15°。则该断层是_____（正/逆冲）断层与_____（左旋/右旋）走滑断层的复合断层，前者的断距分量为_____m，后者的断距分量为_____m。保留三位有效数字。

【补充知识：显生宙简明地质年表】

代		纪	常用代号	据今百万年(Ma)
新生代		第四纪	Q	2.58
		新近纪	N	23.04
		古近纪	E	66.0
中生代		白垩纪	K	143.1
		侏罗纪	J	201.4
		三叠纪	T	251.9
古生代	晚古生代	二叠纪	P	298.9
		石炭纪	C	358.9
		泥盆纪	D	419.6
	早古生代	志留纪	S	443.1
		奥陶纪	O	486.9
		寒武纪	ϵ	538.8

第二题（共 18 分）

近年来，科学家通过红外光谱技术，在月球极区永久阴影区以及某些月表矿物中发现了水（H_2O）和羟基（OH）的存在证据。这些发现对于理解月球表面的物质演化、挥发分来源、资源利用以及未来深空探测具有重要意义。

红外光谱探测分子的一项基本原理是：分子中的原子并不是静止不动的，而会围绕平衡位置发生振动。当入射红外光的频率与分子的某一振动频率相匹配时，分子会吸收该频率附近的辐射，从而在红外光谱中形成吸收带。不同化学键和不同分子结构对应不同的特征吸收位置，因此红外光谱常被用于识别物质组成，并可用于估计相关物种的含量。对于双原子分子，在振动幅度较小时，可将其近似看作由一个“弹簧”连接的两个质点，即简谐振子模型。分子的振动频率由成键强弱和两原子的质量共同决定：化学键越强，振动频率通常越高；原子质量越大，振动频率通常越低。对于质量分别为 m_1 和 m_2 的双原子分子，若将其化学键近似为力常数为 k 的弹簧，则该双原子分子的振动频率满足：

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

其中 μ 表示约化质量，定义为：

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

在量子力学中，简谐振子的振动能量是量子化的，其最低能量不为零，称为零点能：

$$E_0 = \frac{1}{2}h\nu$$

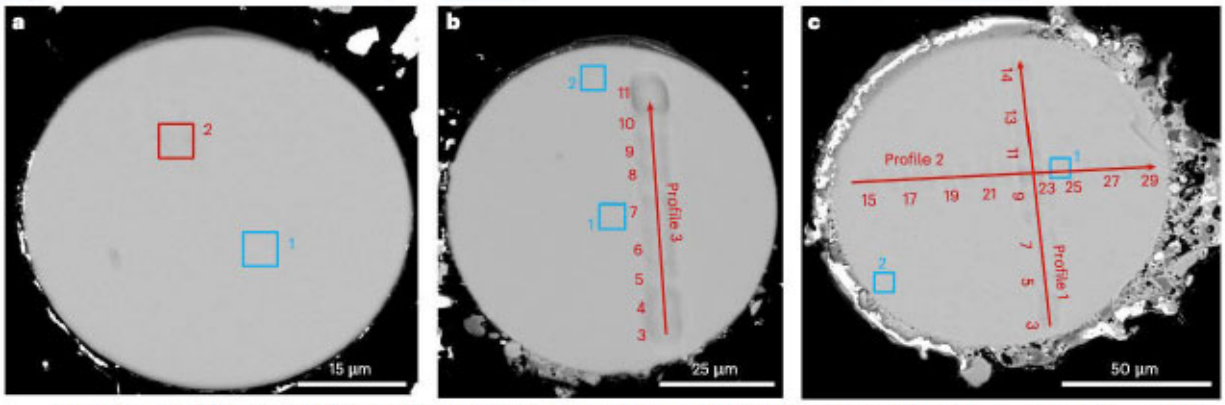
其中 h 为普朗克常量 $6.62607015 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$ 。

若将分子中的某个原子替换为其同位素，例如将 OH 中的 H 替换为 D（氘），通常可近似认为化学键的性质变化不大，因此力常数 k 基本不变；但由于原子质量发生变化，约化质量也会变化，从而导致振动频率和红外吸收带位置发生移动。这种现象称为同位素位移。通过比较 OH 和 OD 的吸收特征，可以为研究月球表面水或羟基的来源及其同位素分馏效应提供线索。

2-1 已知羟基自由基 $^{16}O^{1}H$ 的最强红外吸收带出现在频率 $\nu = 1.07 \times 10^{14}\ \mathrm{s^{-1}}$ 处。假设 OH 可近似视为简谐振子，请预测氘代羟基自由基 $^{16}O^{2}D$ 的最强红外吸收带频率与零点能。保留三位有效数字。

2-2 在实际红外光谱中，OH 和 OD 往往不只出现单一吸收峰，而会出现多个峰。请说明可能的原因。（字数上限：40）

除了遥感探测之外，月球返回样品也是科学家研究月球表面的水和羟基的重要媒介。研究者从月球返回样品中挑出一些颗粒进行了研究。这些被挑出的颗粒均为较为规则的球形或椭球形，且整体为非晶态的硅酸盐玻璃。下图为这些颗粒的截面照片：



地球上同样也存在类似的自然形成的硅酸盐玻璃颗粒，但是数量远小于月球。根据以上信息以及你对月球的了解，试推理：

2-3 这些颗粒为何常呈较为规则的球形或椭球形？请结合其形态特征说明其成因与可能经历过的地质过程。（字数上限：80）

2-4 为什么这类颗粒在月球上比在地球上更常见？请从颗粒的形成条件与保存条件两方面进行分析。（字数上限：80）

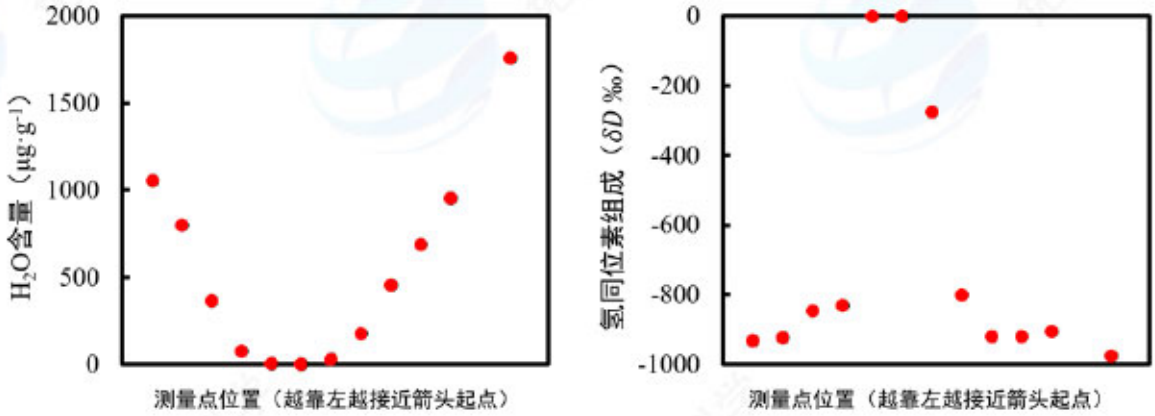
月球表面的水和羟基可能有多种来源，并会在月表环境中不断经历形成、迁移和损失等过程。月表物质中原本就可能含有来自月球内部的原生水，但这些原生含氢组分在后期演化中并不会始终保持稳定，而可能在受热、蒸发、撞击和空间风化等过程中被重新分配或改造，因此月表样品中的水和羟基特征不一定与月球内部原始水完全相同。与此同时，富挥发分的小天体、陨石或彗星撞击也可能向月球输入水或其他含氢挥发分。另一方面，太阳风中的质子持续轰击月表，可与矿物或玻璃颗粒中的氧结合，形成 OH 或进一步形成 H_2O。因此，现在在月球表面观测到的水和羟基，往往是原生组分与外来贡献共同作用、并经过后期改造的结果。

为比较不同来源对月表水的贡献，可进一步利用氢同位素组成进行分析。氢同位素常用 δD 表示，其定义为：

$$\delta D = \left[\frac{(D/H)_{sample}}{(D/H)_{SMOW}} - 1\right] \times 1000‰$$

其中 $(D/H)_{SMOW}$ 为标准平均海水中的氘氢比。月球样品和太阳系物质的研究表明，不同来源的水或羟基具有不同的氢同位素特征。在本题中，为简化讨论，可假设月表水仅由太阳风端元（$\delta D = -1000‰$）和月球内部端元（$\delta D = -330‰$）混合而成。

研究者进一步对上述月球硅酸盐玻璃颗粒样品进行了剖面分析，下图给出了上述截面照片中 Profile 1 段从箭头起点到终点的 H_2O 含量和氢同位素组成 δD 的变化趋势。



我们假设：

① 样品中的水仅来源于太阳风注入与月球内部水两个端元；

② 不同来源水混合时，混合后的 δD 值可视为按混合比加权叠加；

③ 太阳风对月球的作用仅限于月表极浅部；

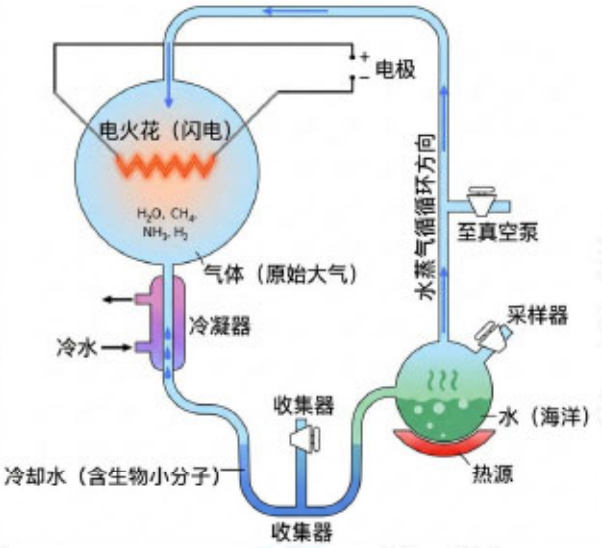
④ 不考虑水在玻璃颗粒内的扩散过程引起的同位素分馏。

2-5 综合各项信息，推测月球硅酸盐玻璃颗粒样品中水的演化历史，并说明各过程在水含量或同位素组成上的主要依据。（字数上限：200）

【注意：你的分析应至少包括玻璃颗粒形成过程中水的演化，以及玻璃颗粒形成后水的进一步演化两个部分】

第三题（共 20 分）

地球上的生命从何而来是科学界经久不衰的话题。生命起源领域最著名的实验是 Miller-Urey 实验，由美国化学家 Stanley Miller 及其导师 Harold Urey 在 1953 年设计。他们构建了一个密闭的玻璃装置，以模拟早期地球的大气环境，装置中包含氨（NH_3）、甲烷（CH_4）、水蒸气（H_2O）和氢气（H_2），并有循环流动的水和用于模拟闪电火花的电极（如下图所示）。一周后，Miller 观察到多种有机化合物的形成，包括甘氨酸（$C_2H_5NO_2$）和丙氨酸等氨基酸。该实验证明，生命的组成单元可以通过非生物化学反应生成，这启发了对生命起源的进一步研究。



3-1 关于 Miller-Urey 实验，以下说法正确的有

A. 该实验模拟的大气成分与现在类似

B. 该实验模拟了热液喷口附近的水岩反应

C. 该实验并没有考虑所有构成生命基础的元素

D. 该实验说明生命产生于大气

E. 氨基酸的形成标志着生命的出现

3-2 Miller-Urey 实验假设生命起源所需的能量都来自于闪电。早期地球上合成有机物的能量来源还可能有哪些？请举出两种。（字数上限：10）

氨基酸的出现只是万里长征的第一步。从氨基酸到第一个细胞的组装，这中间还需要漫长的演化。接下来，我们将通过简化的模型，试图揭示生命起源的推动力。假设：

① 甘氨酸（$C_2H_5NO_2$）确实能够通过 Miller-Urey 实验模拟的过程在早期地球条件下生成，反应发生在标准状态（25°C, 100 kPa）下；

② 甘氨酸合成所需的吉布斯自由能 ΔG 完全由闪电提供，每次闪电释放 10^9 J 的能量，其中 0.1%可转化为化学能。

3-3 估算每次闪电最多能生成多少甘氨酸。以 mol 计，保留三位有效数字。

【相关物质的标准热力学数据见下表】

物种	$NH_3(g)$	$CH_4(g)$	$H_2O(g)$	$H_2(g)$	甘氨酸(s)
$\Delta_{生成}H^\circ_{mol}$ (kJ · mol^{-1})	-45.90	-74.6	-241.83	0	-528.6
S°_{mol} (J · mol^{-1} · K^{-1})	192.77	186.26	188.84	130.68	103.51

2016 年的一项研究发现，在模拟早期地球的条件下，使用火山气体羰基硫（COS）作为催化剂，仅需 1 mmol/L（1 mmol = 10^{-3} mol）的氨基酸（如丙氨酸和缬氨酸）就能启动聚合反应，形成规则结构的多肽纤维。假设：

① 各种氨基酸都能够通过 Miller-Urey 实验模拟的过程在早期地球条件下生成，反应吉布斯自由能平均为 $\Delta G_{mol} = 400\ \mathrm{kJ \cdot mol^{-1}}$，不考虑溶解的热效应；

② 氨基酸合成所需的吉布斯自由能完全由闪电提供，每次闪电释放 10^9 J 的能量，其中 0.1%可转化为化学能；

③ 闪电的频率是每年 10^9 次（现代观测值，早期地球可能更高）；

④ 早期地球表面均被海洋覆盖，平均海深为 2 km，地球半径为 6400 km。

3-4 估算早期地球整体海洋中氨基酸浓度达到聚合阈值至少需要多久。保留两位有效数字。

早期地球上存在着广泛的热液系统。近年的研究发现，虽然热液系统自身合成的氨基酸较少，但热液喷口周围的多孔结构（如“胶体筛”）以及其内部的温度和化学梯度，可以吸附并富集海洋中的有机分子，使其局部浓度远超海洋平均值。这在多大程度上促进了生命起源？为此，我们在上面假设的基础上引入新假设：

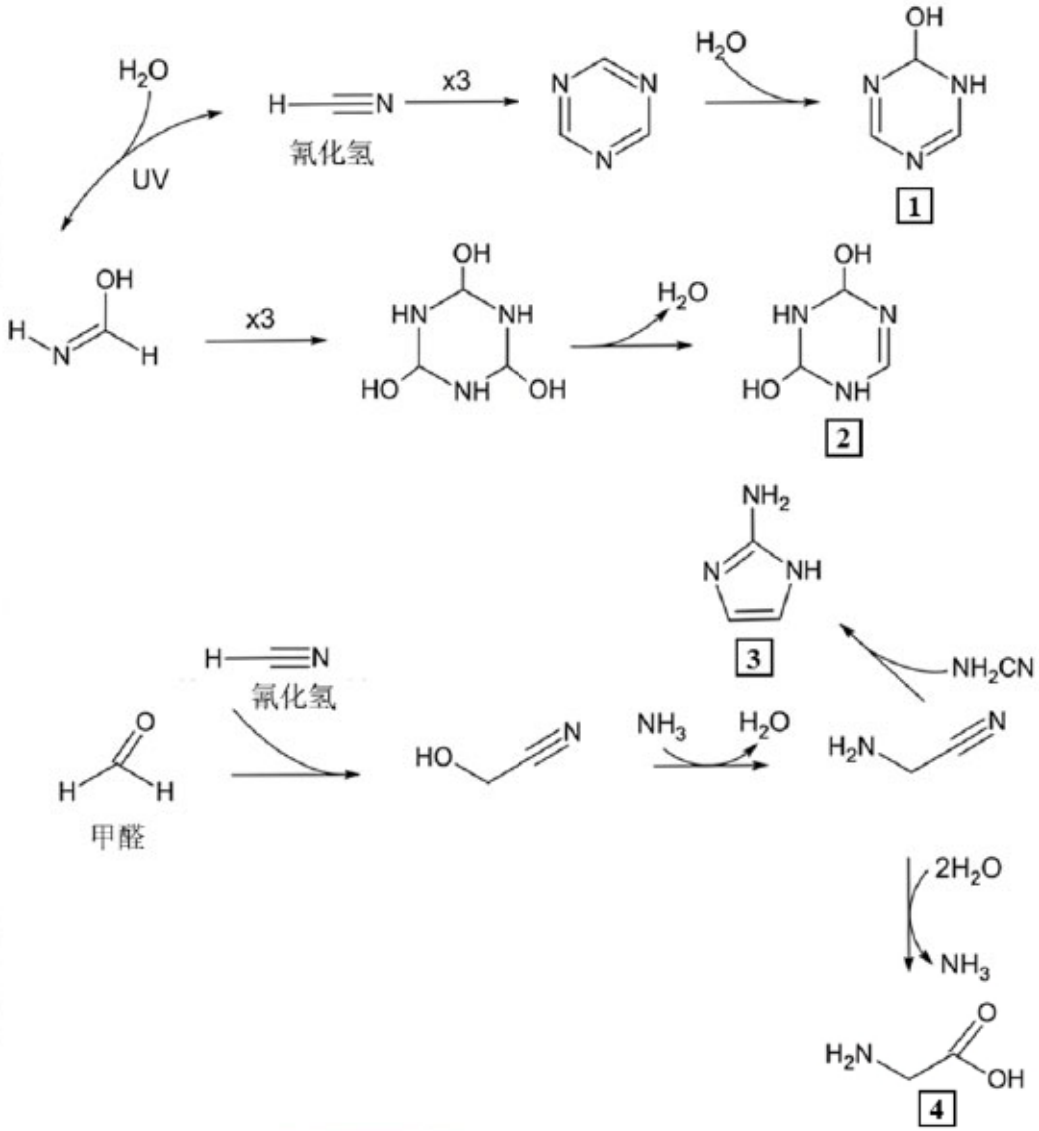
⑤ 热液系统和非热液系统中氨基酸分别均一，且热液系统中氨基酸的浓度比非热液系统高 100 倍；

⑥ 早期地球上热液系统占全球海洋面积的 0.1%（现代值约为 0.02%）；

⑦ 合成氨基酸所需能量仍由闪电提供。

3-5 估算早期地球热液系统中氨基酸浓度达到聚合阈值至少需要多久。保留两位有效数字。

Miller-Urey 实验以及上面的简化模型关注的主要是氨基酸的非生物合成。后来人们又发现核碱基等重要有机物也可能在早期地球无机环境下合成。其中关键的桥梁是氰化氢（HCN）和甲醛（CH_2O）等小分子，可能的合成路径如下图所示。



3-6 上图 4 种带有标号的合成产物中，_____是氨基酸。

3-7 上图中，除氨基酸外的带有标号的合成产物被认为是核碱基的前体。从结构上看，产物 3 可能是核碱基_____的前体。

A. 鸟嘌呤（G）

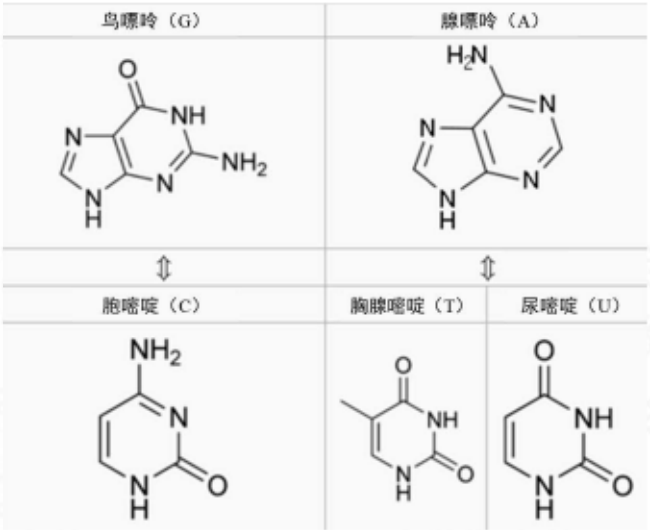
B. 腺嘌呤（A）

C. 胞嘧啶（C）

D. 胸腺嘧啶（T）

E. 尿嘧啶（U）

【几种重要核碱基化学结构如右图】

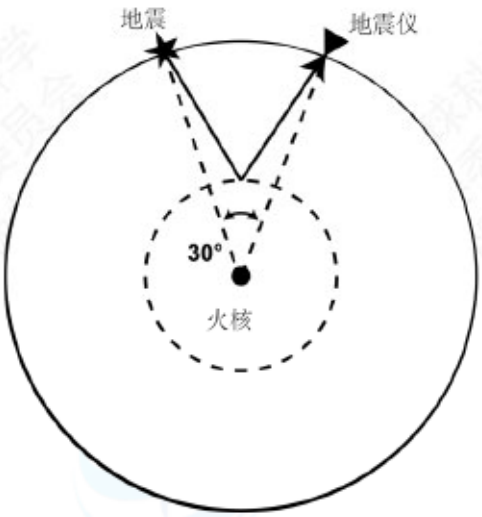


3-8 氨基酸与核碱基分别参与哪类生物大分子的构成？这两种生物大分子在生命活动中分别起到什么作用？（字数上限：100）

第四题（共 20 分）

地震波是探知星球内部结构的“探针”。地震波探测内部结构的原理，主要基于地震波在不同介质中传播时速度、方向和路径会发生改变的特性。当地震或人工震源激发地震波后，波体会以纵波（P 波）和横波（S 波）等形式向行星内部传播。由于行星内部不同圈层（如壳、幔、外核、内核）的密度和弹性性质存在显著差异，地震波在穿过这些界面时会发生反射、折射或速度突变，它们符合光在介质中的反射与折射定律。通过在地表布设地震仪，记录下地震波到达不同台站的时间、振幅和波形等信息，科学家就能反推出波在地下传播的路径和速度变化规律，进而揭示其内部结构。

这一原理同样适用于地球以外的天体，例如在火星探测中，科学家也借助“火震”数据来揭示其内部结构。2021 年，科学家通过分析“洞察”号探测器记录的核幔边界反射的火震 S 波（ScS 震相），首次直接测定了火星液态核心的半径，并推算出其平均密度。我们通过一个简单的模型来理解测量原理。火星的半径为 3390 km。



4-1 假设火幔中 S 波速为 4.5 km/s 且沿直线匀速传播，科学家测得与接收器的火星球心角约 30°处（如右图所示）地震产生的核幔边界反射 S 波在地震发生 760 s 后重新到达火星表面，请估算火核的半径。保留两位有效数字。

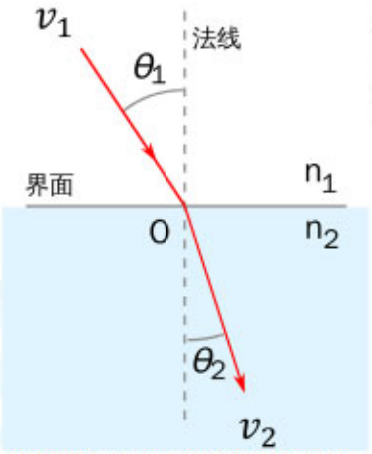
实际上，地幔（以及火幔）的密度等物理性质往往是不均匀的，这会导致地震波的波速发生改变，从而发生折射。对于 S 波，其波速由介质的物理性质决定：$v_s = \sqrt{\mu/\rho}$，其中 μ 是剪切模量，ρ 是密度。为了简便理解，我们以地球为例，假设地球是球体、地球的结构是球对称的（即相同深度处波速相同）。科学家通过波速 v 、波与球心的直线距离 r 、波传播方向和波与球心连线之间的夹角 θ 定义了射线参数

$$p = \frac{r\sin\theta}{v}$$

4-2 证明：地震波在地球中直线传播、反射、折射时射线参数均保持不变。

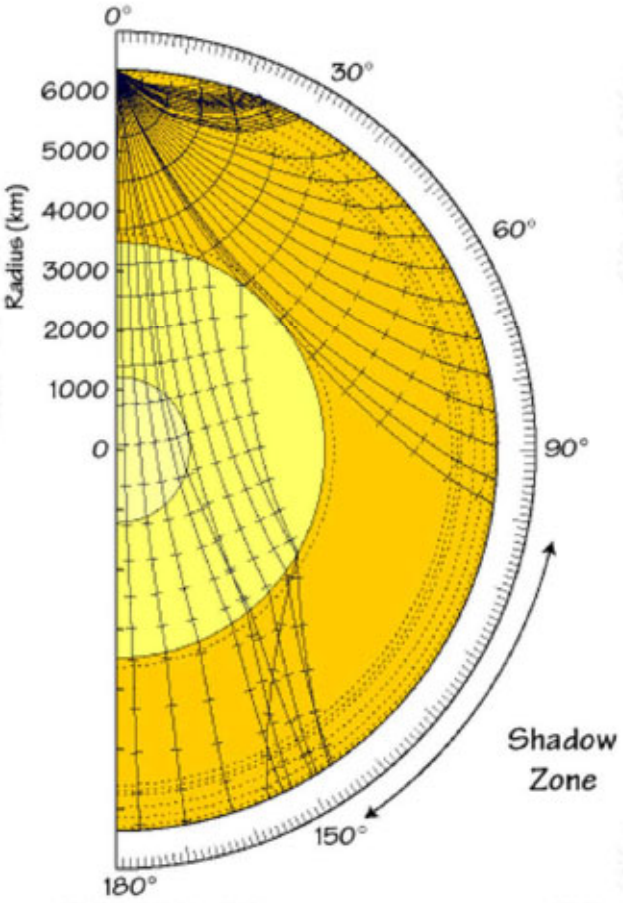
【折射定律：波从一种介质传播到另一种具有不同波速的介质时，会发生折射。其入射角与折射角之间的关系满足

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2}$$



其中 θ_1 和 θ_2 分别是入射波、折射波与界面法线的夹角， v_1 和 v_2 分别是入射波、折射波的波速。】

地球的内部结构能够折射或阻挡地震波。科学家根据地震波能否通过地球内部的折射返回地表，定义了地震波阴影区（Shadow Zone），如右图所示。



4-3 关于地震波阴影区，以下说法正确的有

A. 图示的阴影区是 P 波的，S 波的阴影区比 P 波更大

B. 图示的阴影区是 S 波的，P 波的阴影区比 S 波更小

C. 图中波形显示，地核中的波速比地幔中的波速大

D. 图中波形显示，地核中的波速比地幔中的波速小

E. 地震波阴影区的划分通常不考虑地震波的反射

从上图中我们可以发现，地震波阴影区的“上边界”的位置（即约 100° 处）受地核的大小控制，它所对应的地震波路径应当正好与球形地核相切。如果能够推导出阴影区“上边界”与地核半径的关系，那么就可以比第 1 小题更加精确地估算行星内核的半径。我们假设：

① 地球和地核均为球体，地幔的结构是球对称的，忽略地壳的厚度；

② 地幔的剪切模量 $\mu(r)$ 与波与球心的直线距离 r 的关系为幂函数

$$\mu(r)=\mu_0\left(\frac{r}{R_e}\right)^m$$

其中 μ_0 是最浅层地幔的剪切模量， R_e 是地球半径， m 是常数。三者均为已知量；

③ 地幔的密度 $\rho(r)$ 与波与球心的直线距离 r 的关系为幂函数

$$\rho(r)=\rho_0\left(\frac{r}{R_e}\right)^n$$

其中 ρ_0 是最浅层地幔的密度， n 是常数且满足 $n>m-2$。两者均为已知量；

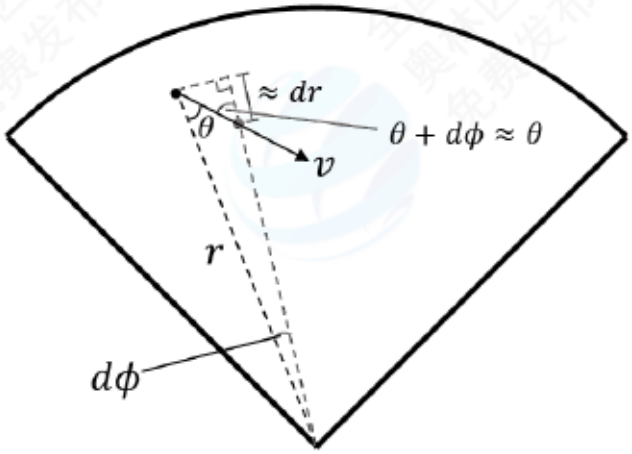
④ 某 S 波从地表 A 点以某一射线参数 p 入射，在核幔边界处与界面相切，之后能够回到地表 B 点。

4-4 求该 S 波的射线参数 p 与地核半径 R_c 的关系。

4-5 求 AB 两点的球心角 ϕ 与地核半径 R_c 的关系。

【补充知识】

i. 若波在球体中以波速 v 传播一段极小距离，使其与球心的直线距离从 r 变为 $r\pm dr$（ d 表示物理量极小），则其路径对应的球心角 $d\phi$ 满足右图几何关系。其中 θ 为波传播方向和波与球心连线之间的夹角；



ii. 对于极小的角度 $d\phi$ ，有

$$\sin d\phi\approx d\phi$$

iii. 定积分可用于将极小变量相加。若 $dy=f(x)dx$，则从 $x=x_1$ 到 $x=x_2$ 时 y 的变化量可以通过积分 $\Delta y=\int_{x_1}^{x_2}f(x)dx$ 得到。若 a 是常数，有

$$\int_{x_1}^{x_2}af(x)dx=a\int_{x_1}^{x_2}f(x)dx$$

iv. 若 $t>0$ ， $\alpha<0$ ， $1-tx^{2\alpha}$ 始终为正，则

$$\int_{x_1}^{x_2}\frac{x^{\alpha-1}}{\sqrt{1-t\cdot x^{2\alpha}}}dx=\frac{1}{\alpha\sqrt{t}}\arcsin\left(\sqrt{t}\cdot x_2^{\alpha}\right)-\frac{1}{\alpha\sqrt{t}}\arcsin\left(\sqrt{t}\cdot x_1^{\alpha}\right)$$

第五题（共 20 分）

为应对全球气候变化并实现碳中和目标，人类可以通过两类主要途径降低大气中的二氧化碳负荷：一类是减排，即减少化石能源使用或降低生产生活中的 CO_2 排放；另一类是碳移除，即通过生态、工程或地球化学过程将大气中的 CO_2 移出并长期储存。当某地区在某一年度内“排放量减去减排量和碳移除量后的净值不高于 0”时，可认为该地区实现了年度净零。

某地区计划在 2030-2050 年通过部署碳移除技术实现年度净零。该地区生态环境脆弱，新增生态用水规模受到严格限制。地区周边还可获取一定规模的玄武岩或镁铁质岩资源，可作为增强岩石风化的原料来源。因此，某地区拟从以下三条碳移除路径中选择一种或多种组合方案：植树造林、直接空气捕集与封存（Direct Air Capture and Carbon Storage, DACCS）、增强岩石风化（Enhanced Rock Weathering, ERW）。

A. 植树造林路径

树木通过光合作用将大气中的 CO_2 固定到生物体中，从而形成陆地碳汇；但在干旱—半干旱地区，其净固碳效应不仅取决于生长速度，还受到成活率、水资源约束、灌溉能耗以及灾害和反转风险的影响。因此，需要在统一系统边界下，对造林路径的长期净固碳能力进行定量评估。

为简化计算，设仅考虑地上生物量碳库，忽略土壤碳和木制品碳库。设造林后 t 年单位面积累计固定的总 CO_2 当量、单位面积累计灌溉量和单位面积 t 年累计净固碳量分别满足下列关系：

$$CO_2(t) = 0.5 \cdot \frac{B_{\max}}{1+\exp[-0.24(t-18)]} \cdot \exp\left[-0.01t - 0.6\frac{\max(0, ET-0.7P)}{ET}\right] \cdot \frac{44}{12}$$

$$W_{unit} = \eta \cdot \max(0, ET-0.7P) \cdot (1+q+q^2+q^3+\cdots+q^N)$$

$$R_t = 0.9\,[CO_2(t) - CO_2(0)] - W_{unit}\, e_{pump}\, EF_{grid}$$

$$A^* = \min\left(A_{max}, \frac{W_{total}}{W_{unit}}\right) \quad , \quad R_{total} = A^* \cdot R_t$$

符号	说明	单位	该地区取值（如有）
A^*	在土地和新增生态用水共同约束下的最大可造林面积	ha（公顷）	
A_{max}	可造林土地上限	ha	5×10^4
$B_{\max}$	最大地上生物量	吨 C/ha	210
$CO_2(t)$	造林后 t 年单位面积累计固定的总 CO_2 当量	吨 CO_2/ha	

e_{pump}	抽水电耗系数	kWh/m³	0.35
EF_{grid}	电网排放因子	kgCO_2/kWh	0.554
ET	年实际蒸散需求	mm/年	450
exp( )	以自然常数 e 为底的指数运算		
$\max(a,b)$	取其中的最大值		
$\min(a,b)$	取其中的最小值		
N	需要灌溉的年数	年	6
P	平均年降水量	mm/年	120
q	灌溉需求逐年衰减系数		0.85
R_t	造林后 t 年单位面积累计净固碳量	吨 CO_2/ha	
R_{total}	造林后 t 年累计净固碳量	吨 CO_2	
W_{total}	可用于该路径的新增生态用水总量	m³	3.8×10^8
W_{unit}	前 N 年单位面积累计灌溉量	m³/ha	
η	灌溉效率	年·m³/(ha·mm)	10

5-1 理论上，若该地区降水量达_____mm/年以上（其他条件不变），则可以“靠天种树”。保留三位有效数字。

5-2 求该地区植树造林路径的 20 年最大累计净固碳量，并判断该路径首先受土地约束还是新增生态用水约束控制。保留三位有效数字。

B. DACCS 路径

直接空气捕集与封存（DACCS）属于工程碳移除方法。其基本原理是：利用吸附剂或吸收剂从空气中直接分离 CO_2，再将捕集到的 CO_2 压缩并封存。由于空气中 CO_2 含量很低，DACCS 的净移除能力不仅取决于装置本身的捕集效率，还受到空气处理规模、风机能耗和供热方式的共同控制。

对该地区的 DACCS 方案进行简化分析，该装置每套占地面积为 200 ha，一天内的空气流量作周期变化，空气中 CO_2 的浓度固定，并且捕集效率会随空气流量偏离额定值而变化。该装置每天 t 时刻的空气流量，捕集效率为

$$Q(t)=Q_0\left[1+\alpha\cos\left(\frac{\pi t}{12}-\frac{5\pi}{4}\right)\right]\quad,\quad \eta(t)=\eta_0\left[1-\beta\cos\left(\frac{\pi t}{12}-\frac{5\pi}{4}\right)\right]$$

对于该装置的 CO_2 捕集量，有：

$$M_{gross} = \frac{M_{CO_2}}{V_m} \cdot c_0 \cdot Q_0 \eta_0 \left(1 - \frac{\alpha\beta}{2}\right)$$

$$E_{total} = e_{fan} Q_0 \left(1 + \frac{3}{2}\alpha^2\right) + P_{aux} + \frac{q_h M_{gross}}{2.5}$$

$$M_{net} = 0.95 M_{gross} - EF_{grid} E_{total}$$

符号	说明	单位	该地区取值（如有）
c_0	空气中 CO_2 的浓度	ppm	现代平均值
e_{fan}	风机能耗系数	kWh/m³	9.6×10^{-5}
EF_{grid}	电网排放因子	$kgCO_2/kWh$	0.554
E_{total}	DACCS 装置年总用电量	kWh/年	
M_{CO_2}	CO_2 的摩尔质量	g/mol	化学标准值
M_{gross}	DACCS 装置年总 CO_2 捕集量	吨 CO_2/年	
M_{net}	DACCS 装置年净 CO_2 移除量	吨 CO_2/年	
P_{aux}	辅助设备总功率	kW	8×10^4
q_h	单位 CO_2 捕集量低温热需求	J/吨 CO_2	5.5×10^9
Q_0	空气流量平均值	m³/h	2.5×10^8
$Q(t)$	每天 t 时刻的空气流量	m³/h	
V_m	气体的摩尔体积	m^3/mol	0.0224
α	空气流量变化系数		0.2
β	捕集效率变化系数		0.1
η_0	捕集效率平均值		0.6
$\eta(t)$	每天 t 时刻的捕集效率		

5-3 试推断该地区一天内风速最大的时刻可能是_____时。

5-4 求该地区每套 DACCS 装置的年净 CO_2 移除量，判断当前条件下是否形成真正的碳移除。保留三位有效数字。

C. 增强岩石风化路径

增强岩石风化方法通过将细碎的硅酸盐岩施加到地表，使其与 CO_2 和水发生化学反应，最终将碳以溶解无机碳形式带入水循环，实现长期封存。假设该地区计划一次性施加一定质量的玄武岩质岩粉，其中仅镁橄榄石（Mg_2SiO_4）消耗 CO_2，质量分数为 ω 。岩粉颗粒近似视为粒径 d 的等径球体，风化过程中颗粒半径逐渐减小。岩粉中可反应矿

物剩余质量服从指数衰减，可用下列模型描述：

$$k_s = k_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_s}-\frac{1}{T_0}\right)\right]$$

$$M_{gross} = 0.94\omega M_r\left[1-\exp\left(-\frac{6k_s t}{\rho d}\right)\right]\cdot\frac{4M_{CO_2}}{M_{Fo}} \quad , \quad A_{ERW} = \frac{M_r}{r_{app}}$$

$$M_{proc} = M_r\left(EF_{grid}E_{pul} + Le_{trans}\right) \quad , \quad M_{net} = M_{gross} - M_{proc}$$

符号	说明	单位	该地区取值（如有）
A_{ERW}	增强岩石风化工程占地面积	ha	
d	岩粉平均粒径	μm	40
e_{trans}	运输排放因子	$kgCO_2$/(吨·km)	0.08
E_a	表面风化表观活化能	J/mol	4×10^4
EF_{grid}	电网排放因子	$kgCO_2$/kWh	0.554
E_{pul}	岩石磨粉耗电系数	kWh/吨	30
exp( )	以自然常数 e 为底的指数运算		
k_0	标准表面风化速率	g/(m^2·年)	1.6
k_s	实际表面风化速率	g/(m^2·年)	
L	运输距离	km	25
M_{CO_2}	CO_2 的摩尔质量	g/mol	化学标准值
M_{Fo}	镁橄榄石的摩尔质量	g/mol	化学标准值
M_{gross}	增强岩石风化总碳移除量	吨 CO_2	
M_{net}	增强岩石风化净碳移除量	吨 CO_2	
M_{proc}	过程总排放量	吨 CO_2	
M_r	施加岩粉总质量	吨	
r_{app}	单位面积岩粉施加量	吨/ha	100
R	理想气体状态常数	J/(mol·K)	8.314
t	风化总时间	年	20
T_0	标准温度	K	273
T_s	实际温度	K	288
ρ	岩石密度	kg/m^3	3×10^3
ω	岩粉中镁橄榄石的质量分数		0.36

5-5 写出镁橄榄石风化反应方程式（硅元素形成硅酸 H_4SiO_4）。要求配平。

5-6 求该增强岩石风化方案每公顷的 20 年累计净碳移除量。保留三位有效数字。

D. 路径组合

若该地区的碳移除规划要求在 2030-2050 年内累计净碳移除量不少于 4×10^6 吨 CO_2，规划的土地面积不能超过 8×10^4 ha。已知上述三种路径的**单位面积运行 20 年的总成本**分别为：植树造林：6 万元/ha；DACCS：800 万元/ha；增强岩石风化：2 万元/ha。

5-7 根据前面各题的计算结果，计算满足碳移除需求的最小预算。保留三位有效数字。

【注意：DACCS 装置必须成套建设。】