

植物色素王国奇遇记

郑春阳, 刘石瑀, 衣诺, 商虹*

中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083

摘要: 植物色素是存在于植物细胞中的天然有机化合物。它们赋予植物五彩斑斓的颜色, 在光合作用及其他生理反应过程中发挥着重要作用。本文对植物色素的分类及化学分子结构进行了科普, 并介绍了其基本显色机理, 引导人们从分子水平上认知绚丽多彩的世界、明确有机化学与植物生理活性的内在联系。

关键词: 植物色素; 有机化合物; 分子结构; 显色机理

中图分类号: G64; O6

The Adventures in the Kingdom of Plant Pigments

Chunyang Zheng, Shiyu Liu, Nuo Yi, Hong Shang*

School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China.

Abstract: Plant pigments are natural organic compounds found in plant cells. They impart vibrant colors to plants and play essential roles in processes such as photosynthesis and other physiological reactions. This article provides an overview of the classification and chemical molecular structures of plant pigments, as well as an introduction to their basic coloration mechanisms. It guides individuals in understanding the colorful world at the molecular level and emphasizes the intrinsic connection between organic chemistry and plant physiological activities.

Key Words: Plant pigment; Organic compound; Molecular structure; Chromogenic mechanism

面对老师布置的科研任务和晦涩难懂的机翻文献, 小明实在力不从心, 他刚放下手中钻研了一半的论文, 又马上赶到通风橱查看蒸馏实验进展, 望着冷凝管口一滴一滴的蒸馏液体, 小明出了神, 分不清是困倦还是无聊来袭, 他伏到桌上, 逐渐失去了意识……

1 五光“识”色之初至色素王国

“喂, 能听见吗?” 一个稚嫩的声音叫醒了他, 小明缓缓睁开双眼, 寻找着声音的来源——一个五彩缤纷的小精灵。“你是……这是什么地方?” 小明被眼前的景象惊呆了, “来自异世界的科研冒险者, 欢迎来到植物色素王国, 我是色素小精灵。被召唤来此的你, 肩负着寻找色素王国失落的宝石的任务, 而我将引导你游历植物色素王国各地, 帮助你集齐五颗色素宝石, 打开返回人类世界的大门。”

小明课余博览各种异世界体裁的文娱作品, 对于这种桥段早已见怪不怪, 没想到现在自己成了主角, 他调整好心态, 跟随着小精灵的步伐, 几句话便熟络了起来, 小精灵仿佛是为小明量身定做的冒险伙伴。

收稿: 2023-08-24; 录用: 2023-09-22; 网络发表: 2023-11-03

*通讯作者, Email: shanghong@cugb.edu.cn

基金资助: 2022年第二批产学研合作协同育人项目(220800719181358); 中国地质大学(北京)2022年度本科教育质量提升计划建设项目(XXKC202206); 中国地质大学(北京)2023年大学生创新创业训练项目

“小精灵，这植物色素王国可真漂亮，到处都充满了五彩斑斓的色彩。”

“那还用说，欢迎来到美丽的国度，这里就是多彩植物色素的世界，说到颜色，那你知道为什么会有这么多颜色吗？”小精灵边走边问。

“额，是光的反射对吧？中学期间学过。”

“不完全正确，颜色的本质是光的属性。它涉及到光的波长和频率，当光线经过物体时，物体吸收或反射不同波长的光，这一现象被我们的眼睛感知到就有了颜色。”小精灵边走边说，“不同波长的光对应不同的颜色，人类可以感知的可见光波长范围大约在380–750 nm之间。按波长从低到高依次是紫色、蓝色、绿色、黄色、橙色和红色，它们构成了我们日常生活中所感知到的大部分颜色。超过这个波长范围的光对人眼是不可见的哦。”

“但是我们看到的却是没有被色素吸收的光对吧？”小明赶紧问道。

“还是有些基础的嘛。”小精灵点了点头，“首先，当光照射到植物上时，光的能量被传递给存在于植物细胞内的色素分子上并被其吸收，使这些分子或某些原子处于一个更高的能级，也就是说能量吸收导致色素分子的电子跃迁到一个激发态。不同类型的物体会对不同波长的光有不同的吸收特性。根据物体吸收的光谱特性，我们就能观察到不同的颜色和光学效果。”

“那么，色素分子内的电子是如何跃迁的呢？我只知道中学课本上的焰色反应，不同金属元素的电子跃迁后再跳回低能级并将能量以光能形式释放。色素分子中难道也存在各种各样的金属元素吗？”小明追问道。

“嘿嘿，那可就说来话长了。分子内存在各原子间电子构成的共价键，共价键由电子密度较高的成键轨道和分子密度较低的反键轨道构成，对于植物色素的电子能级跃迁，我们可以建立如图1的模型，分子吸收通常表现为 $n \rightarrow \pi^*$ 和 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁，因而吸收范围多在200–800 nm之间，你可以理解为色素分子取食能量是有一个范围的。”小精灵讲得很是耐心。

“那，植物色素分子内的共价键在显色中的作用就等同于焰色反应中金素的作用吗？”

“并不是色素分子内的共价键都会参与显色，植物色素分子中存在能吸收光辐射产生跃迁的不饱和基团及其相关的化学键，它们被称作生色团，例如苯环、碳碳双键、碳氧双键、碳氮双键、羧基等，这些家伙便是小明你心心念念的关键因素啦。当一个色素分子中共轭的生色团数量大于两个以上时，这个色素分子对光的主要吸收波段将移向长波方向(红)。色素分子内的生色团共轭体系的相对大小与它所吸收的光的波长的长短成正比，综合到宏观层面来讲，当某一物质的吸收光的波长区段移动到了可见光区域时，该物质就会显现出颜色。如果一分子中含有多个生色团，或有称作助色团的另一基团存在时，那么它的颜色往往偏深。这里所说的助色团是含孤对电子的基团，如氨基、羟基和卤代基等，这些基团与生色团上的不饱和键作用，使颜色加深。”

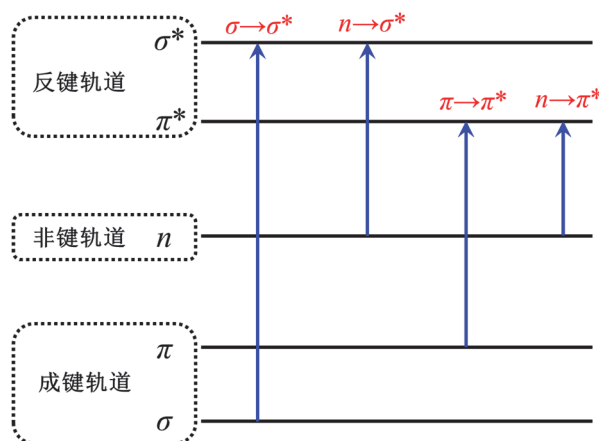


图1 电子能级与电子跃迁示意图

小明被小精灵的博学深深折服，他先是激动地看着小精灵，但突然又不好意思地低下了头，这个聪明的小家伙一眼就明白了小明在想什么，“年轻人，别灰心嘛，好好学，你也可以哒！”

就这样，小明和小精灵满怀期待地开启了色素王国的奇妙旅程。

“小精灵，你对我们要找的色素宝石有什么线索吗？”

“传说中，色素王国曾有五块宝石，失落在世界各地，它们分别是象征勤劳的绿宝石、智慧的黄宝石、神秘的蓝宝石、守护的红宝石和象征希望的紫宝石，当拥有这些品质的科研冒险者出现时，它们自会现身的，我相信我们可以做到。”小精灵很自信，但小明却面露难色，“这些科研品质，我真的具备吗？”

2 叶绿超级工厂吡咯衍生物类色素

小明好奇地环顾着四周，这时眼前出现了一片宏伟的建筑群。这是一片绿色的柱状塔群，高低相间错落有致，仿佛大片的绿色森林一般。“这里是植物色素王国的超级工厂，这些绿色的高塔正是基粒，光合作用进行的场所，走，和我一起参观一下我们的超级工厂吧。”在色素小精灵的带领下，小明进入了基粒高塔，只见一个个绿色的色素正忙碌在自己的工位上，有条不紊地进行着能量转化的工作。

小明被眼前的犹如机械般高效运转的景象震撼到了，这时，小精灵给小明介绍了车间绿主任，“这边来，小兄弟，”绿主任招呼着小明并开始了自己的讲解，“我们吡咯衍生物类色素是个大家庭，已知的叶绿素有7种，其主要代表为叶绿素a与叶绿素b。叶绿素a在光合作用中起着至关重要的作用，它能够捕捉照射到叶片上的光能，将其转化为有机物合成中所需要的能量。植物如此利用光能将二氧化碳和水转化为含碳有机物，并释放出氧气，这一环节在超级工厂生产线的最上游；叶绿素b在光合作用中与叶绿素a共同作用，在扩展吸收光谱的范围、传递能量等方面发挥着重要的辅助作用，是超级工厂生产线下游的中坚力量。它们共同协作，使植物能够最大限度地利用光的能量，完成光合作用。小明，你看看，你能分辨出这些工人哪些是叶绿素a吗？”

“嘿嘿，绿主任，这可难不倒我，叶绿素a和叶绿素b虽然都是绿色，但叶绿素a颜色更深，除此之外，在常见的高等植物中叶绿素a和叶绿素b的含量比大约为3：1，所以，那一大批蓝绿色的工人就是叶绿素a。我猜对了吗，主任？”小明兴奋地回答道，初至色素王国的倦容已经离开了他的面庞。

“哟，小伙子还是有些基础的嘛！”绿主任很满意。小明笑着挠了挠头，有关叶绿素的知识他从老师交给他的文献中刚好读到过，回想起那痛苦的文献查阅经历，在此发挥作用让小明感到一丝慰藉。

绿主任见状继续讲解：“叶绿素a和叶绿素b两兄弟是植物体中最重要的光合色素，如图2所示，在结构上，它们的核心都是一个镁卟啉环，即由4个吡咯环相连而成、配位金属为镁的大环，这种结构对植物的光合作用及显色都至关重要；它们的不同之处是吡咯环上的小胳膊——取代基(叶绿素a为甲基，叶绿素b为醛基)，这导致了二者的溶解性等生化特征的不同。”

值得指出的是，血液中最重要成分血红素的组成也是卟啉化合物，其中心配位金属是铁。由此可见，无论是植物王国还是动物界，吡咯衍生物类有机化合物都扮演着不可或缺的角色。

“小明，还记得之前和你讲过的色素生色原理吗？你看，这些穿着绿色工作服的叶绿素，它身上的卟啉分子中存在三种能级跃迁，分别与紫光、红光和微波的频率相吻合，而对绿光几乎没有相对应的电子能级跃迁^[1]，所以叶绿素这类吡咯衍生物类色素可以吸收红光和紫光，而对绿光的吸收较弱，我们肉眼看上去呈现绿色。但由于叶绿素兄弟含有不同的助色团，这些取代基也对光的吸收有一定影响，这也就导致了叶绿素a(蓝绿色)和叶绿素b(黄绿色)颜色的微小差异。”小精灵讲得很认真。

“我也知道一些。”小明接过话茬，“在我们人类的日常生活中，叶绿素等吡咯衍生物类物质的保健应用相当广泛，它们可以预防DNA的氧化损伤，并通过螯合各种促氧化金属离子而抑制脂质氧化，以降低动脉硬化和阿尔兹海默症等发病率。而在体外研究中，人们发现叶绿素对胰腺癌细胞的生长有抑制效果。”

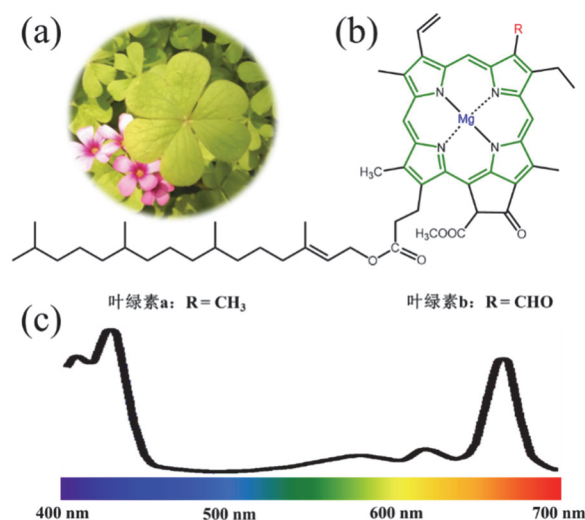


图2 叶绿素的分子结构图及紫外-可见吸收光谱图

绿主任点了点头，他很中意小明的求知精神，这就是科研者的勤劳。他从身后掏出一个小盒子，递到小明的手中，那是一颗晶莹剔透的绿色宝石，小明与小精灵相视而笑，他们的冒险步入正轨，小明也离成功更进一步。

告别了绿色的超级工厂与勤劳的吡咯衍生物类色素们，小明和小精灵愉快地朝着下一个目的地出发了。

3 橙红智慧仓库多烯类色素

小明与小精灵漫步在质体广场，经常能看到一些橙红色的颗粒状建筑，小明努力地回想着自己在中学生物课上学习到的细胞器：线粒体？颜色不对，液泡？应该更圆滑，中心体？形状不符……

看着小明紧皱的眉头，小精灵慢悠悠地道：“这些橙红色的颗粒建筑是胡萝卜素体和番茄红素体，它们联合作用为植物色素王国的智慧仓库。与超级工厂不同，智慧仓库是联合机构，其中的胡萝卜素作为植物体内的能源储备库，而番茄红素体联合叶绿体中的叶黄素作为王国的智慧应对中心。如果按照分子结构进行划分，它们都属于多烯类色素。胡萝卜素在植物体内担任储存能量的重要角色。它们存在于植物细胞的质体中，并且可以被植物体利用。胡萝卜素可以在植物体内储存能量，类似于超级工厂中储存的产品。当植物需要能量时，它们可以利用胡萝卜素分子中储存的能量进行代谢活动。如果仅此而已，也勉强只是仓库，如何体现其智慧性呢？那就要看叶黄素与番茄红素了，它们同样参与光合作用，不过主要吸收400–500 nm蓝光和绿光，保障了植物高效吸收利用光能、促进光合作用的同时，增强对强光强氧化环境的适应能力，它们可以中和有害的自由基，减少氧化损伤，减轻光能过剩和氧化损伤所造成的影响。这样，一个储能与应对相结合的智慧国库便可以高效运转了。”

“还真的挺智能，我们可以进去参观一下吗？”小明已经迫不及待地想要与这些神奇的色素见面了。“哈哈，小伙子很热情啊，我来接待你，我是编号53689智慧国库的管员，我来为你介绍一下多烯类色素的具体情况，多烯类色素的主体结构是四萜类化合物，这是一类含有多个异戊二烯结构单元的共轭有机化合物，其生色团是共轭的C=C–C=C。橙色的β-胡萝卜素、黄色的叶黄素、红色的番茄红素和辣椒红素都属于常见的多烯类色素^[2]。”

小精灵再次为小明讲解了此类色素的生色机理：多烯类色素的最小结构单元是共轭二烯，详见图3，对应的吸收波长为215 nm。两个以上的共轭双键作为生色团作用时，其吸收光波长会发生明显红移，于400–500 nm波长处对蓝紫光的吸收最强，从而使得此类色素多显现为橙色、黄色或红色^[3]。

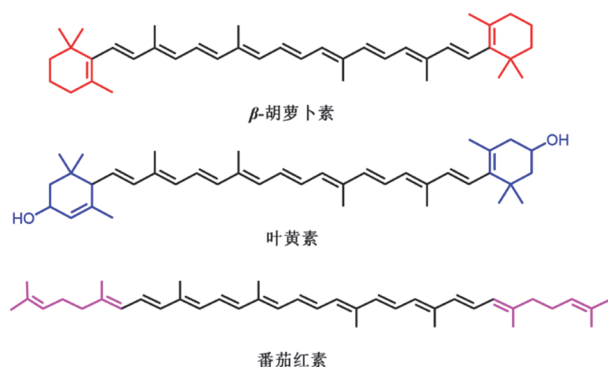


图3 多烯类色素的分子结构图

而小明也没有忘记自己从之前查阅的文献中积累下来的知识，类胡萝卜素不仅是维生素的合成原料，还在免疫调节和延缓衰老等多个保健领域发光发热；叶黄素同时具备抗氧化和视觉保护功能，可减缓视力下降、预防眼部疾病，所以家长们通常想尽办法让孩子们克服对胡萝卜的挑食，从膳食角度维护孩子明亮的双眼；临床试验证明番茄红素可极大地降低中老年人心脏病、高血压的发病率。人工合成的 β -胡萝卜素广泛应用于食品工业中增色添味。

“也许，科研路上灵感固然重要，但博览群书、博闻强记更是智慧的养料。诶，小明，你快看那边的仓库好像有什么东西正在发光。”他们寻着光跑了过去，那正是他们此行的目的，一颗黄色的宝石，也许这就是异世界对小明智慧的肯定吧。

离开了智慧仓库，小明感到收获满满，老师安排给自己的科研项目好像并不是他一直以来认为的那样无趣，自己虽然不像其他同学一样总能有新奇的点子，但自己的努力与积累，也是智慧的一部分。想到这里，小明开心地跑了起来，“喂，等等我呀！”小精灵追上去。

4 多彩梦幻花海酚类色素

“哇！”这是什么，眼前出现了一个巨大的大液泡，仿佛一个小小的星球，小明呆呆地站在原地，这时，小精灵使坏一样地推了小明一把，小明被液泡吞入，眼前的光景，如果不亲自进来，一定无法想象。“乱花渐欲迷人眼”，这是一片梦一般的花海，五颜六色也不足以形容其色彩的丰富。

“啊，终于来到了这里啊，小明，欢迎来到植物色素世界最美的地方——梦幻花海，这里是酚类色素的乐园，是色彩的舞台，走，我们到花海中去。”小精灵拉着还愣在原地的的小明，走向这无边的花海。“梦幻花海是植物色素王国的神秘乐园，它们为植物的花朵和果实提供鲜艳的颜色以吸引虫鸟促进传粉。花青素还可以吸收特定波长的光线，将光能转化为植物能量。并能在强光照射下起到光保护作用，防止光损伤，中和自由基，保护细胞免受氧化损伤。绝对不是中看不中用哦。”

凑近看，这些花朵竟然都是一个又一个的色素分子，热情的红色，清爽的蓝色，神秘的紫色，活力的橙色，温暖的黄色……这绝对是小明来到这个世界见过的颜值最高的一批色素了。小明被眼前一丛紫红色的色素灌木丛吸引住了，“小精灵，这是什么色素？”小明问道，“这个嘛，看样子应该是甘蓝红色素吧。小明，你看，色素王国的色素们不只有单体形式，眼前的甘蓝红色素就是典型的混合体色素，它是对紫甘蓝中有色化合物的总称，可以归类为花色苷类色素，由花青素和黄酮等构成。色素的世界纷繁复杂，王国政府对色素的统计工作也不曾中断，这些混合体色素的成分也在不断探究中。”

“酚类色素主要包括花青素和花黄素，花青素的基本结构为 α -苯基苯丙吡喃阳离子，具有一个基本的C6-C3-C6碳骨架结构，可见图4。由于环上不同位置发生的甲基化和羟基化等修饰，主要为C6环上R1和R3位置的基团不同，从而形成不同的花青素类型并呈现出不同的颜色。其中，Ph、C=C、C=O为生色团，而助色团是-OH、-OR。但影响花青素颜色的因素不止生色团和助色团的结构。”小精灵一如既往地色素显色做出讲解。

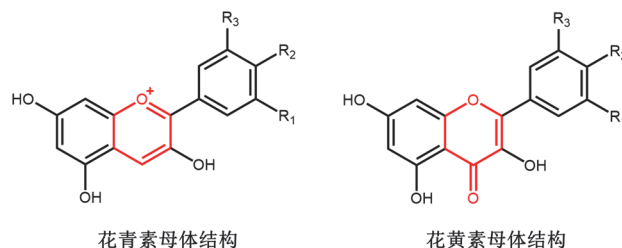


图4 花青素和花黄素的基本结构式

“在人类世界，花青素有着植物显色剂的美誉，所以，另一个影响因素就是酸碱度吧？”小明抢答道。“没错，植物体内的花青素会随着细胞液酸碱性的变化，而赋予花瓣不同的颜色，同时花青素的颜色也受到氧气含量、温度以及磷等其他因素的影响^[4]。花青素分子中的某些基团在不同pH条件下会发生质子化或去质子化反应，导致分子结构发生变化，在酸性条件下，花青素分子中的某些基团会接受质子(H⁺)，使分子变得更为稳定。这导致花青素分子吸收较长波长的光，通常表现为红色。而在碱性条件下，花青素分子中的某些基团会失去质子，使分子变得不稳定。这导致花青素分子吸收较短波长的光，通常表现为蓝色。因此，花青素在不同的酸碱度条件下会呈现不同的颜色，从红色到蓝色，通过紫色和紫红色等中间颜色。酸碱度就像植物色素王国的四季轮转，这正是梦幻花海美丽变换的原因。”

“花青素可以用作食品添加剂，用于改善食品的颜色和口感，它常常被用于糕点、果酱、果汁、糖果和饮料中。花青素也是医药保健领域的常青树，它能减轻体内自由基对细胞的损害，增强免疫系统，避免人体过早器官衰竭。在女性的日用品口红中，也有它们的身影。”正当小明和小精灵分享自己所熟知的知识时，一颗蓝色的小石头从天而降砸中了小明，蓝色的神秘宝石从天而降。

小明畅游在梦幻花海中，他没想到，平日里让他在实验室里备受煎熬的花青素也能带给自己这样的欣喜。小明心中对科研的成见好像已经烟消云散了。

5 红黄护卫军团醌酮类色素

在小精灵的带领下，小明在植物色素王国大开眼界。宽敞明亮的大道上，一行红黄色的士兵迈着坚定的步伐走来，他们高大威猛，全身上下无不透露着对植物色素王国的忠诚与护卫的决心。

“小精灵，这些色素好帅啊。”小明赞叹不已。

“当然，它们是王国的勇士，子民的守护者，是最可爱的色素——醌酮类色素。醌酮类色素的主力军是甜菜素，又分为两支部队，红色的甜菜红素和黄色的甜菜黄素。甜菜素对紫外线辐射具有阻隔作用，帮助植物在强烈阳光下存活，可以增强植物对病原体和害虫的抵抗力，提供一定的防御性保护，增强了植物的抵抗力和适应性。”

“红黄色的护卫军团，醌酮类色素不愧是最可爱的色素。”小明想起了什么，在自己的生活中也存在着无数护卫，他们是在守卫人民安全的警卫，是维护我们权益的律师，是在科研道路上为我们披荆斩棘的导师……

甜菜素的生色团为C=C、COOH、C=N，两个子类助色团不同，甜菜红素为-NH-和-OH，而甜菜黄素的助色团为-NH- (图5)。这种结构上的差异也使得它们最大吸收波长发生红移或蓝移，甜菜红素的可见光最大吸收波长因溶剂不同在535-538 nm之间波动呈红色，甜菜黄素的可见光最大吸收波长在465 nm附近，呈黄色^[5]。

令人更加敬佩的是，红黄护卫军从来不涉足普通的色素子民花色素的居住地，它们永远守护在最危险的地方，默默守护着王国的祥和安定。研究发现甜菜素和花色素相互排斥，从没有发现在一种植物中同时存在这两种色素^[6]。小明追随着军队的步伐，和它们一同站岗、巡逻，守护这个美丽的国度，最终，护卫队的队长为小明颁发了一枚镶嵌着红宝石的荣誉勋章，那是对他护卫精神的嘉奖。

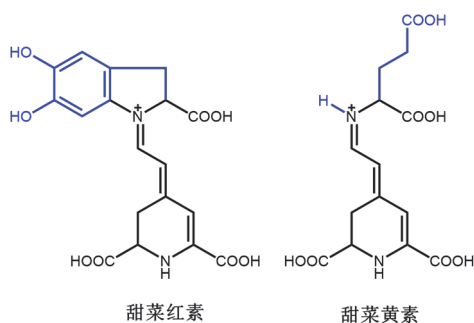


图5 甜菜红素和甜菜黄素的分子结构

甜菜素被广泛用作糕点、果酱、糖果、冰淇淋等食品和药物的着色剂，也应用在唇彩、腮红和眼影等产品中增强色彩。在生物化学领域的科研工作中，甜菜素也被用来标记追踪生物分子。不经意间，小明和小精灵已经收集到了四颗宝石，而最后的希望宝石却迟迟不见踪影。

缤纷多彩的植物色素王国实在美好，如爱岗敬业的叶绿素、储能应对的胡萝卜素、缤纷多彩的花青素、守护一方的甜菜素。这样的游历不仅让小明增长见识，更加全面深刻地认识到了丰富多彩的植物色素世界，更让小明重新燃起了对科研的热情与期待，他决心要好好搞科研，克服困难解决问题，一步一个脚印，走向属于自己科研的成功之巅，也许山高水长，但心向之，必往之。“接下来我们去哪里寻找希望宝石呢？”小明满怀期待地问小精灵。

“还问去哪？都趴在实验台上睡着了，快回去休息吧。”

奇怪，小精灵怎么用导师的声音说话？小明惊觉，猛然起身。小精灵不见了，往日严厉的导师看起来如此和蔼；色素王国消失了，周围仍旧是熟悉的实验室，却处处牵引着小明的心思。小明的神情也不再如前，眼中尽是热情与期待。小明知道，他找到了最后属于自己的那颗宝石——希望。

参 考 文 献

- [1] 刘双双, 鲁建峰, 王鸣魁. 电化学, **2016**, 22 (4), 340.
- [2] Qin, H. L.; Yu, D. Q. *Diterpenoids, Triterpenoids, Sesterterpenoids, Tetraterpenoids, and Carotenoids*; De Gruyter: Berlin, Germany, 2021.
- [3] 裴坚, 吕萍. 有机化学思维进阶. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [4] 安欣, 王亚芸, 任建武, 姜英淑. 中国园艺文摘, **2013**, 29 (11), 19.
- [5] 王长泉, 刘涛, 王宝山. 植物学通报, **2006**, No. 3, 302.
- [6] Stafford, H. A. *Plant Sci.* **1994**, 101, 91.