

参赛队员姓名：_____白子铭_____

中学：_____北京一零一中_____

省份：_____北京市_____

国家/地区：_____中国_____

指导教师姓名：_____马丽霞_____

指导教师单位：_____北京一零一中_____

论文题目：_____对藤蔓植物茎和卷须

_____螺旋生长的研究_____

Name of Team Member: Bai Ziming

Middle School: Beijing 101 Middle School

Province: Beijing

Country/Region: China

Name of Instructor: Ma Lixia

Instructor's Unit: Beijing 101 Middle School

Thesis Title: A Study On The Spiral Growth

Of Stems And Tendrils Of Vines

对藤蔓植物茎和卷须
螺旋生长的研究

作者：白子铭

**A STUDY ON
THE SPIRAL GROWTH OF
STEMS AND TENDRILS OF VINES**

Author: Bai Ziming

2022 S.-T. Yau High School Science Awards
仅用于2022丘成桐中学科学奖公示

摘要：本文对华北地区常见藤蔓植物的缠绕茎和螺旋卷须的生长规律进行了研究。首先以牵牛花、乌菟梅、葫芦、南瓜、黄瓜、葡萄、扁豆、鸡矢藤、五叶地锦等为例，观察了各品种藤蔓植物缠绕茎和螺旋卷须的形态和生长过程；然后运用光学显微镜观察了各品种缠绕茎和螺旋卷须的微观结构，分析归纳了茎和卷须螺旋生长的相关特征和规律，以葫芦、黄瓜、南瓜为代表统计了卷须的螺旋、粗细和分节情况，提出藤蔓植物茎和卷须可分为不对称茎和对称茎两大类、卷须螺旋生长遵守力矩平衡原理；接着综合运用植物学、物理学、仿生学的方法，建立了一个藤蔓植物不对称茎螺旋生长的电子仿生模型，并给出了其应用前景；最后做了些卷须力学特征的测量实验和不对称生长模拟实验。通过三个生长季的研究，可以得出以下结论：藤蔓植物缠绕茎和螺旋卷须可分为不对称茎和对称茎两类；缠绕茎的螺旋生长是由植物的向光性、向地性、向触性和遗传因素共同控制，目的是为了向上、向光生长；卷须的螺旋生长是由植物的向触性引发，目的是为了拉紧卷须、固定植株位置，底层逻辑是细胞不对称生长和遵守力矩平衡原理。

关键词：藤蔓植物、茎和卷须、螺旋生长、不对称生长、力矩平衡

Abstract: In this paper, the growth of twining stems and spiral tendrils of common vines in North China were studied. Firstly, the morphology and growth process of the twining stems and spiral tendrils of the vines of morning glory, plum, gourd, pumpkin, cucumber, grape, lentil, rattan and virginia creeper were observed; Then the microstructure of the winding stems and the spiral tendrils of various varieties was observed by optical microscope, and the relevant characteristics and laws of the spiral growth of the stems and tendrils were analyzed and summarized. The spiral, thickness and node of the tendrils were counted with gourds, cucumbers and pumpkins as representatives. It was proposed that the stems and tendrils of vines could be divided into two categories: asymmetric stems and symmetric stems; Then, an electronic bionic model of vine asymmetric stem growth is established by using the methods of botany, physics and bionics, and its application prospect is given; Finally, some measurement experiments and asymmetric growth simulation experiments of the mechanical characteristics of tendrils were done. Through the study of three growing seasons, the following conclusions can be drawn: the twining stems and spiral tendrils of vines can be divided into two types: asymmetric stems and symmetric stems; The spiral growth of twining stems is controlled by the phototropism, geotropism, tactility and genetic factors of plants, aiming at upward and phototropic growth; The spiral growth of tendrils is initiated by the tactility of plants in order to tighten tendrils and fix the position of plants. The underlying logic is asymmetric growth of cells and compliance with the principle of torque balance.

Keywords: Vines, Stems and Tendrils, Spiral Growth, Asymmetric Growth, Torque Balance

目 录

一、前言	1
1、课题来源	1
2、研究目的和范围	2
3、相关领域前人工作	2
4、研究思路	2
5、研究结果	2
二、研究方法	3
1、实证研究法	3
2、跨学科研究法	3
三、研究过程	3
1、准备工作	3
(1) 查阅双子叶植物茎结构	3
(2) 定义螺旋方向	5
(3) 准备显微观察	5
2、观察缠绕茎形态	5
(1) 牵牛花	6
A、缠绕茎形态	6
B、显微观察	6
(2) 扁豆	6
A、缠绕茎形态	7
B、显微观察	7
(3) 鸡矢藤	7
A、缠绕茎形态	7
B、显微观察	8
(4) 葎草	9
A、缠绕茎形态	9
B、显微观察	9
(5) 缠绕茎特征小结	10
A、外观特征	10
B、显微特征	10

3、观察卷须形态	10
(1) 葫芦	10
A、卷须形态	10
B、卷须螺旋生长	12
C、卷须螺旋方向	15
D、显微观察	16
(2) 南瓜	18
A、卷须形态	18
B、显微观察	19
(3) 黄瓜	20
A、卷须形态	20
B、显微观察	22
(4) 丝瓜	23
A、卷须形态	23
B、显微观察	23
(5) 冬瓜	24
A、卷须形态	24
B、显微观察	25
(6) 葡萄	26
A、卷须形态	26
B、显微观察	28
(7) 乌菘梅	29
A、卷须形态	29
B、显微观察	30
(8) 五叶地锦	31
A、卷须形态	31
B、显微观察	32
(9) 卷须特征小结	32
A、外观特征	32
B、显微特征	33
4、探究卷须生长特点	34
(1) 不对称茎	34

(2) 对称茎	37
5、统计分析卷须螺旋生长的特征	37
(1) 葫芦卷须	37
(2) 黄瓜卷须	41
(3) 南瓜卷须	42
6、电子仿生建模	43
(1) 不对称茎	43
(2) 对称茎	45
(3) 应用前景	45
7、其它实验	45
(1) 卷须张力的测量	45
(2) 卷须劲度系数的测量	45
(3) 卷须的双金属模拟	48
四、结论	50
五、致谢	50
参考文献	51

仅用于2022丘成桐中学科学奖公示
2022 S.-T. Yau High School Science Awards

一、前言

1、课题来源

世间万物，各有其性；但大到天文望远镜拍摄到的遥远星系、地球气象卫星拍摄到的热带风暴，小到身边水池里的漩涡、花园里藤蔓植物的缠绕茎和卷须，万物好像都在旋转。这背后有什么逻辑吗？

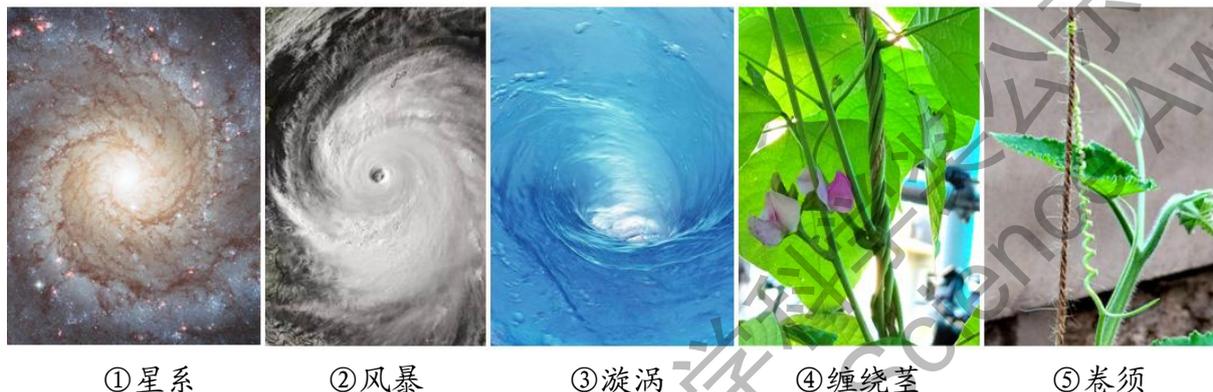


图 1 自然界中的螺旋现象^[注]

我家住在一楼，阳台外面有一个三十多平方米的小院儿。爸爸妈妈在小院儿里种植了牵牛花、葫芦、南瓜、黄瓜、葡萄等藤蔓植物，每年都能花开满园、硕果累累，我闲来无事时就出来看看这里的风景。以前我主要是看热闹，哪个开花了，哪个结果了。现在我看出门道了：它们都是藤蔓类植物，茎和卷须都比较特别，有的是缠绕茎，有的是螺旋卷须。



图 2 小院的风景

[注] 图 1 之①、②、③引自没有版权声明的互联网络，照片④、⑤系本文作者拍摄。本文以下图片，如未特别说明，均为作者拍摄或绘制。

对植物来说，枝蔓茎干绝大多数都是直向生长的，而我家种的这些植物则都存在着螺旋现象。这背后都有什么逻辑呢？本文打算从触手可及的藤蔓植物茎和卷须开始，对其螺旋生长现象进行研究。

2、研究目的和范围

以常见的藤蔓植物牵牛花、乌菘（liǎn）梅、葫芦、南瓜、黄瓜、丝瓜、葡萄、扁豆、鸡矢藤、五叶地锦等为例，研究其缠绕茎或螺旋卷须的特征和规律，找出其螺旋生长的底层逻辑。

3、相关领域前人工作

关于藤蔓植物茎和卷须的文献大多是对其形态的描述，或是从农业生产角度研究抑制卷须生长的方法，或是从基因、生物电层面讨论卷须生成的机理，未见通过显微观察把藤蔓植物的茎和卷须分为不对称茎和对称茎的报道，未见统计法分析卷须螺旋特征的报道，未见使用力矩分析法分析卷须螺旋特征及成因的报道，未见使用仿生建模法研究卷须不对称茎螺旋机制的报道，未见把藤蔓植物卷须螺旋生长的底层逻辑归纳为细胞不对称生长和遵守力矩平衡原理的报道。

4、研究思路

首先以牵牛花、乌菘梅、葫芦、南瓜、黄瓜、葡萄、扁豆、鸡矢藤、五叶地锦等为例，观察各品种藤蔓植物缠绕茎和卷须的形态和螺旋生长过程，用相机拍摄记录下来；然后运用光学显微镜观察各品种茎和卷须的微观结构，分析茎和卷须螺旋生长的相关特征；第三，以葫芦、黄瓜、南瓜为代表统计卷须的螺旋、粗细和分节情况，归纳出卷须螺旋的规律；第四，综合运用植物学、物理学、仿生学的方法，对藤蔓植物卷须不对称茎螺旋生长进行建模；第五，做些卷须的力学特征测量和不对称生长模拟实验；最后，归纳总结出藤蔓植物茎和卷须螺旋生长的底层逻辑。

5、研究结果

本文对华北地区常见藤蔓植物的缠绕茎和螺旋卷须的生长规律进行了三个生长季的研究，得出以下结论：藤蔓植物茎和卷须可分为不对称茎和对称茎两类；缠绕茎的螺旋生长是由植物的向光性、向地性、向触性和遗传因素共同控制，目的是为了向上、向光生长；卷须的螺旋生长是由植物的向触性引发，目的是为了拉紧卷须、固定植株位置，底层逻辑是细胞不对称生长和遵守力矩平衡原理。

二、研究方法

1、实证研究法

通过牵牛花、葫芦、南瓜、黄瓜、葡萄、扁豆等多品种藤蔓植物栽培，以及对乌药梅、鸡矢藤、五叶地锦等藤蔓植物的实地观察，实物采集，实际测量，归纳各品种植物卷须螺旋生长的特征。

2、跨学科研究法

综合运用植物学、物理学、仿生学的方法，对藤蔓植物茎和卷须螺旋生长进行观测、分析和建模，探寻其螺旋生长的底层逻辑。

三、研究过程

1、准备工作

(1) 查阅双子叶植物茎结构

在正式研究开展之前，我先查阅资料了解了一些关于植物茎的知识。图 3 和图 4 展示了双子叶植物茎结构，从外到内依次是表皮、皮层、维管柱，其中皮层包含薄壁组织和厚角组织，维管柱包含维管束、韧皮部、木质部和髓。随着茎中心髓柱的生长，中央有时会出现一个空腔，叫髓腔。髓细胞周围界限分明、较为致密的环形区域，通常称为环髓带，里面包含了木质部、韧皮部等组织。由图可见，植物茎的结构通常是呈中心对称的。

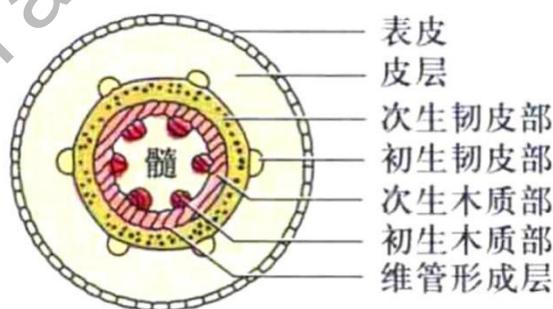


图 3 双子叶植物茎横切面结构^[注]

[注] 图 3 和图 4 均引自马炜梁主编《植物学》教材 P51、P53。

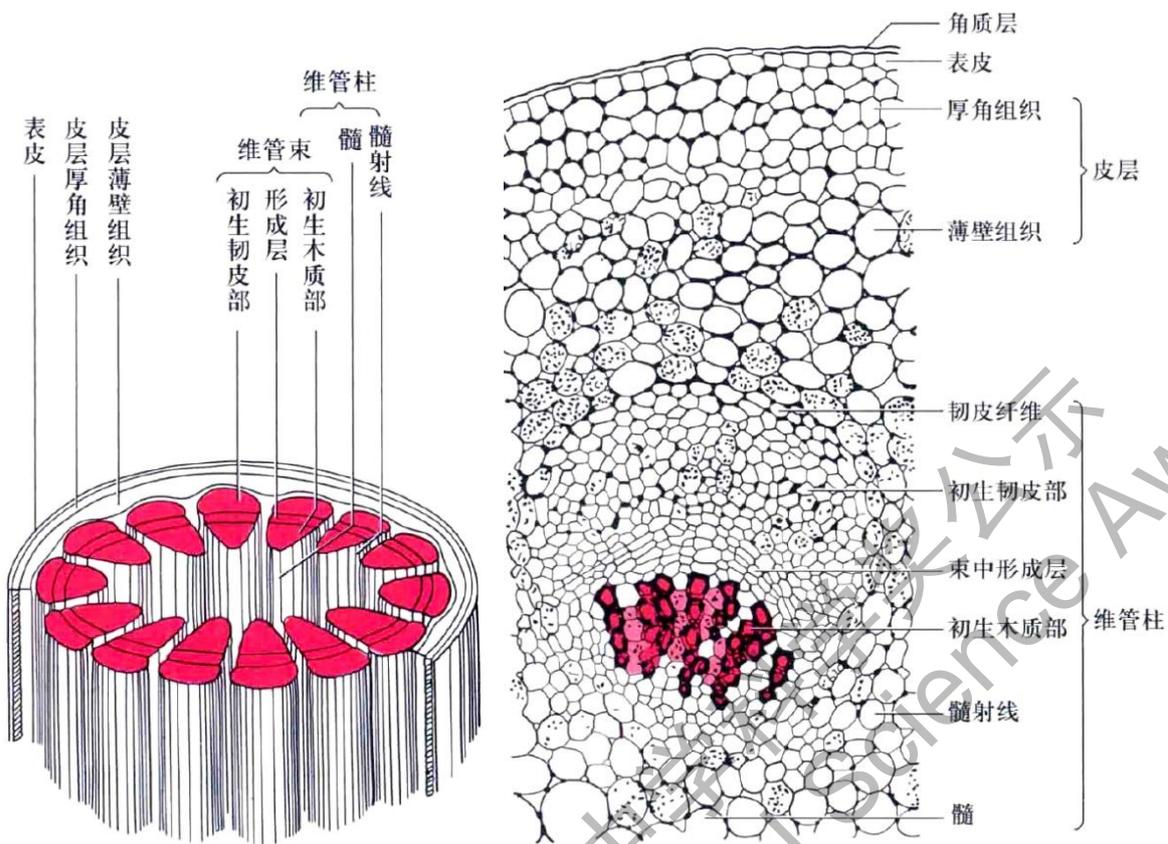


图 4 双子叶植物茎结构



图 5 螺旋方向

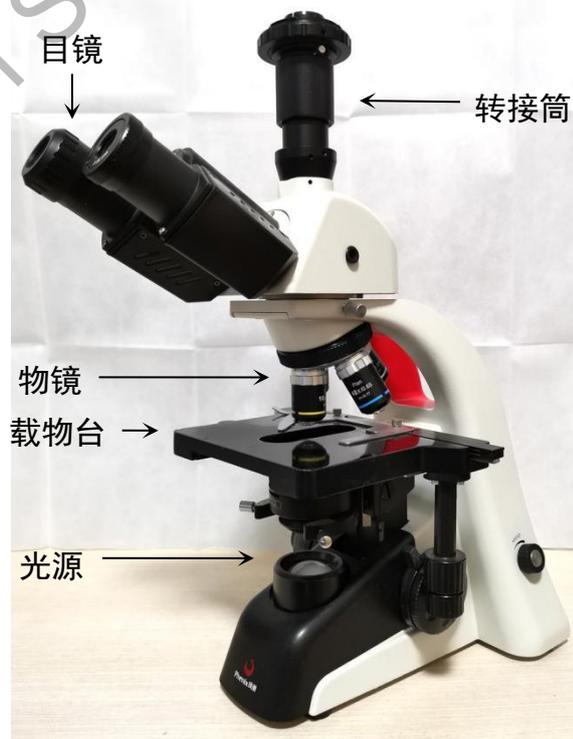


图 6 光学显微镜

(2) 定义螺旋方向

本文讨论的植物生长螺旋方向有顺时针和逆时针之分，或称左旋和右旋。为便于识别和区分，本文规定：判断缠绕茎或螺旋卷须生长方向时，一律从其顶端向根部看去，看其顺时针或逆时针的方向（如图 5 所示）。由于卷须可以有多节，并且各节的螺旋方向可能有转换，本文规定：从根部数卷须第一节的顺逆方向为该卷须的螺旋方向。

(3) 准备显微观察

为了进一步观察卷须的微观结构，找寻其螺旋生长的底层逻辑，下面运用图 6 所示的三目光学显微镜对卷须横切片进行观察。由于光学显微镜光源在载物台下方，为了使切片获得均匀光照，每个切片要切得尽量薄，最好控制在 0.5mm 以内。另外由于显微镜物镜的景深很短，被观测切面在一个平面上才能看清楚，所以要使卷须切片的两个切面保持平行，这样观测拍摄效果才好。为此，我专门找来了黄瓜、蒜苔切片练手，直到能切出又薄又匀的卷须切片。

三目光学显微镜原本是支持外接相机拍照的，即把数码单反相机机身通过垂直转接筒接到显微镜上，但我多次尝试拍摄后效果不佳，主要是成像对比度不高、放大倍率低，明显不如通过目镜直接观察。本文以下显微照片均用荣耀 20 Pro 手机直接对着光学显微镜目镜拍摄，效果还不错。

2、观察缠绕茎形态

许多藤蔓植物自身难以直立，须依附于别的植物或物体才能生长，比如牵牛花、扁豆、鸡矢藤、五叶地锦等，它们都有螺旋向上的缠绕茎。在茎的缠绕过程中，有的茎逆时针而上，有的茎顺时针而上。我对这个现象很好奇，接下来就以此为切入点进行观察和研究。

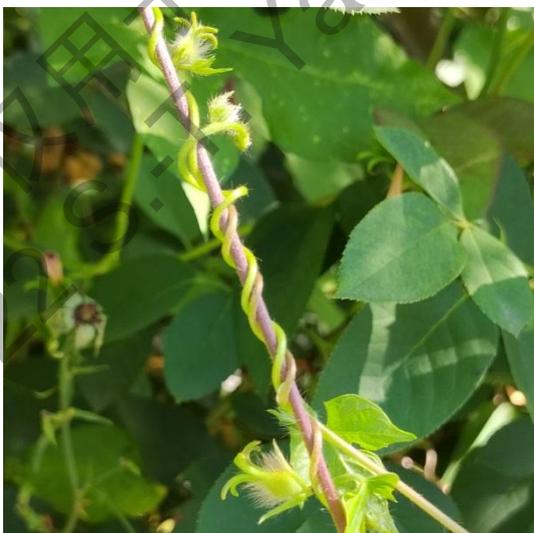


图 7 牵牛花缠绕茎

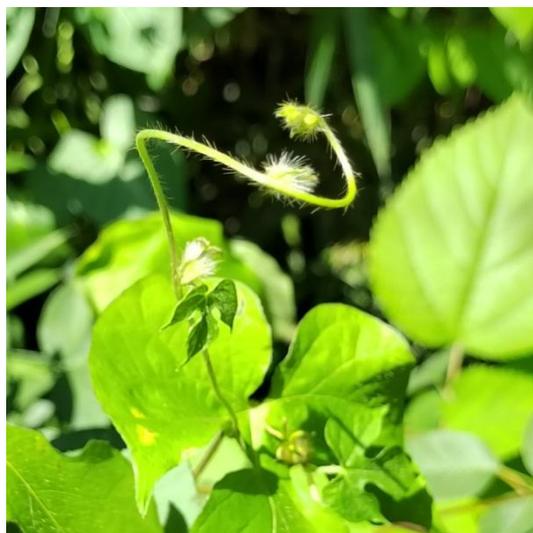


图 8 牵牛花茎的螺旋生长趋势

(1) 牵牛花

A、缠绕茎形态

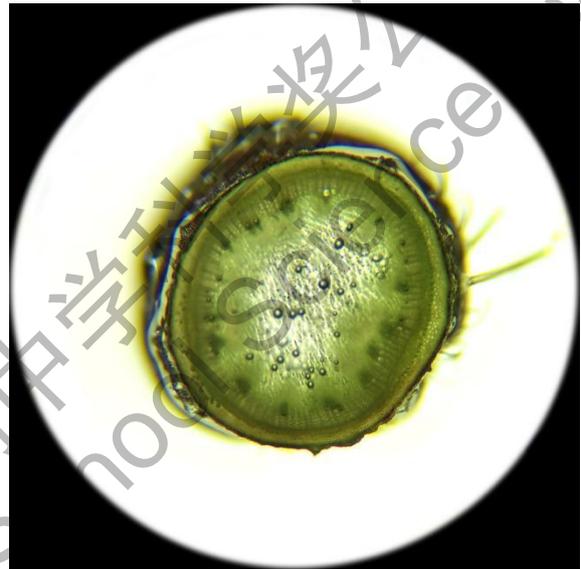
牵牛花的主茎一生长出来就有一种要向上螺旋的态势。如果有物体可以缠绕，它就逆时针螺旋缠绕向上；如果没有物体可以依附，也能看出其逆时针螺旋的趋势。

B、显微观察

取一段牵牛花的缠绕茎，对其横切片进行观察，可见其环髓带均匀完整，无缺口（如图9所示）。



①切片1，物镜4×目镜16×



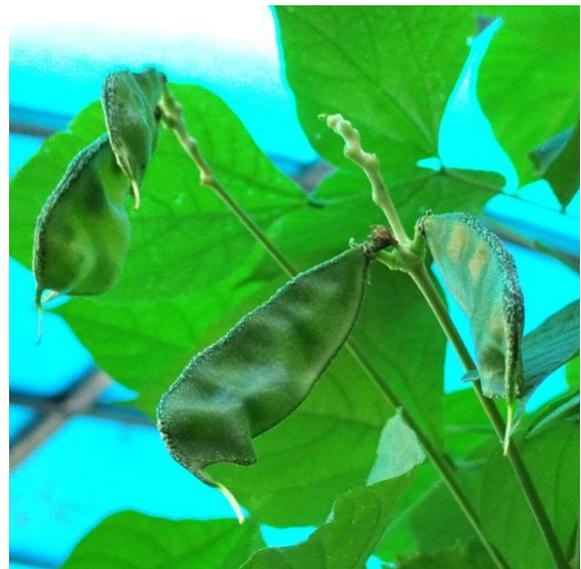
②切片2，物镜4×目镜16×

图9 牵牛花茎切片

(2) 扁豆



①缠绕茎



②扁豆角

图10 扁豆

A、缠绕茎形态

扁豆是常见的藤蔓类蔬菜，其主茎在生长过程中和牵牛花类似，也是逆时针螺旋向上。

B、显微观察

由图 11 可见，扁豆缠绕茎不同部位的环髓带也很完整，无缺口。



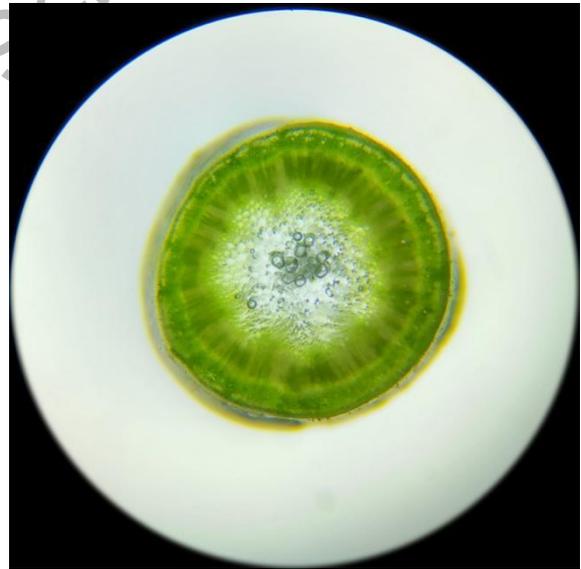
①切片 1，物镜 4×目镜 10×



②切片 2，物镜 4×目镜 10×



③切片 3，物镜 4×目镜 10×



④切片 4，物镜 4×目镜 10×

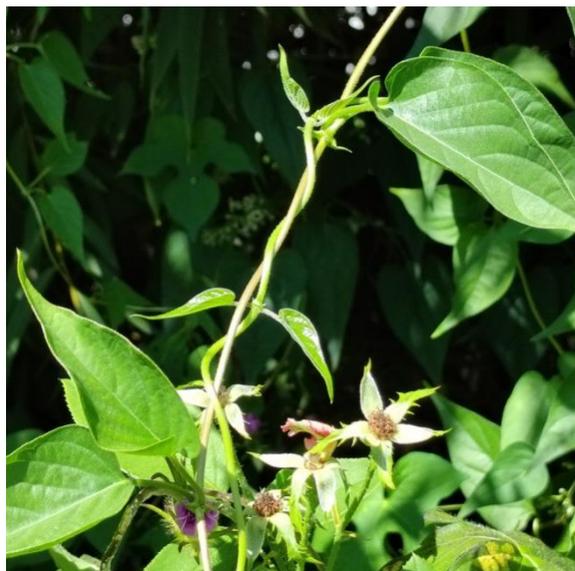
图 11 扁豆茎切片

(3) 鸡矢藤

A、缠绕茎形态

鸡矢藤是一种常见的藤蔓类中药材，可用来。我家小区花园里有不少鸡矢藤，常常和牵牛花、月季长在一起。仔细看，鸡矢藤的茎和叶子有别

于牵牛花，其叶子细长，茎缠绕起来没有规律，既有逆时针也有顺时针。



①顺时针缠绕茎

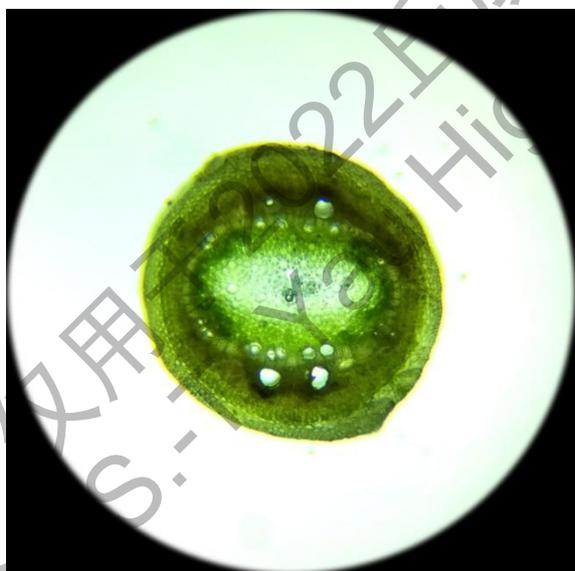


②逆时针缠绕茎

图 12 鸡矢藤

B、显微观察

由图 13 可见，鸡矢藤缠绕茎不同部位的环髓带完整无缺口，和其顺时针缠绕或逆时针缠绕无关。



①顺时针缠绕茎



②逆时针缠绕茎

图 13 鸡矢藤茎切片

(4) 葎草

A、缠绕茎形态

葎（lù）草是小区花园里常见的藤蔓类植物，其叶子和牵牛花有点像，但叶瓣更多，目前我看到的都是顺时针缠绕，和牵牛花相反。



①顺时针缠绕茎

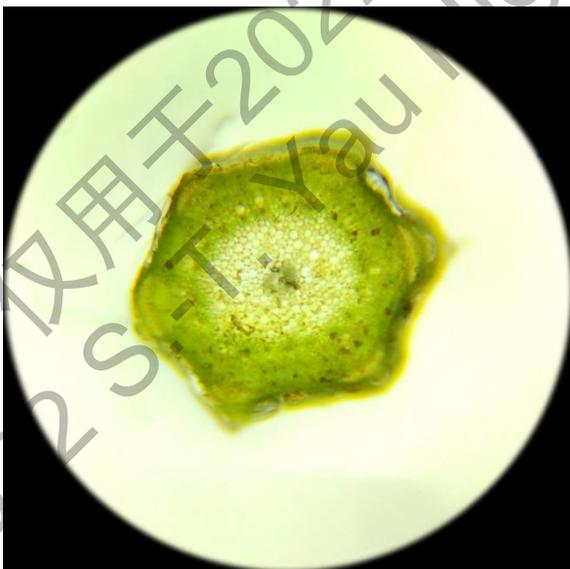


②沿地面爬行茎

图 14 葎草

B、显微观察

由图 15 可见，葎草缠绕茎不同部位的环髓带完整无缺口，只是外边近似六边形，而不是圆形。



①切片 1，物镜 4×目镜 16×



②切片 2，物镜 4×目镜 16×

图 15 葎草茎切片

(5) 缠绕茎特征小结

A、外观特征

藤蔓植物缠绕茎从外观上看，主茎和分支按一定方向螺旋向上生长，不同品种藤蔓植物的旋向可能不同，本文观察到的牵牛花和扁豆的缠绕茎均呈逆时针螺旋生长，鸡矢藤则顺、逆都有。我猜这可能跟遗传因素有关。

B、显微特征

经过对不同部位的缠绕茎进行切片观察，我发现其内部结构和教科书上描述的基本一致，都有表皮、皮层、环髓带、髓、维管束等结构。从对称性的角度看，它们都呈中心对称状，本文称之为藤蔓植物的**对称茎**。

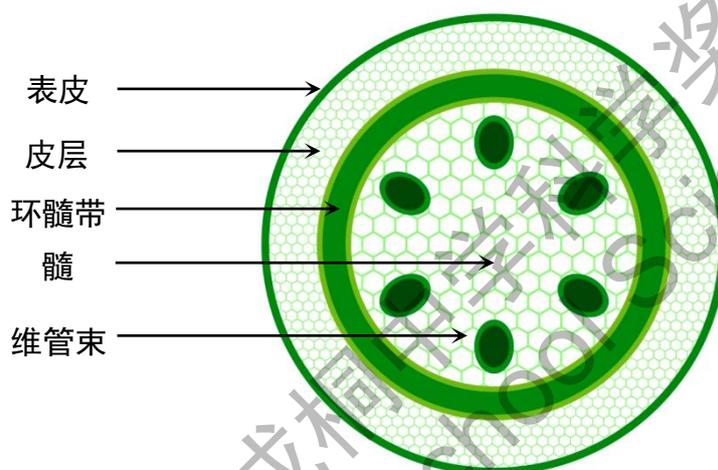


图 16 藤蔓植物对称茎横切面示意图

至于缠绕茎的成因，根据生物课上学到的知识，在植物的向光性、向地性和向触性的影响下，茎生长时生长素分布不均，使得茎外侧细胞分裂得快于内侧，从而让茎可以围绕着攀援物螺旋生长。

3、观察卷须形态

在三个生长季，我在北京先后种植了葫芦、南瓜、黄瓜、葡萄，利用假期时间回老家郑州，还观察了奶奶种的丝瓜和冬瓜。在小区绿化地里，我还观察了有卷须的乌薹梅和五叶地锦。上述这些藤蔓植物都有能打旋儿的卷须，但细看又有所不同，卷须数量最多的是葫芦，最另类的是葡萄、乌薹梅和五叶地锦，下面分别进行讨论。

(1) 葫芦

A、卷须形态

在本文观察的藤蔓植物里，葫芦植株较多，再加上每株葫芦的卷须数量较多，方便统计规律，所以接下来重点观测葫芦卷须的形态。如图 18 所示，葫芦卷须生长在主茎的侧部，比主茎细，一组卷须包含两个分支，两分支粗细可能相同，也可能不同，卷须上没有叶子。



① 葫芦



② 南瓜



③ 黄瓜



④ 丝瓜



⑤ 冬瓜



⑥ 葡萄

图 17 本文研究的有卷须藤蔓植物



图 18 一组葫芦卷须

B、卷须螺旋生长

葫芦卷须刚长出来时都是直的，只有顶端貌似有个小勾，并非一长出来就带螺旋，如图 19 所示。



图 19 顶端有小勾的直卷须

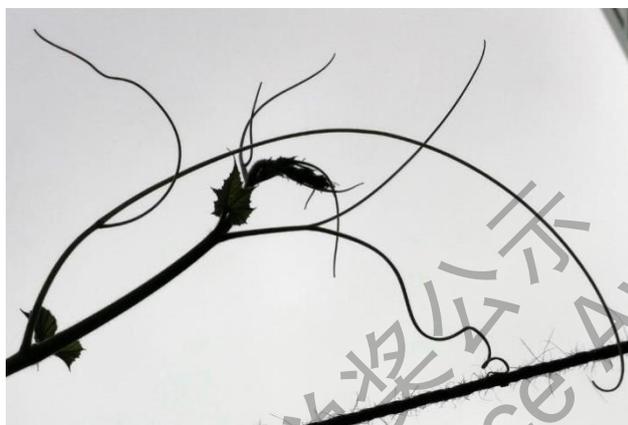


图 20 卷须顶端勾住物体

当卷须顶端的小勾碰到可以攀援的物体时（比如支架、绳子等），就会勾住物体，并沿着物体旋转几圈固定牢，此时卷须大部分还处于松弛状态（如图 20 所示）。然后卷须中部逐渐隆起，形成一个“关节”状部位，我给它起个名字叫“旋转关节”（如图 21 所示）。旋转关节有大有小、有长有短，我猜这和卷须本体的长短粗细有关。在旋转关节形成后，就开始绕着卷须轴向旋转，并带动卷须形成若干螺旋。图 21 箭头所指是个较长的旋转关节，带动该支卷须形成两节螺旋，或称两个旋儿。图 22 有两个短旋转关节，从卷须顶端向根部看去，一个顺时针旋转，一个逆时针旋转。

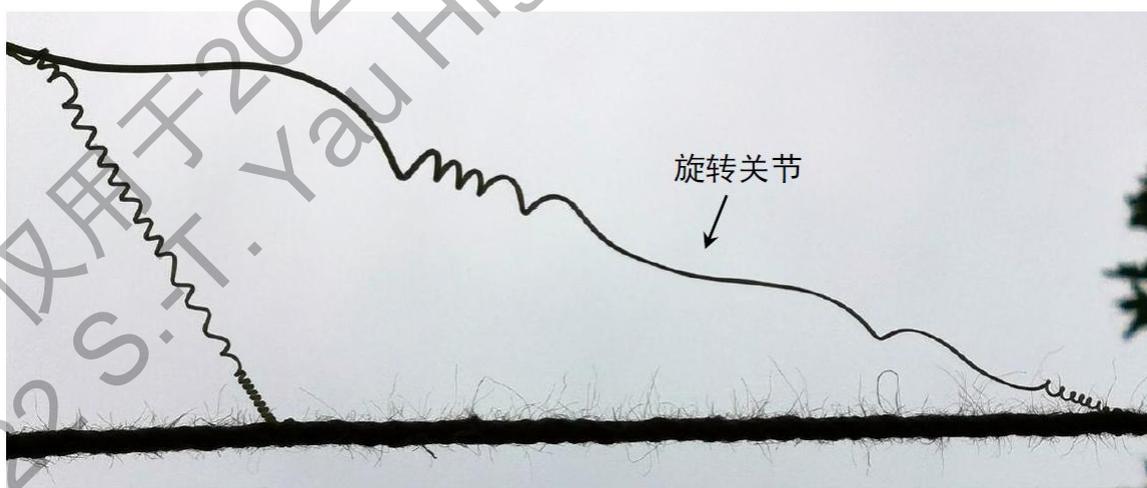


图 21 旋转关节

一段螺旋本文称之为—“节”。一支卷须上如果有一个旋转关节，就会把这支卷须分成两节，每一节就是一段螺旋（或称一个旋儿），而且两个旋儿的旋向相反。如果一支卷须上有两个旋转关节，就会把这支卷须分成三

节，中间一节的旋向和两侧的不同。一支卷须上如果有两个或两个以上的旋转关节时，其旋向交错排列，如图 22 和图 23 所示。



图 22 关节旋转方向



图 23 两节卷须和三节卷须

旋转关节更多时，以此类推。图 24 中下方的卷须有三个旋转关节，分四小节。我最多见过一支卷须上有四个旋转关节，分五小节。



图 24 有三个旋转关节的卷须

由图 25 还可见，从卷须根部向外数，第一节的旋向和第一关节的旋向一致，要么都为顺时针，要么都为逆时针；后面的节和关节的旋向逐次顺逆交错。

通过观察我还发现，如果一支卷须上有多于一个旋转关节时，各个关节有时是同时开始旋转的，有时则有先后（尤其是有三个或以上关节时），各小节旋向交错排列。卷须打旋儿的过程短则几个小时，长则几天。必须仔细地、持之以恒地观察，才能看清这个过程。在图 26 所示的卷须打旋儿过程中，照片①和②相隔约 12 个小时，照片③和④相隔约 36 个小时。



图 25 交错旋转的旋转关节

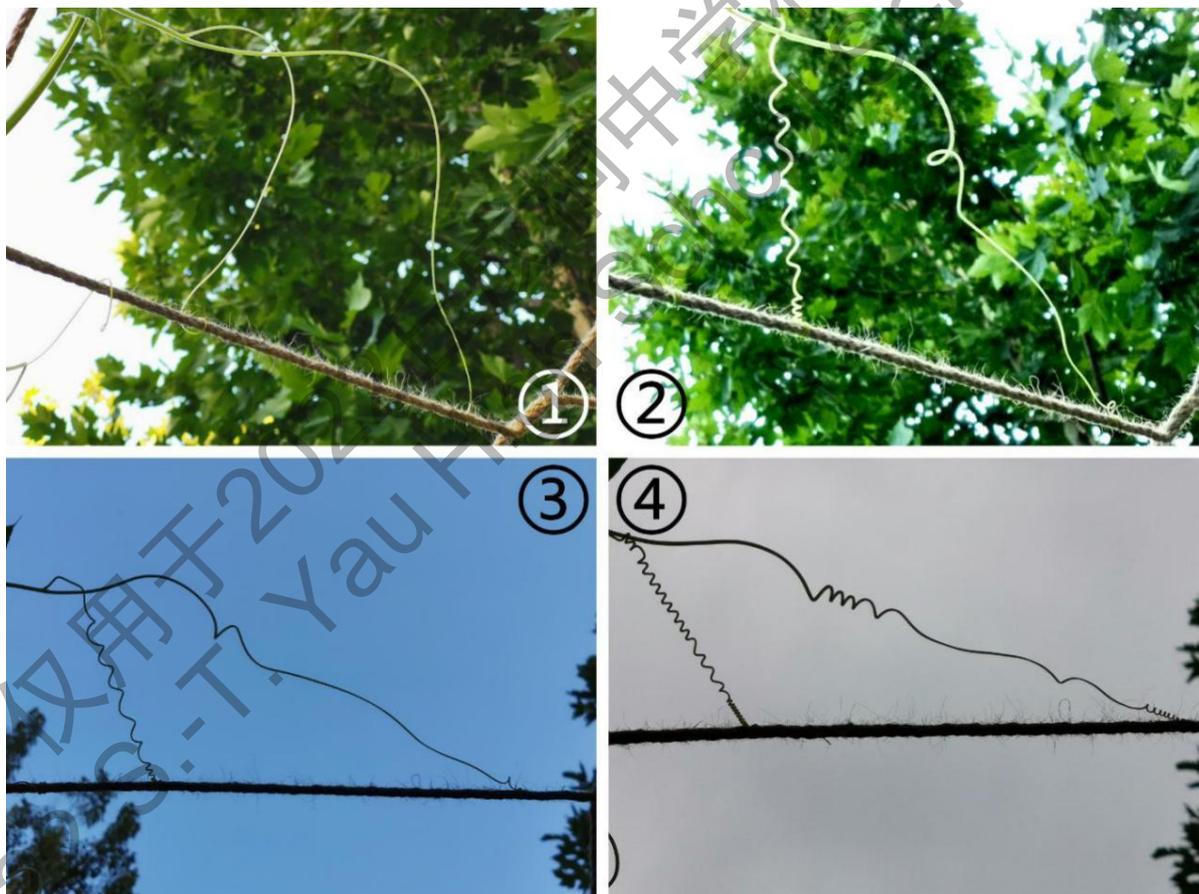


图 26 葫芦卷须打旋儿过程

为了更清楚地记录卷须的螺旋生长，我在老师的指导下买来了图 27 所示的延时摄影开关，并用这个开关和佳能 EOS 7D 数码相机搭配拍摄了葫芦卷须的打旋过程。图 29 展示了部分延时摄影照片，前后累计用时近 19 小

时。由图可见卷须旋转关节的发动作用和螺旋生长过程。



图 27 延时摄影开关

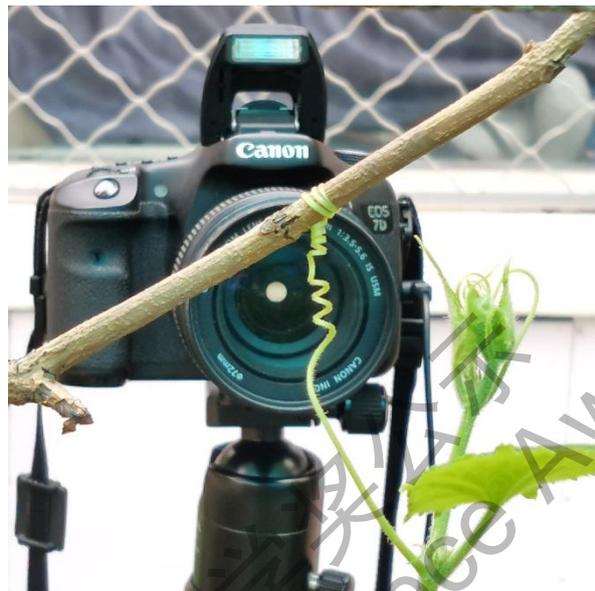


图 28 延时拍摄场景

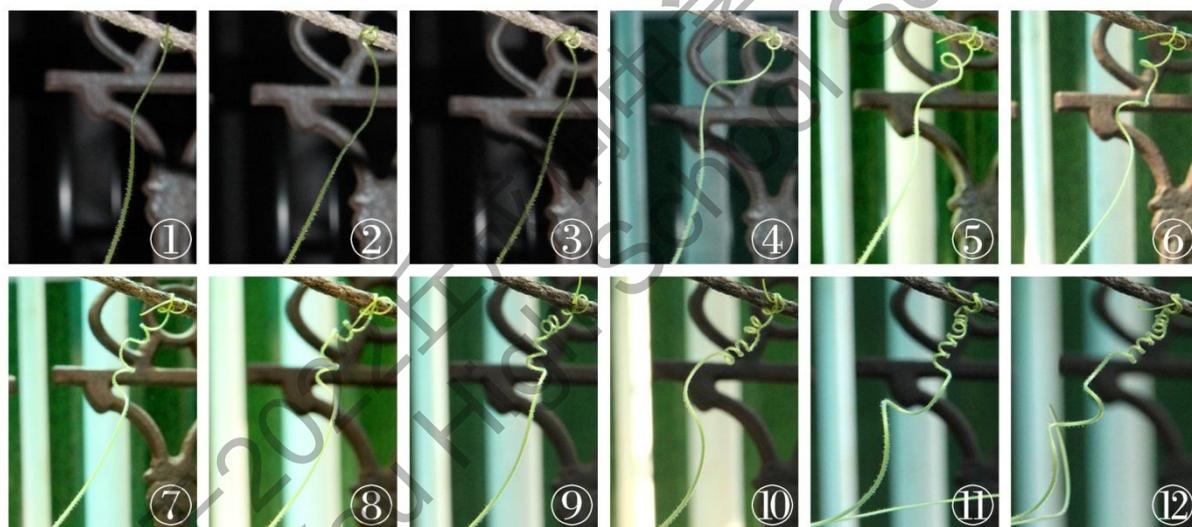


图 29 葫芦卷须螺旋生长的延时照片^[注]

综上所述，卷须的螺旋生长是由顶端的向触性引发，顶端固定后，中部逐渐螺旋拉紧，从而固定植株位置。所谓向触性，是指植物因接触刺激而引起的有方向的生长运动。通过观察可以知道，卷须螺旋生长与植物的向光性、向地性、向水性等其它向性生长无关；并且，卷须无论白天还是晚上都可以螺旋生长。

C、卷须螺旋方向

实际观察一组卷须的螺旋方向时，我有趣地发现，只要两个分支都打

[注] 延时摄影实拍间隔为 2 分钟，这里抽取的 12 张照片的时间间隔为 80 分钟。

旋儿了，那么它们的旋向各种可能都有，即“顺逆”、“顺顺”、“逆逆”都有，如图 30 所示。在这里，就不区分一组卷须内两个分支的左右了，即“顺逆”和“逆顺”归为一种情况，因为只是观察角度不一样。由于大部分卷须的两个分支粗细有别，也有一小部分粗细相等，接下来的观察会记录分支的相对粗细情况。



图 30 三种螺旋组合

D、显微观察

为了进一步观察卷须的微观结构，找寻其螺旋生长的底层逻辑，下面运用光学显微镜对卷须横切片进行观察。我发现：卷须髓细胞一般看起来都比皮层细胞大，环髓带完整时，可把髓细胞和皮层细胞完全分隔开来；环髓带如果有缺口，中央髓细胞就会向外溢出，挤占皮层细胞的位置生长；环髓带缺口越大，溢出生长的髓细胞就越多。

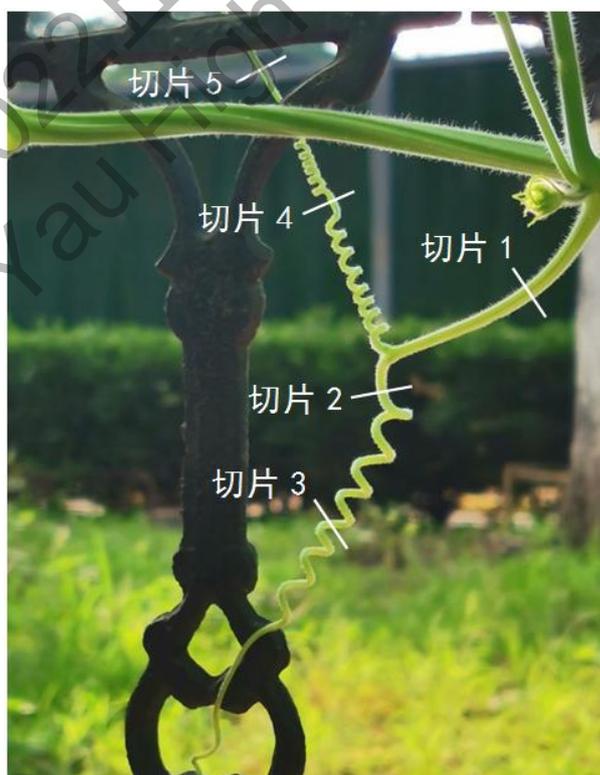


图 31 葫芦卷须切片位置



①切片 1, 物镜 4× 目镜 10×



②切片 2, 物镜 4× 目镜 10×



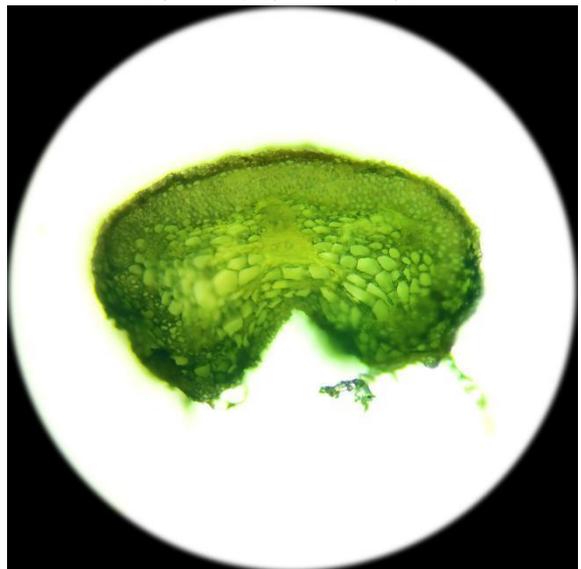
③切片 2, 物镜 10× 目镜 16×



④切片 3, 物镜 4× 目镜 10×



⑤切片 4, 物镜 10× 目镜 10×



⑥切片 5, 物镜 10× 目镜 10×

图 32 葫芦卷须切片

图 31 标出了接下来所观察葫芦卷须切片的具体位置，切片 1 取自葫芦卷须的根部，直径约 3mm，切片 2 和 3 取自卷须的一个分支，切片 4 和 5 取自另一个分支，分支根部直径约 2mm，顶端直径约 1mm。

由图 32 可见，葫芦卷须根部和分支的切面结构明显不同，卷须根部切面结构基本呈中心对称状，中心髓腔周围有五个深绿色的维管束，环髓带完整没有缺口，较大的髓细胞和较小的皮层细胞被分隔开了；而在卷须分支部分，切面呈现出不对称的结构，原因在于环髓带不再完整，在一个较大的缺口处，明显可见较大的髓细胞外溢生长，挤占了一部分较小皮层细胞的位置，而这个位置正是卷须螺旋生长较快的外侧。

(2) 南瓜

A、卷须形态

南瓜卷须相较于葫芦卷须来说，最大的区别是卷须分支更多，一般都超过两个，在 3~6 之间，每个分支独立螺旋生长，互不相干；其次是南瓜卷须比葫芦卷须略粗 0.5~1mm，卷须上有明显的纵向绿筋；卷须刚萌发出来时是卷在一起的，而卷须长大后的螺旋形态和葫芦卷须一致。



①卷须萌发



②开花结果



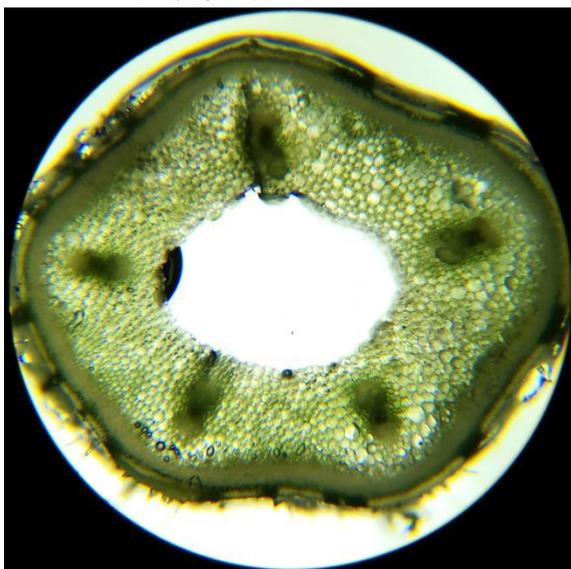
③卷须分支独立螺旋生长



④卷须有明显绿筋

图 33 南瓜卷须

B、显微观察



①切片1, 物镜4×目镜10×



②切片1, 物镜10×目镜16×



③切片2, 物镜4×目镜16×



④切片2, 物镜10×目镜10×



⑤切片3, 物镜4×目镜16×



⑥切片4, 物镜4×目镜16×

图34 南瓜卷须切片

如图 33④所示，切片 1 取自卷须根部，切片 2 取自较粗分支，切片 3 和 4 取自另两个分支。由图 34①可见，南瓜卷须根部也呈中心对称，环髓带完整，只是髓腔更大，深色维管束分布在髓腔周围；卷须分支的环髓带有较多缺口，其中有一个缺口最大，髓细胞溢出生长最多，几乎冲断了较小的皮层细胞段。该位置向中央凹陷，同样处于卷须螺旋生长较快的外侧。

(3) 黄瓜

A、卷须形态



①刚萌发伸展出的卷须



②开花

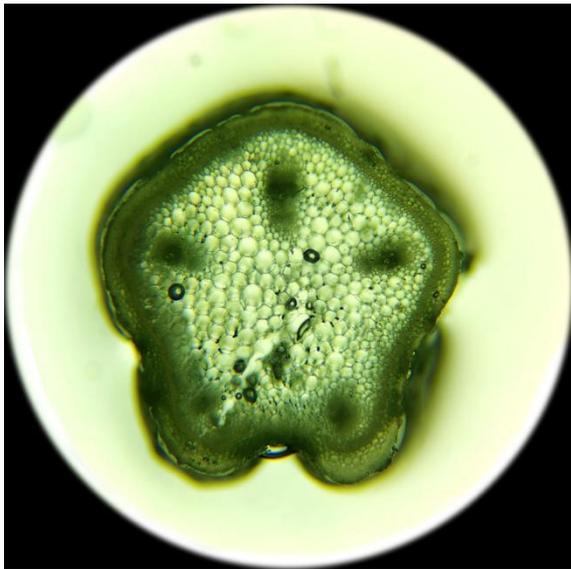


③正在螺旋生长的卷须



④切片位置

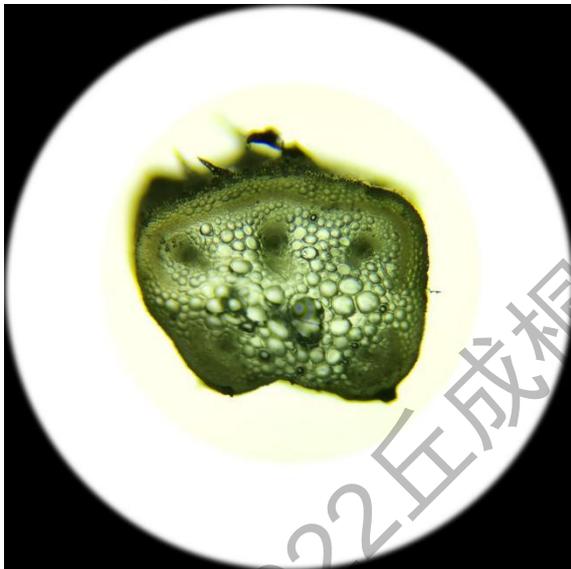
图 35 黄瓜卷须



①切片 1, 物镜 4×目镜 16×



②切片 2, 物镜 4×目镜 16×



③切片 3, 物镜 4×目镜 16×



④切片 4, 物镜 10×目镜 10×



⑤切片 5, 物镜 10×目镜 16×



⑥切片 6, 物镜 10×目镜 16×

图 36 黄瓜卷须切片

黄瓜卷须没有分支，只有一支主茎。卷须刚萌发出来时和南瓜一样也是团在一起，边生长边伸展，所以能看到图 35①所示的平面螺旋现象。螺旋生长起点大约在卷须根部向上 $1/3 \sim 1/2$ 处，即图 35④切片 3 所示的位置。

B、显微观察

由图 36①可见，在黄瓜卷须的根部，环髓带虽然也有缺口，但髓细胞溢出不明显，基本呈中心对称状。越往上缺口越大，溢出生长的髓细胞越多。螺旋卷须外侧共同的特征是：大个的细胞多，表皮略带凹陷。



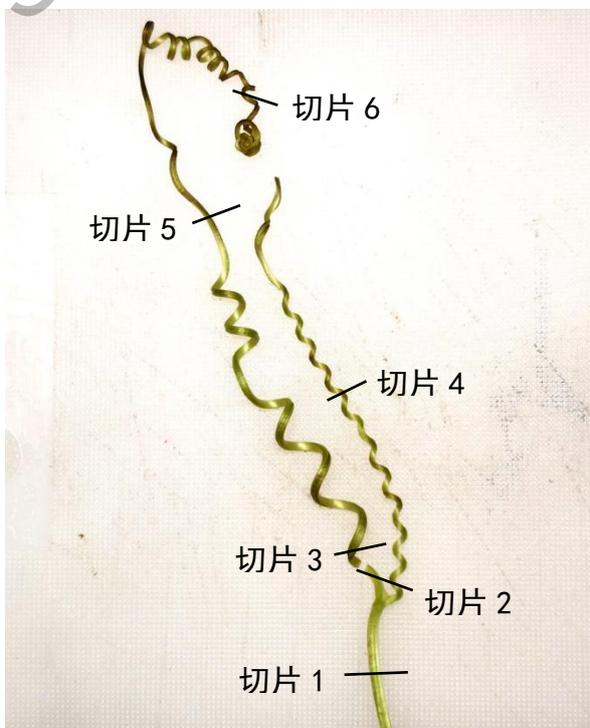
①刚萌发出的丝瓜卷须



②多分支螺旋



③正在螺旋生长的卷须



④切片位置

图 37 丝瓜卷须

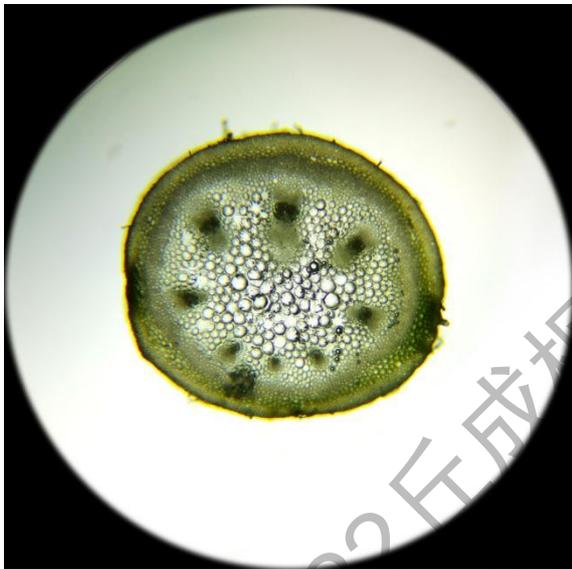
(4) 丝瓜

A、卷须形态

丝瓜卷须和南瓜类似，有多个分支，一般为2~6支，不同处是卷须刚萌发出时是直的（如图37①所示）。卷须各分支独立螺旋生长，规律和葫芦卷须类似。

B、显微观察

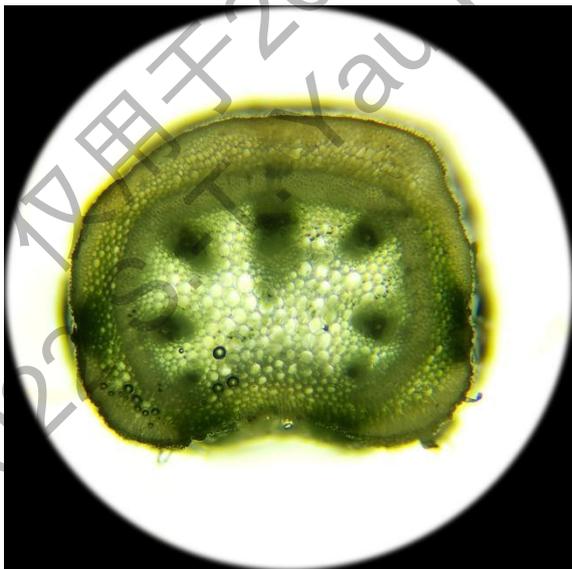
丝瓜卷须横切面显微特征和前面类似。值得一提的是，图38切片5和切片6取自卷须未螺旋的直段，可以看出其相对两侧大个细胞的数目相当，细胞的对称生长致使卷须没有发生螺旋。



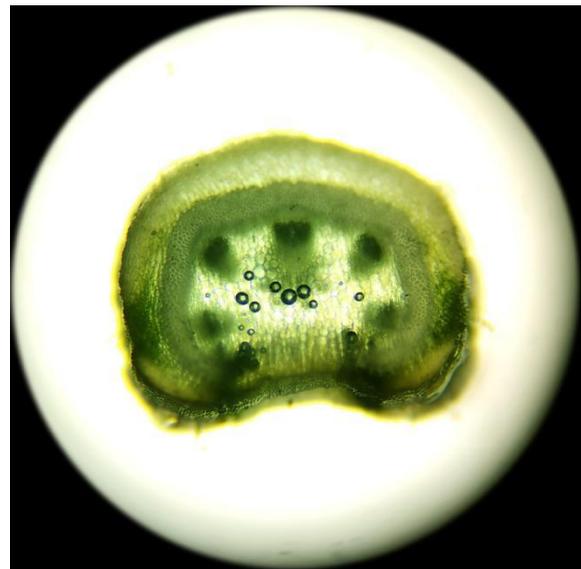
①切片 1，物镜 4×目镜 10×



②切片 2，物镜 4×目镜 10×

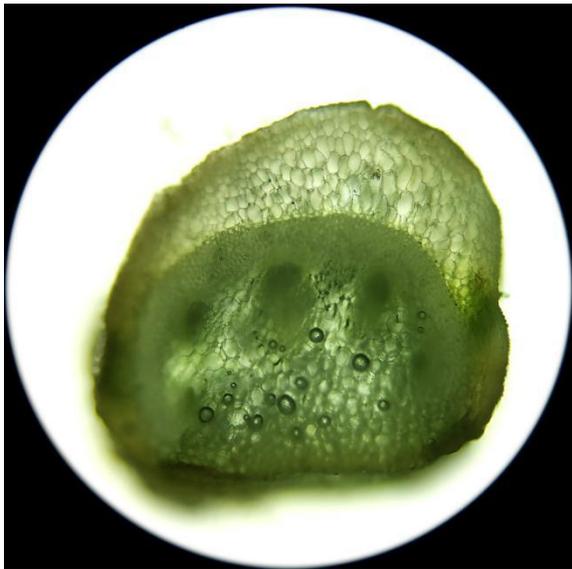


③切片 3，物镜 4×目镜 16×



④切片 4，物镜 4×目镜 16×

图 38 丝瓜卷须切片



⑤切片 5, 物镜 10×目镜 10×



⑥切片 6, 物镜 10×目镜 10×

图 38 丝瓜卷须切片 (续)

(5) 冬瓜

A、卷须形态



①冬瓜开花结果



②多支螺旋



③平面螺旋的卷须



④一个分支枯萎

图 39 冬瓜卷须

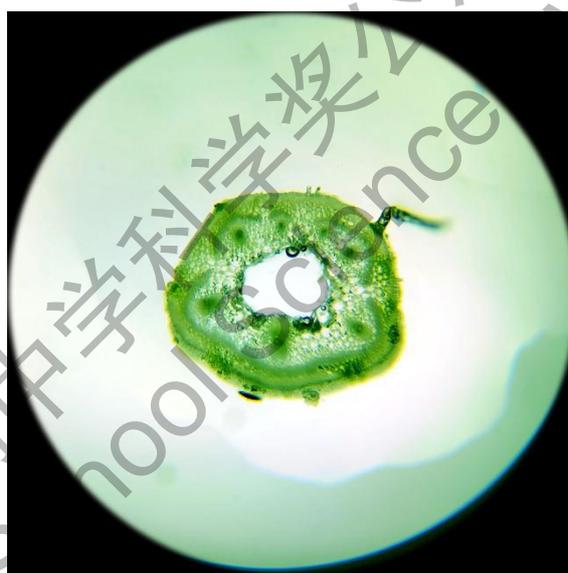
冬瓜卷须形态上像是黄瓜卷须和葫芦卷须的结合，开黄花、卷须团成一团萌发像黄瓜，有两个分支分别进行螺旋生长像葫芦。图 39③是平面螺旋的卷须，图 39④是有一个分支已经枯萎的卷须。

B、显微观察

冬瓜卷须根部髓细胞的位置处有气腔，环髓带虽有缺口，但基本呈中心对称状，髓细胞无明显偏向一侧的溢出，可认为是对称茎。两个分支的不对称性就比较明显，环髓带缺口较大，髓细胞溢出明显，可认为是不对称茎。



① 切片位置



②切片 1，物镜 4×目镜 10×



③切片 2，物镜 4×目镜 16×



④切片 3，物镜 4×目镜 16×

图 40 冬瓜卷须切片

(6) 葡萄

A、卷须形态

葡萄卷须和叶子对生，也就是在主茎的同一位置上长出卷须和叶子，如图 41②所示。其形态与上述藤蔓植物的卷须明显不一样，分支有 1~3 个，我给它们命名为 I 型、Y 型和双 Y 型，卷须根部和分支看起来都浑圆，没有向某一侧的凹陷。当卷须分支碰到一个物体时，会就地弯曲缠绕，而不是像葫芦卷须那样顶端先缠绕、中间再螺旋拉紧。但如果恰巧是顶端先碰到物体、中间部分悬空，也会像葫芦卷须那样螺旋生长，如图 42①所示。



① 刚萌发出来的卷须



② Y型和双Y型卷须



③ Y型和I型卷须

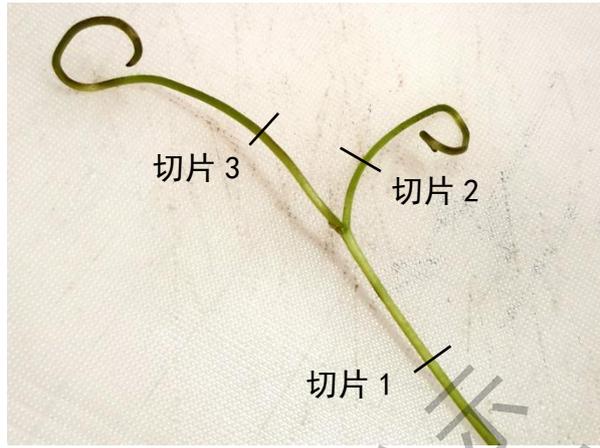


④ 平面螺旋

图 41 葡萄卷须



⑤ 缠绕着绳子的卷须



⑥ 切片位置

图 41 葡萄卷须 (续)



① 顶端先固定的葡萄卷须



② 葡萄卷须和葫芦卷须绕绳对比



图 42 葡萄卷须和葫芦卷须形态

图 42②给出了葡萄卷须和葫芦卷须缠绕绳子时的对比图，由图可见二者缠绕机制的不同：葡萄卷须是从分支中部碰到绳子开始，顶端绕着绳子沿一个方向一圈圈缠紧；葫芦卷须一开始是平行于绳子，顶端抓住绳子后，由中间的旋转关节发起缠绕，旋转关节两侧卷须的螺旋方向相反。

葡萄卷须可较长时间保持绿色，以后会逐渐干枯木质化。由图 42②和

图 43 可以看出，木质化后的葡萄卷须仍基本定型，并保持较强的束缚力，不像图 44 所示的卷须一干枯就萎缩得厉害并不再有束缚力。我想，这可能跟葡萄是多年生藤本植物而前述其它植物是一年生藤本植物有关。

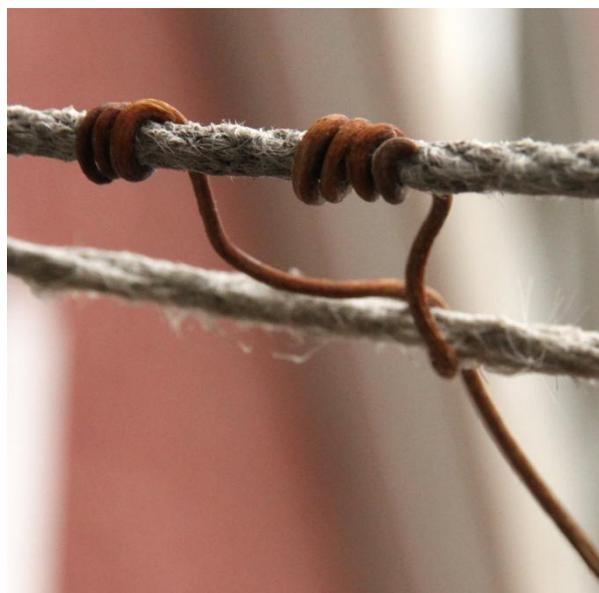


图 43 木质化后的葡萄卷须



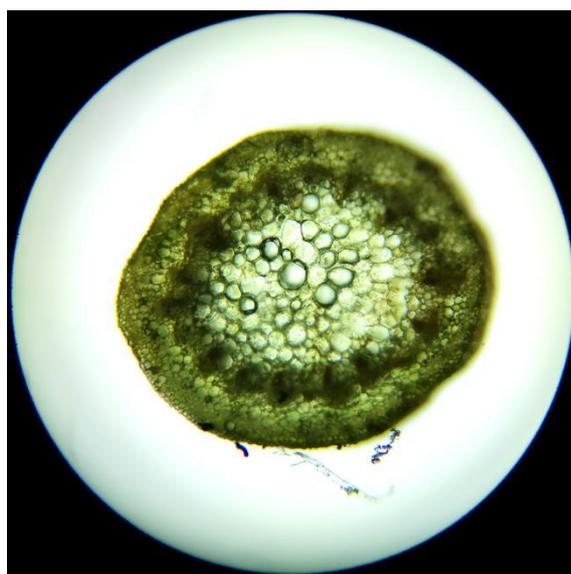
图 44 枯萎的葫芦卷须和黄瓜卷须

B、显微观察

取一个 Y 型卷须，切片 1~3 的位置如图 40⑥所示，切片 4 取自另一个已木质化的卷须。由图 45 可见，葡萄卷须无论根部还是分支，环髓带都比较完整，没有髓细胞溢出生长，卷须弯曲处仅靠皮层细胞的生长来控制，这是和前面各卷须的最大区别。图 45④中间的环形厚层是由环髓带中的木质部增生而来，中央髓细胞相应地萎缩了不少。

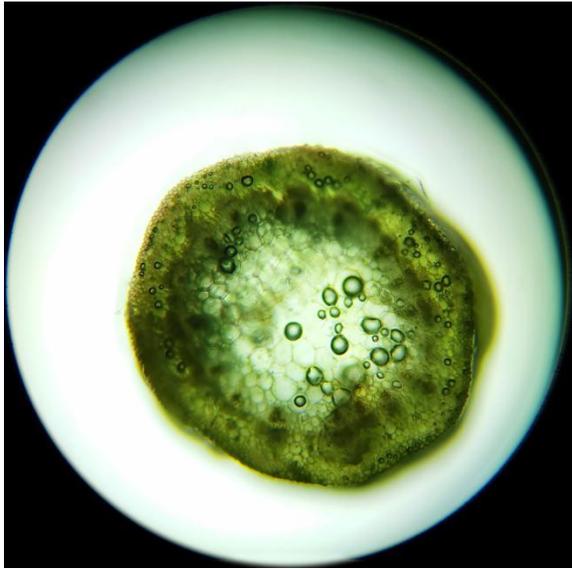


①切片 1，物镜 10×目镜 10×



②切片 2，物镜 10×目镜 10×

图 45 葡萄卷须切片



③ 切片 3, 物镜 10×目镜 10×

④切片 4, 物镜 10×目镜 10×

图 45 葡萄卷须切片 (续)

(7) 乌葭梅

A、卷须形态

乌葭梅是葡萄科植物，其卷须与葡萄类似，须茎浑圆，形态上似“⊥”形，为便于说明，可将乌葭梅卷须的三段命名为 A、B、C 三部分，如图 46 ①所示。其中 A、B 为主须，茎较粗；C 为分支，茎较细。A、B、C 三段处处可由向触性激发螺旋生长。当 B 段顶端抓住某物后，可引发 A、B 两段的合并螺旋生长。当 C 段顶端抓住某物后，可引发 C 段的螺旋生长。若中间节点被某物卡住固定，则 A、B、C 三段均可独立螺旋生长。



① “⊥”形卷须

② 卷须

图 46 乌葭梅卷须



③ A、B 两段合并螺旋生长



④几个卷须缠在一起

图 46 乌蕊梅卷须 (续)

B、显微观察

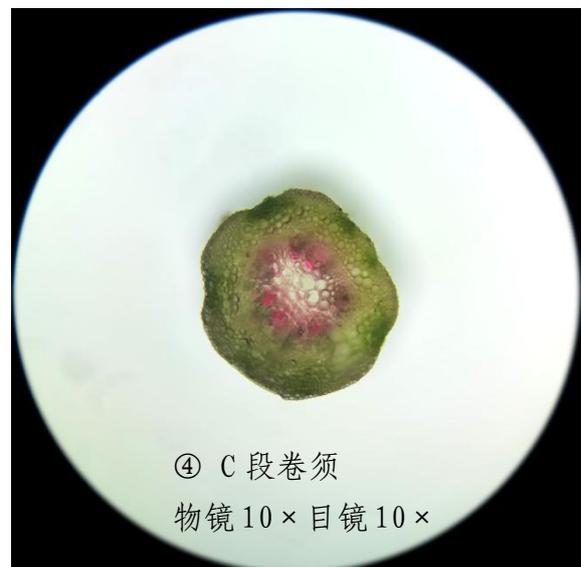
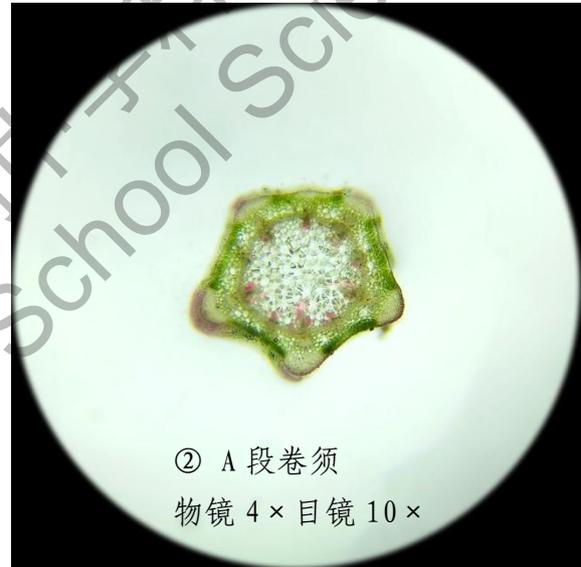
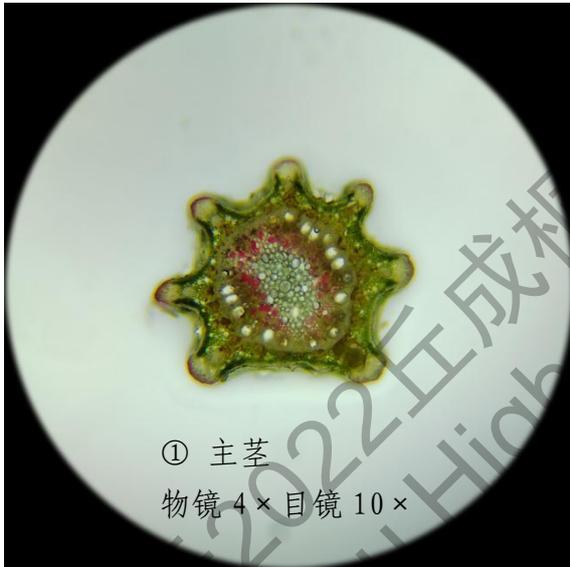


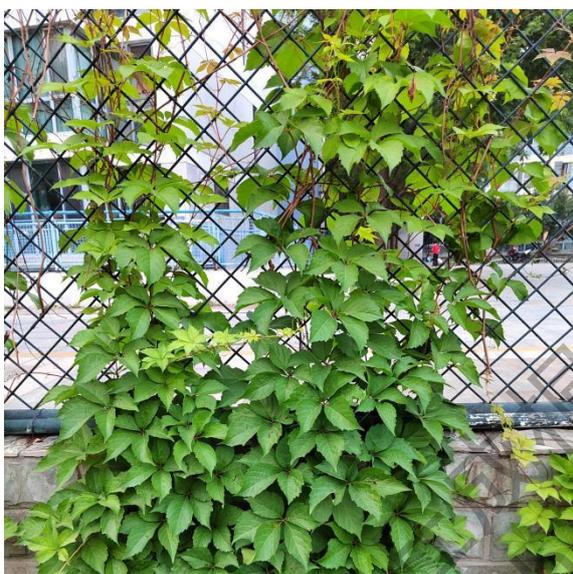
图 47 乌蕊梅主茎和卷须切片

由图 47 可见，乌葭梅主茎和卷须的环髓带都很完整，符合前文对称茎的定义，和葡萄类似。

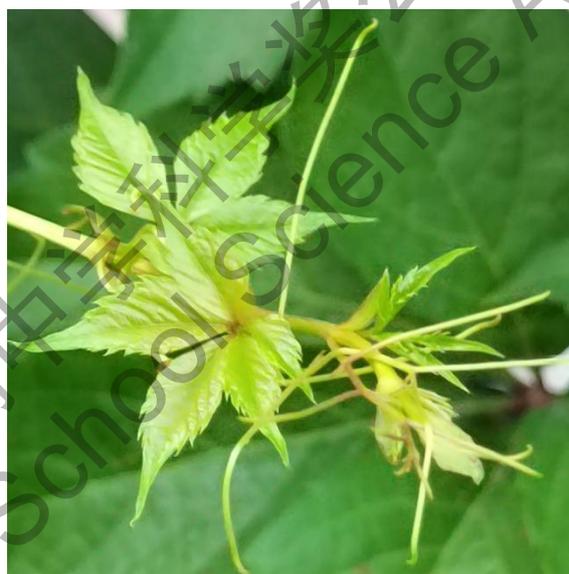
(8) 五叶地锦

A、卷须形态

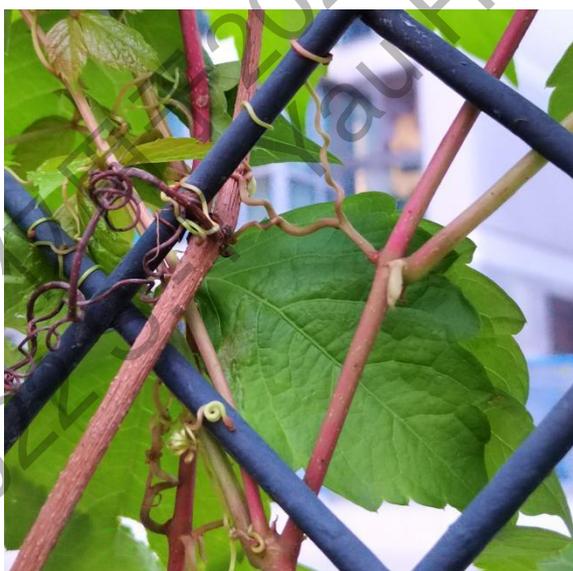
五叶地锦也是葡萄科藤蔓植物，又名爬墙虎，其卷须茎浑圆，分支较多，像是多级嵌套的“Y”形，层级多可达到 6 级。其卷须特征类似于葡萄、乌葭梅，卷须分支处处敏感，向触性使其卷须生长显得有些杂乱无章。



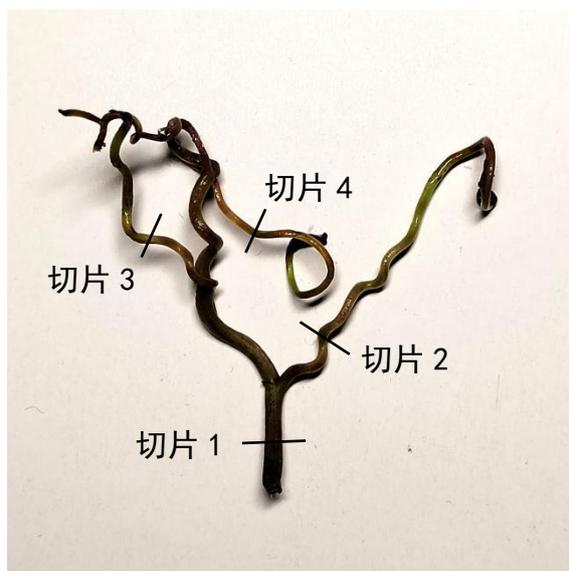
① 攀爬生长



② 爬藤末梢卷须



③ 卷须抓住物体

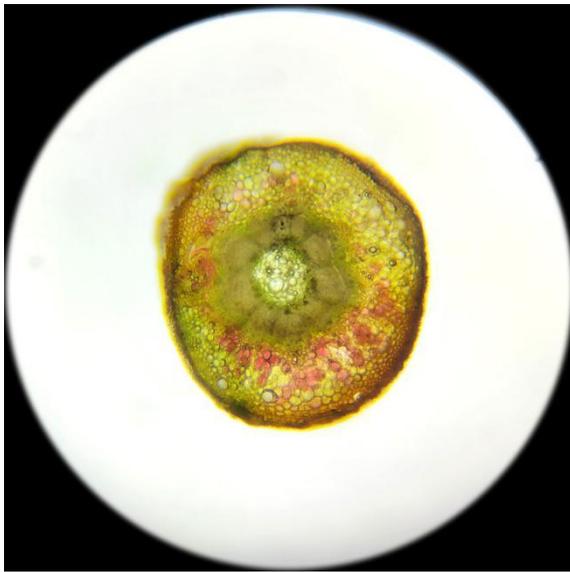


④ 切片位置

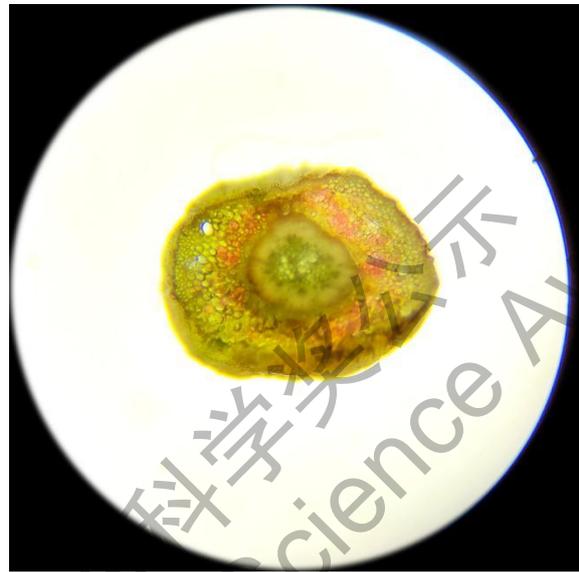
图 48 五叶地锦

B、显微观察

由图 49 可见，五叶地锦卷须不同位置切片的环髓带都很完整，符合前文对称茎的定义，和葡萄类似。



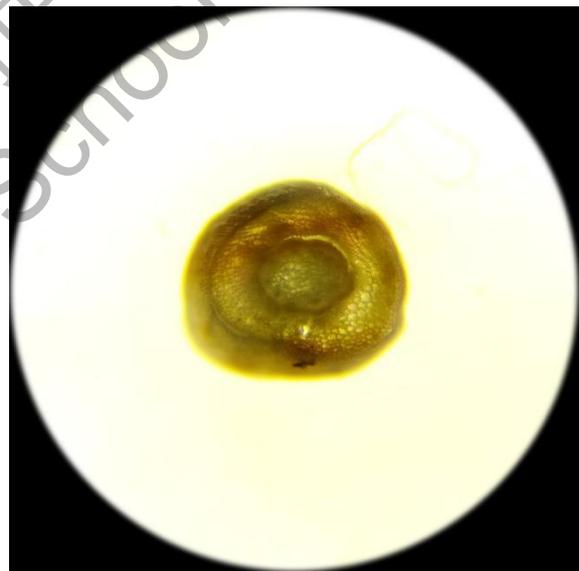
①切片 1，物镜 4×目镜 16×



②切片 2，物镜 4×目镜 16×



③切片 3，物镜 4×目镜 16×



④切片 4，物镜 10×目镜 10×

图 49 五叶地锦卷须切片

(9) 卷须特征小结

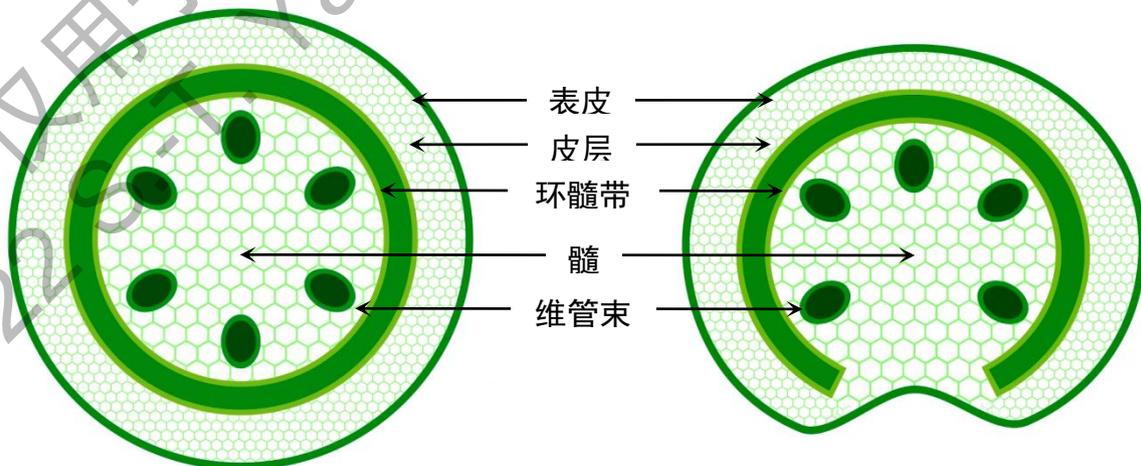
A、外观特征

表 1 卷须外观特征对比

名称	分支数	刚萌发时	形态	螺旋规律	向触性	木质化
葫芦	2	直	根部较粗 分支粗细 有别、略 扁	一般顶端 先固定后 其余分节 螺旋，顺逆 圈数相等	顶端敏感 其余位置 不敏感	无，易于 枯萎
南瓜	2~6	卷				
黄瓜	1	卷				
丝瓜	2~6	直				
冬瓜	2	卷				
葡萄	1~3	直	根部和分 支都浑圆	比较随意	卷须分支 处处敏感	有
乌薺梅	2	直	根部和分 支都浑圆	比较随意	卷须分支 处处敏感	未见到
五叶地锦	4~9	直	根部和分 支都浑圆	比较随意	卷须分支 处处敏感	有

B、显微特征

通过观察、对比和思考，我发现不同品种藤蔓植物茎和卷须还是有很多共性的，从对称性角度看，茎和卷须的基本结构可以分成两种：**对称茎**和**不对称茎**。对称茎横切面中的环髓带基本闭合，呈中心对称状；不对称茎横切面中的环髓带有明显缺口，不呈中心对称状（如图 50 所示）。图中髓细胞和皮层细胞的大小和分布只是示意，实际上细胞没这么均匀。维管束数量上，图中画了五、六个也是示意，实际上卷须有少则五个、多则二十多个维管束。不对称茎有明确的向某个方向的生长优势，对称茎则比较灵活。例如，图 50②中的不对称茎由于下方细胞生长快，卷须会向另一侧弯曲；图 50①中的对称茎则根据向触性来决定向某个方向弯曲。由此可见，细胞的不对称生长是卷须螺旋生长的一个底层逻辑。



① 对称茎

② 不对称茎

图 50 藤蔓植物茎和卷须的对称性分类

上述葫芦、南瓜、黄瓜等五种植物卷须特征可归纳为：卷须根部为对称茎，卷须分支为不对称茎，整体可称之“不对称茎”。而葡萄和乌薺梅的卷须特征可归纳为：卷须根部和分支部分均为对称茎，整体可称之“对称茎”。

4、探究卷须生长特点

(1) 不对称茎

下面以葫芦为例探究不对称茎生长特点。卷须形成螺旋前，一般是两端固定的。卷须根部不用说，是固定在主茎上；顶端小勾抓住一个物体（比如支架、绳子等）后，也就固定下来了。实际中也看到有顶端小勾没抓住物体，但小勾后面不远处缠绕抓住物体的情况，如图 51 所示。



图 51 葫芦卷须顶端小勾或小勾后面抓住物体



图 52 展示葫芦卷须分节圈数（两节、三节）



图 53 展示葫芦卷须分节圈数（四节、三节）

接下来在旋转关节带动下形成旋儿的过程中，我发现不管一支卷须上有几节，各节顺旋和逆旋的圈数刚好相等，如图 52、53 所示。这样，两端固定的卷须就不会拧着劲儿了。具体来说：

- 当一支卷须有一个旋转关节时，其左右两节的旋向相反，圈数相等；
- 当一支卷须有两个旋转关节时，卷须分为三节，中间一节的旋向和两侧的相反，两侧旋向相同，中间一节旋的圈数和两侧圈数之和相等；
- 当一支卷须有三个旋转关节时，卷须分为四节，相邻节的旋向相反，顺逆螺旋的总圈数相等。

旋转关节更多时，以此类推。

如果卷须的顶端没有碰到可以固定的物体，那么卷须一般情况下就保持直的状态。我也见过顶端没固定，但卷须打旋的情况，此时的旋儿一般只有一个，且没有旋转关节，我猜是风吹刺激引起打旋儿，如图 54①所示。也有顶端没固定却有两个旋儿的情况，此时仍然没有旋转关节，两个旋儿之间平滑过渡，各自旋儿的圈数没有关联，如图 54②所示。至于没有旋转关节的原因，我猜可能是由于卷须顶端没固定，卷须打起旋儿来不存在“拧着劲儿”的情况，所以旋起来比较随意。而卷须两端固定、有旋转关节时，是要确保顺时针和逆时针的圈数相等，互相抵消，才能确保不会拧着劲儿。

顶端是卷须的重要部位，仿佛起着指挥协调卷须生长的作用。顶端不仅包括卷须尖端的小勾，还包括小勾后面触觉敏感的一部分，如图 51 所示。此外，通过观察我还发现，葫芦每组卷须的两个分支是相对独立的，每个分支打旋儿与否、打旋儿的过程都互不影响。这一点在南瓜、丝瓜、冬瓜等多分支不对称茎上都能看出来。另外还能看出来：不对称茎上的表皮毛分布也呈不对称状，内侧少而外侧多（如图 55 所示）。



① 一个旋儿



② 两个旋儿

图 54 顶端没固定的卷须



图 55 一组螺旋卷须及其局部

用一句话概述不对称茎螺旋生长的特点，可以说：当一支卷须顶端固定后，它分节螺旋起来不会拧着劲儿。如果借用物理学上的力矩术语，则可以说：当一支卷须顶端固定后，无论其怎么分节螺旋，任一时刻该卷须的力矩总是平衡的。

在物理上，可转动物体达到平衡的一个条件是力矩平衡，即作用到物体上的力矩和为零，否则物体就处于不平衡状态，一直转动下去。生活中常见的力矩平衡例子是匀速行驶的汽车，其驱动轮上的动力矩和阻力矩大小相等、方向相反，达到平衡状态；把湿毛巾拧干过程中，两手施加的力矩也是大小相等、方向相反，达到平衡状态。

藤蔓植物卷须在两端固定后，无论中间怎么分节螺旋，始终处于力矩平衡状态，此时顺时针螺旋的总圈数等于逆时针螺旋的总圈数。这个规律可以称为卷须螺旋生长的力矩平衡原理，可算是卷须螺旋生长的另一个底层逻辑。

(2) 对称茎

对称茎分支上处处可体现出向触性，卷须弯折缠绕的规律性不如不对称茎强，主要的原则是碰到物体就尽力去缠绕，而不是顶端先固定，中间再螺旋拉紧。当然了，对称茎也不排除有顶端先固定、中间再拉紧这种情况，具体可参见前文对葡萄卷须和乌菟梅卷须的描述（如图 42①和图 46③所示）。总之，对称茎在缠绕、螺旋生长过程中同样遵守力矩平衡原理这个底层逻辑。

5、统计分析卷须螺旋生长的特征

(1) 葫芦卷须

在三个生长季，我共计拍摄记录了 210 组葫芦卷须，图 56 展示了部分实拍照片。葫芦卷须每组都有两个分支，每个分支有直的、打旋儿的、分节打旋儿的三种情况。在下面的统计中，节数为 0 表示该支卷须是直的，不打旋儿；节数为 1 表示由于卷须顶端没固定，不分节打一个旋儿；节数为 2 表示分两节，打两个旋儿；节数为 3 表示分三节，打三个旋儿；以此类推。

限于篇幅，不统计节数为 0 和 1 的情况。另外，由于拍照不全、枝叶遮挡等因素，没有数出来节数的情况也不统计。不同方向的旋儿之间一般都会会有一个旋转关节，当卷须顶端没固定时，两个旋儿之间也可能没有旋转关节。一组卷须内的两个分支，大部分有粗细之分，也有少数粗细相等。图表 1 至图表 5 给出了葫芦卷须的统计结果。

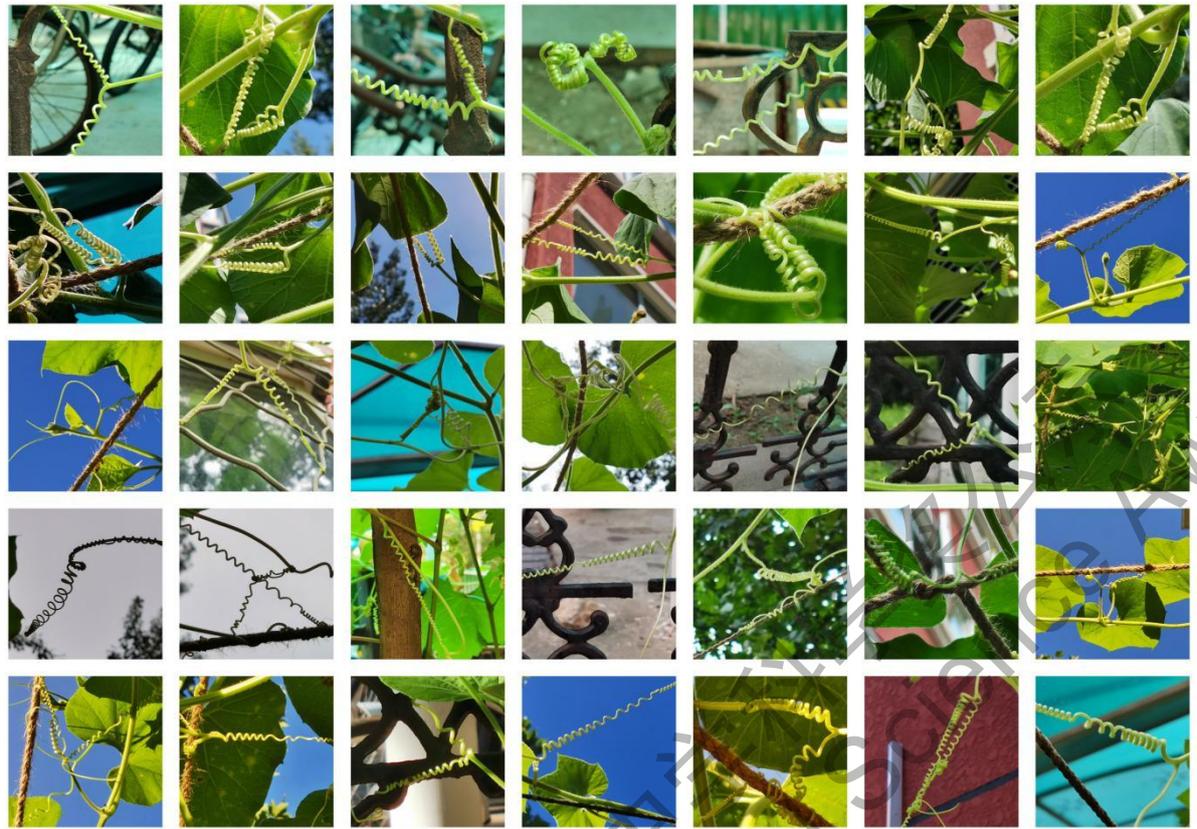
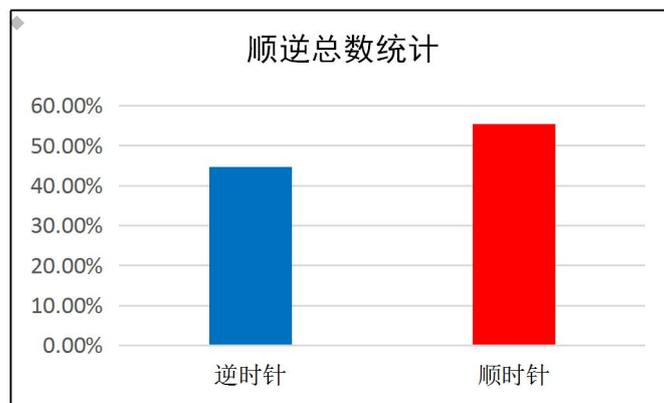


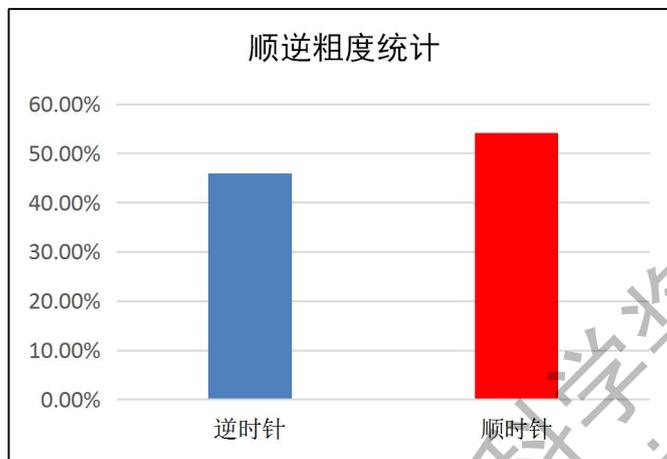
图 56 本文拍摄记录的部分葫芦卷须

总 数 统 计	螺旋方向	逆时针	顺时针
	样本数量	173	215
	占百分比	44.6%	55.4%



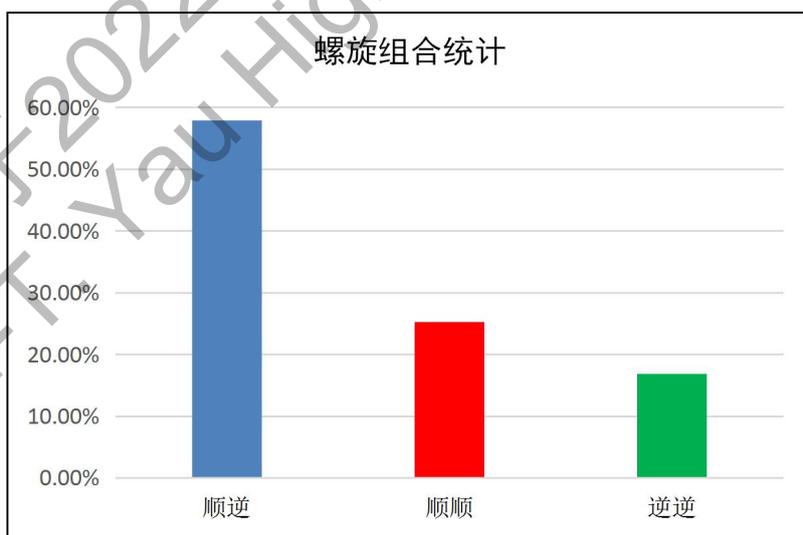
图表 1 葫芦卷须螺旋顺逆总数统计

粗 度 统 计	螺旋方向	逆时针	顺时针
	样本数量	85	100
	占百分比	45.9%	54.1%



图表 2 葫芦卷须顺逆粗度统计

螺 旋 组 合 数	螺旋组合	顺逆	顺顺	逆逆
	样本数量	106	46	31
	占百分比	57.9%	25.2%	16.9%

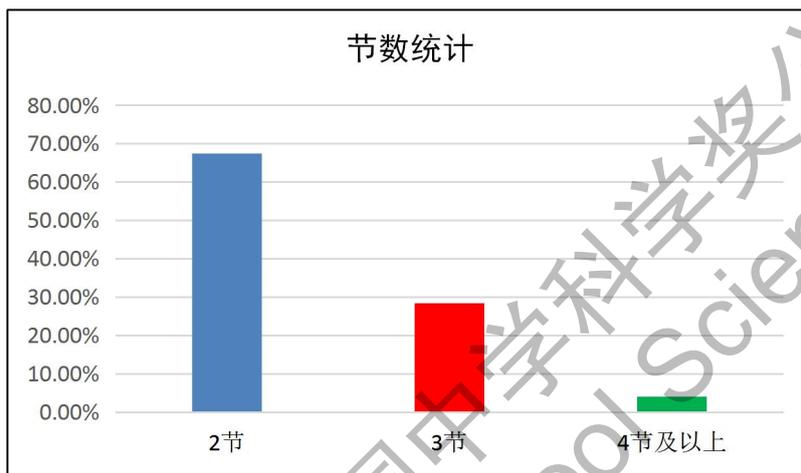


图表 3 葫芦卷须螺旋组合统计

由图表 1 至图表 5 可见，卷须螺旋方向从总数上看，顺时针多于逆时针一成；在顺逆的粗度上，还是顺时针粗的略多；在螺旋组合上，顺逆组

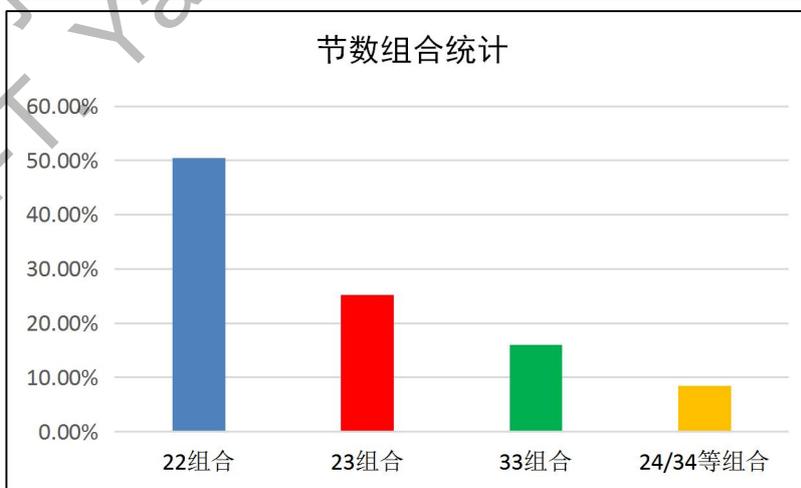
合占比超过一半，其次是顺顺组合；在节数上，2节占比超过三分之二，3节占比近三成；在节数组合上，有一半卷须都是22组合，23和33组合总数加起来占比超四成。

节数统计	节数	2	3	>3
	样本数量	216	91	13
	占百分比	67.5%	28.4%	4.1%



图表4 葫芦卷须卷须节数统计

节数组合数	节数组合	22	23	33	24/34等
	样本数量	66	33	21	11
	占百分比	50.4%	25.2%	16.0%	8.4%



图表5 葫芦卷须节数组合统计

(2) 黄瓜卷须

可能我家后院土质不适合种黄瓜，这几年黄瓜长势都不太理想，累计只拍摄记录到 40 个卷须，图 57 展示了部分实拍照片。图表 6 和图表 7 统计了黄瓜卷须顺逆个数以及节数。由图表可见，黄瓜卷须和葫芦卷须类似，也是顺时针略占优势；卷须以两节为主，比例占到了近八成。

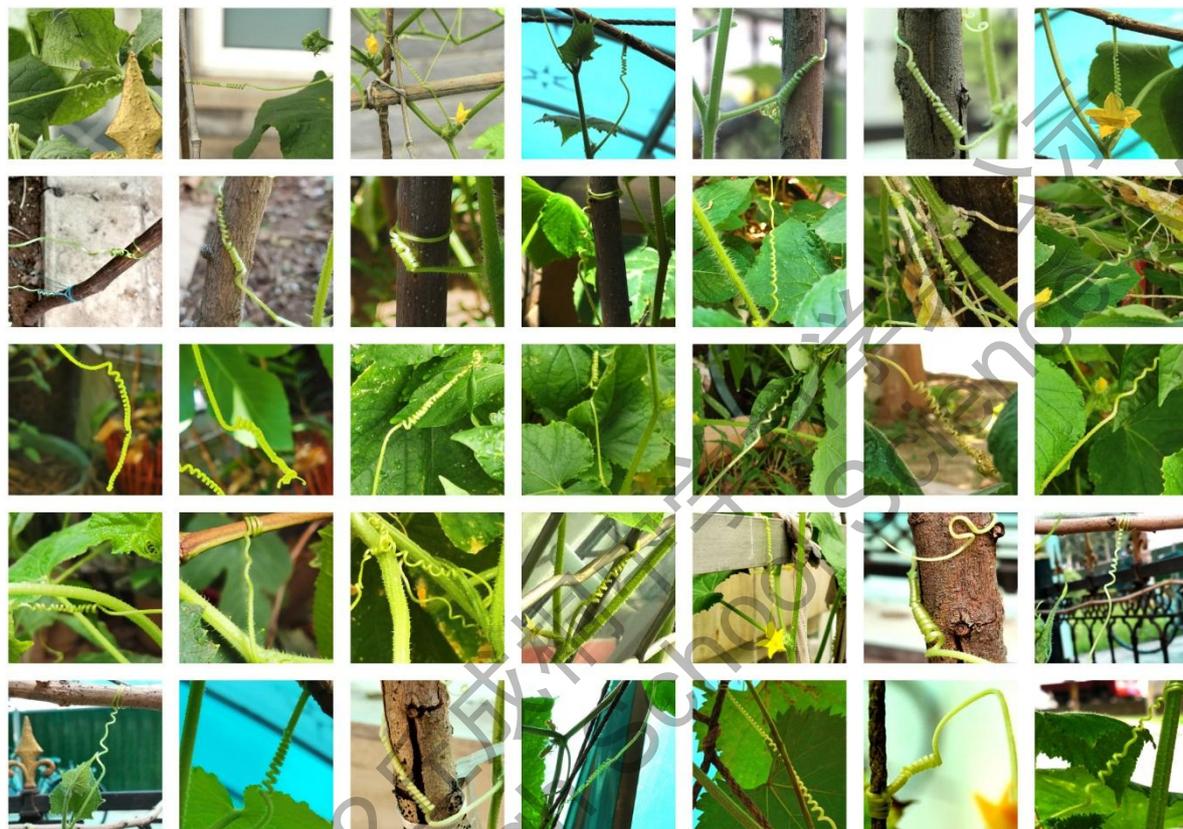
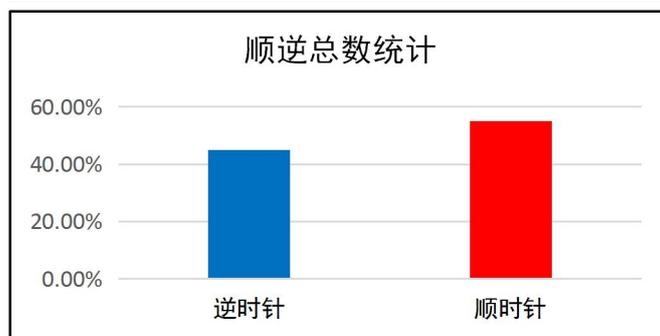


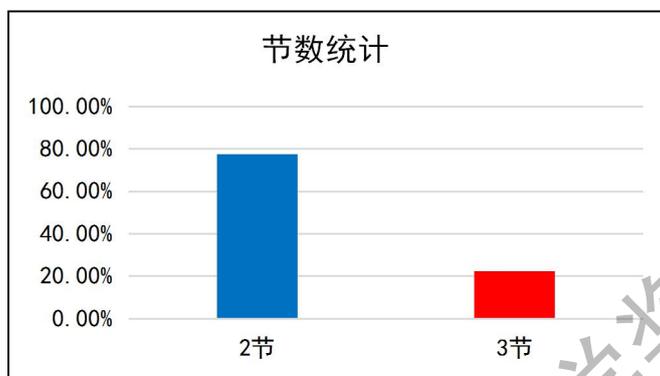
图 57 本文拍摄记录的部分黄瓜卷须

总 数 统 计	螺旋方向	逆时针	顺时针
	样本数量	18	22
	占百分比	45.0%	55.0%



图表 6 黄瓜卷须顺逆总数统计

节数统计	节数	2节	3节
	样本数量	31	9
	占百分比	77.5%	22.5%

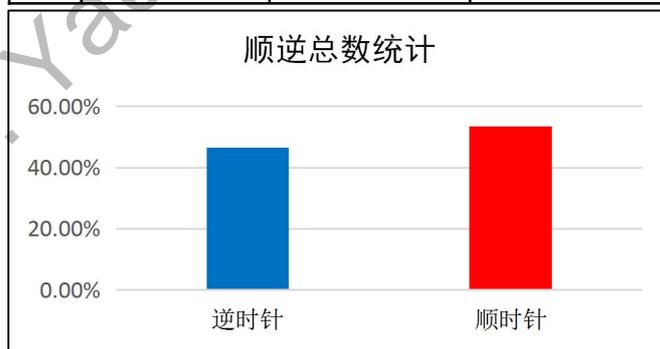


图表 7 黄瓜卷须节数统计

(3) 南瓜卷须

南瓜卷须较多，但悬空的和顶端未固定的也较多，下面仅简单统计一下顶端固定、已螺旋分支的顺逆比例。结果显示，顺时针比例为 53.5%，仍略占优势。

总数统计	螺旋方向	逆时针	顺时针
	样本数量	20	23
	占百分比	46.5%	53.5%



图表 8 南瓜卷须顺逆总数统计

综上所述，藤蔓植物卷须顺时针的螺旋要略多于逆时针，2 节数量占大多数，这直观上和我观察到的现象一致。至于这背后还有什么机理，有待以后进一步研究。

6、电子仿生建模

前面我观察了藤蔓植物茎和卷须螺旋生长的现象，统计了卷须螺旋生长的规律，至于其在生物学上是如何具体实现的，我还不是很清楚。但我学过生物、物理、科学，老师还介绍过仿生学原理，下面我试着用书本知识，对卷须的螺旋生长进行仿生建模。如果能建立一个模拟实现卷须功能的仿生学模型，也许就能一窥卷须生长的生物学奥秘。前文通过观察已把藤蔓植物卷须分为不对称茎和对称茎两类，葫芦、南瓜、黄瓜、丝瓜、冬瓜的卷须为不对称茎，葡萄和乌荻梅为对称茎。下面分别进行讨论。

(1) 不对称茎

对于不对称茎，我先给出三个推断和猜想：

第一，可能存在一个“控制器”。生物课上老师讲过植物的“顶端优势”，大意是指植物的主茎顶端生长占优势，同时抑制着它下面邻近的侧芽生长。我发现：卷须顶端不仅生长占优势，而且还起着关键的控制作用，卷须开始螺旋生长就是由顶端的向触性引发，如果一支卷须的顶端枯萎或折断了，那么整支卷须就不再生长发育。

第二，可能存在若干“传感器”。卷须上分布着大量的细小绒毛，像是触觉传感器一样能够感知周围环境。卷须尖端触觉最灵敏，当尖端碰到物体（比如支架、绳子等）时，就会尽量缠绕抓住该物体，然后“发号施令”，让旋转关节开始旋转，带动各节形成螺旋，拉紧整个卷须。中间灵敏度较弱，常常见到卷须尖端悬空的状态下，卷须中间碰到物体也不打旋。并且，当卷须开始打旋儿拉紧时，一定会直到完全拉紧才会停止打旋儿，我猜在卷须的维管束和环髓带中，可能有纵向的“筋”状传感器，可以感知张力大小。当卷须上的张力达到一定值，就不再打旋儿。另外，卷须各节旋儿的圈数一定满足顺逆总圈数相等，我猜卷须上应该还有力矩传感器，用来感知螺旋过程中是否拧着劲儿了。力矩传感器保证了一支卷须在螺旋生长过程中，无论分几节何时分节、无论怎么螺旋，总力矩始终保持平衡。

第三，可能存在一个“决策系统”。在卷须开始打旋儿时，有时没有旋转关节，有时有一个或多个旋转关节，我猜卷须内可能还有一个决策系统，根据卷须顶端固定与否、卷须的长短粗细等本体生物学指标来决定旋转关节的个数。当卷须顶端没有碰到物体、没有固定时，卷须一般不打旋儿；但当受到风的刺激时，可能会打旋，但没有旋转关节；当顶端抓住物体固定后，根据卷须长短粗细情况，决策要生成旋转关节的个数和位置，指挥卷须开始打旋儿。这个决策系统可能就位于控制器内。

第四，可能存在一个“执行系统”。执行系统可能包含“旋转关节发生器”和“螺旋卷须发生器”两个器官，前者负责生成和旋转关节，后者负责使分节的卷须产生螺旋，二者相互配合，共同完成卷须螺旋生长的过程。

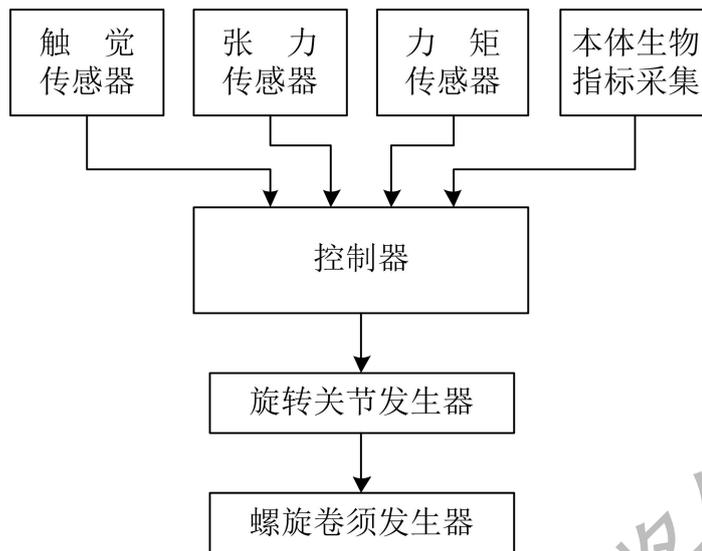


图 58 不对称茎螺旋生长仿生模型

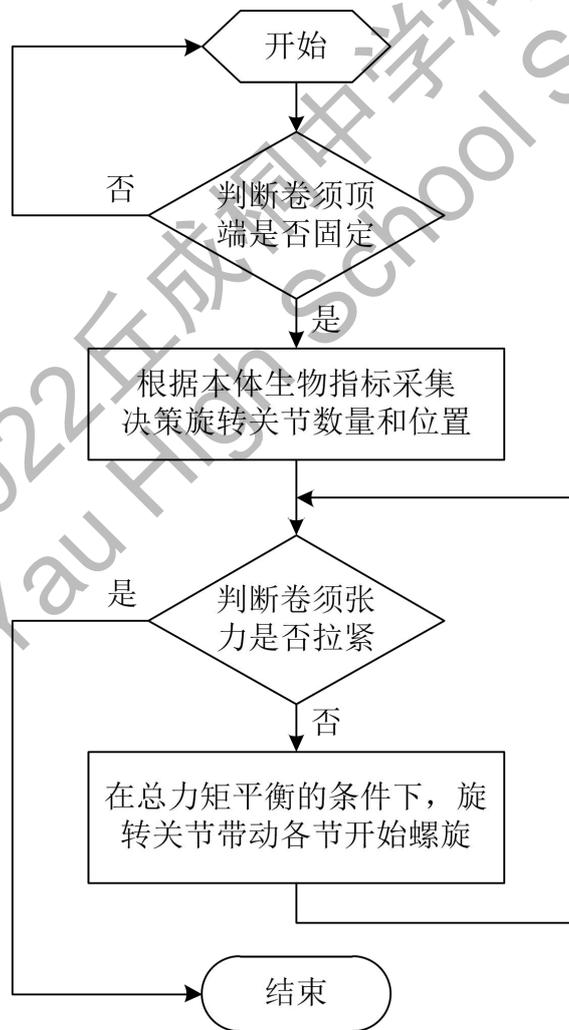


图 59 不对称茎螺旋生长流程图

根据以上推断和猜想，本文建立图 58 所示的一个不对称茎螺旋生长仿生模型。卷须开始螺旋生长时，控制器接收来自触觉、张力、力矩等传感器的信号以及采集的自体生物指标数据，决策并指令旋转关节发生器和螺旋卷须发生器工作。根据前文总结的规律，图 59 给出一般情况下不对称茎螺旋生长的流程图。卷须开始螺旋以前，首先判断顶端是否固定，如果已固定好，就根据自体生物指标采集数据决策旋转关节的数量和位置，在该卷须总力矩保持平衡的条件下，由旋转关节带动各节开始螺旋，直到卷须张力拉紧为止，螺旋生长结束。

(2) 对称茎

对称茎的“控制器”也应该在卷须的顶端，因为我同样发现一旦葡萄卷须的顶端折断或枯萎，整枝卷须不再生长。对称茎的“传感器”和不对称茎估计差不多，因为我观察到葡萄卷须和乌菰梅卷须也会像葫芦卷须那样螺旋生长。最大的区别估计就在“决策系统”和“执行系统”了。对称茎分支上处处都能体现出向触性，一旦触碰到物体就开始螺旋缠绕，螺旋生长起来没有优势方向，很是随意。鉴于此，这里就不再展开讨论对称茎的仿生模型了。

(3) 应用前景

藤蔓植物不对称茎的螺旋生长模式，给我一个启发：能不能做出一个具有类似功能的仿生紧固绳索，用于物体的束缚和固定，绳索应具有抗风、抗拉、有韧性、自紧固的功能。例如用于电线杆的斜拉绳索、高空物体的捆扎固定以及行李物品的打包束缚等等。我相信，随着材料科学、传感器技术和信号处理技术的进步，在不久的将来一定会有类似的新产品问世。

7、其它实验

(1) 卷须张力的测量

卷须螺旋生长的目的就是为拉紧和固定，具体多紧才算紧呢？我找了一段比较适合测量张力的南瓜卷须，它刚好把两个可以自由摆动的香椿树枝拉在一起，我记录下拉紧状态下卷须的长度为 11.8cm，然后把卷须和两个树枝剪下，用弹簧测力计拉出卷须刚才的长度，此时测力计读数为 0.20N，可以认为卷须刚才拉紧时的张力就是 0.20N。后来我又用黄瓜、葫芦卷须做了几组类似的测量，拉紧的卷须张力基本在 0.1N~0.2N 范围内，如果拉得不紧则在 0.05N~0.1N 范围内。

(2) 卷须劲度系数的测量

从形态上看，螺旋的卷须就像一个弹簧，是弹簧就有劲度系数，我想卷须也一定有劲度系数，它描述了卷须单位形变量时所产生的弹力的大小。于是采集了丝瓜和黄瓜卷须来试着测量。



① 南瓜卷须拉紧两树枝



② 测量卷须张力



③ 测量黄瓜卷须长度



④ 测量黄瓜卷须长度

图 60 卷须张力测量实验

设 K 为卷须劲度系数, F 为卷须上的张力, Δx 为卷须和放松状态时相比的形变量, 则

$$K = \frac{F}{\Delta x}$$

表 2 至表 6 是测量四根丝瓜卷须和一根黄瓜卷须劲度系数的数据, 可见卷须的劲度系数和其长度、粗细都有关, 还和其新鲜程度有关: 刚摘下来的卷须弹性好, 放置一段时间后弹性会下降。短粗卷须的劲度系数比细长的大, 形变量小时劲度系数较稳定, 形变量大了卷须可能恢复不到原来的长度。直观上看, 卷须劲度系数的规律和弹簧一样。



图 61 放松状态的丝瓜卷须

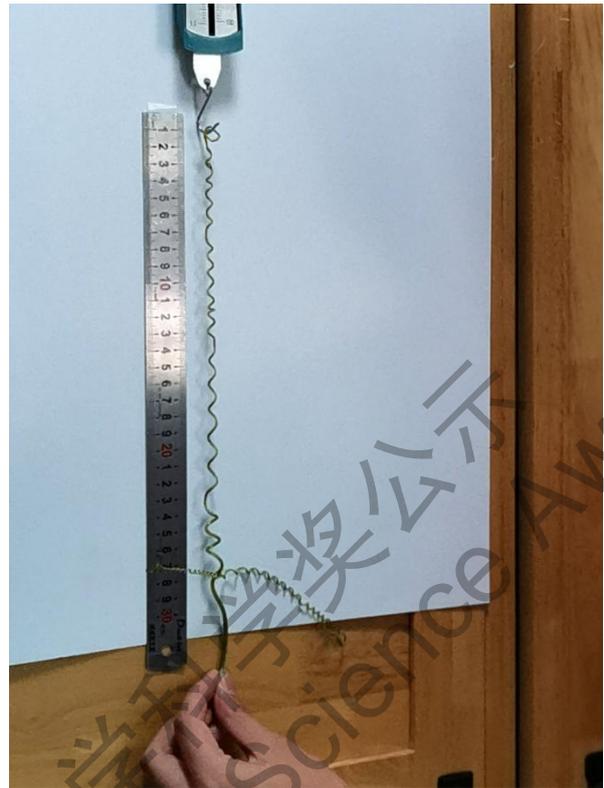


图 62 测量卷须劲度系数

表 2 测量丝瓜卷须 1 劲度系数

卷须长度 (cm)	测力计示数 (N)	卷须形变 (cm)	劲度系数 (N/cm)
20.4	0	-	-
23.0	0.1	2.6	0.038
25.0	0.2	4.6	0.043
26.3	0.3	5.9	0.051

(卷须根部直径 1.9mm, 中间直径 1.0mm, 顶端直径 0.8mm)

表 3 测量丝瓜卷须 2 劲度系数

卷须长度 (cm)	测力计示数 (N)	卷须形变 (cm)	劲度系数 (N/cm)
10.6	0	-	-
11.4	0.1	0.3	0.33
7.4	0.2	0.6	0.33
7.6	0.3	0.8	0.38

(卷须根部直径 2.8mm, 中间直径 1.9mm, 顶端直径 1.7mm)

表 4 测量丝瓜卷须 3 劲度系数

卷须长度 (cm)	测力计示数 (N)	卷须形变 (cm)	劲度系数 (N/cm)
6.8	0	-	-
7.1	0.1	0.3	0.33
7.4	0.2	0.6	0.33
7.6	0.3	0.8	0.38

(卷须根部直径 1.1mm, 中间直径 0.9mm, 顶端直径 0.8mm)

表 5 测量丝瓜卷须 4 劲度系数

卷须长度 (cm)	测力计示数 (N)	卷须形变 (cm)	劲度系数 (N/cm)
3.5	0	-	-
5.4	0.1	1.9	0.053
6.2	0.2	2.7	0.074
7.4	0.3	3.9	0.077

(卷须平均直径 0.6mm)

表 6 测量黄瓜卷须劲度系数

卷须长度 (cm)	测力计示数 (N)	卷须形变 (cm)	劲度系数 (N/cm)
3.6	0	-	-
5.8	0.1	2.2	0.045
6.2	0.2	2.6	0.077
7.2	0.3	3.6	0.083

(卷须根部直径 1.4mm, 中间直径 1.1mm, 顶端直径 0.8mm)

(3) 卷须的双金属模拟

由于卷须螺旋生长的一个底层逻辑是细胞的不对称生长, 这让我想到了双金属温度计就是运用了双金属片不对称热膨胀的特性, 于是我想能不能用双金属来模拟卷须的螺旋生长。但拆开双金属温度计后才发现, 里面双金属片的样子没法模拟卷须。



图 63 双金属温湿度计



图 64 双金属片

于是我就想到，能不能把不同热膨胀系数的金属丝平行焊接在一起通过温升来模拟。我查到金属线膨胀系数^[注]如表 7 所示：

表 7 常见金属线热膨胀系数 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

金属	线膨胀系数	金属	线膨胀系数
镉 (Cd)	41.0	锡铅合金	23.0
铅 (Pb)	29.3	铜 (Cu)	17.5
镁 (Mg)	26.0	镍 (Ni)	13.0
铝 (Al)	23.2	铁 (Fe)	12.2
锰 (Mn)	23.0	铬 (Cr)	6.2

我选择了其中差异较大又较方便购买的铁丝和铝丝来做实验。图 65 所示是直径均为 4mm 的铁丝和铝丝，在室温下我各取 2m 按图 66 所示的方式平行焊接在一起；把双金属丝捋直后放到厨房的灶台上来回烤热，估计温升至少有 50°C ，但双金属丝却没什么变化，没有期待中的螺旋现象，让我很是失望。后来仔细演算后才发现，2m 长铁丝和铝丝在室温下温升 50°C 会分别膨胀出 1.22mm 和 2.32mm，铝丝只比铁丝长出 1.1mm，这在 2m 长的尺度上只相当于变化了万分之 6.1，根本不显，和植物细胞生长变化相比差远了。

双金属模拟卷须螺旋生长实验虽然没成功，但也让我更加深切地认识到了植物生长的神奇所在。



图 65 铁丝和铝丝



图 66 平行焊接起来的双金属丝

[注] 线膨胀系数是指固体物质的温度每升高 1°C 时其单位长度的伸长量。

四、结论

本文从我对植物螺旋现象的一个好奇心开始，仔细观察了藤蔓植物茎和卷须的生长发育过程，用显微镜观察了茎和卷须的微观结构，探究了它们螺旋生长的规律和奥秘，并运用仿生学原理，建立了一个藤蔓植物不对称茎螺旋生长的模型，希望能对理解其生长过程有所帮助。虽然我对卷须螺旋生长的过程进行了仿生建模和流程推演，但藤蔓植物本身可能没这么复杂。在对不同品种卷须和卷须不同位置的显微观察中，我也没发现什么特殊器官，所谓“旋转关节”和螺旋部位、非螺旋部位的结构几乎一样，只是有对称茎和不对称茎的区别，但却造就了卷须螺旋生长的奇妙。

本文经过三个生长季的研究，可以得出以下结论：**藤蔓植物茎和卷须可分为不对称茎和对称茎两类；茎的螺旋生长是由植物的向光性、向地性、向触性和遗传因素共同控制，目的是为了向上、向光生长；卷须的螺旋生长是由植物的向触性引发，目的是为了拉紧卷须、固定植株位置，底层逻辑是细胞不对称生长和遵守力矩平衡原理。**

未来我还会继续关注藤蔓植物的茎和卷须，保持好奇心的同时，争取多学多用书本上的知识。我觉得：世间万物，虽各有其性，但万变不离其宗，这个“宗”就是——科学规律。

五、致谢

感谢北京一零一中马丽霞老师的悉心指导！感谢爸爸妈妈对小院儿藤蔓植物和我的精心栽培！感谢奶奶给我讲述植物生长的知识！感谢丘成桐中学科学奖这个大平台给我的学习机会！

参考文献

[1] 义务教育教科书，生物学（八年级，上、下册），北京：人民教育出版社，2013年9月。

[2] 义务教育教科书，物理（八年级，上、下册），北京：人民教育出版社，2012年10月。

[3] 马炜梁主编，植物学，北京：高等教育出版社，2015年8月第2版。

[4] 李晨，黄瓜“神奇”卷须背后的秘密，《发明与创新·大科技》期刊，2020年第8期。

[5] 徐祖琪，藤本植物运动机理的观察研究，《生物学教学》期刊，2001年第8期。

[6] 张彦苹，慕茜等，葡萄卷须及其相关研究，《植物生理学报》期刊，2013年第3期。

说明

1.选题来源、研究背景：本文选题自日常生活中常见的藤蔓类植物，以其缠绕茎或螺旋卷须为研究对象，探究它们螺旋生长的奥秘。

2. 本文作者在论文撰写中承担的工作以及贡献：作者在老师指导下进行选题和研究工作，具体包括：牵牛花、葫芦、南瓜、黄瓜等藤蔓植物栽培，乌药梅、鸡矢藤、五叶地锦等野生植物标本采集，各品种植物的显微观察，卷须不对称茎的理论建模，卷须实物的力学测量和实验模拟，各实验观测结果分析和理论探究。

3. 指导教师和学生为普通师生关系，学生在论文写作过程中受到的指导均为无偿指导。

4. 本课题中无他人协助完成的研究成果。

参赛队员简历

白子铭，男，2007年4月出生于郑州，成长于北京，喜欢探究自然，先后就读于北京市海淀区红英小学、中国人民大学附属中学分校、北京一零一中，2020年以来参加科技竞赛活动取得的主要成绩如下：2020年，获北京市青少年科技创新大赛二等奖；2021年，获北京市金鹏科技论坛一等奖、专家评委专项奖；2022年，获北京市青少年科技创新大赛一等奖。

指导教师简历

马丽霞，女，北京一零一中生物高级教师，全国优秀科学教师、北京市十佳科技教师，从事中学生物教育四十余年，注重学生综合素质培养，坚持 STEAF 教学法以及多学科交叉融合，近年来指导学生参加国际、国内各项科技竞赛，获得重要奖项二百六十余个。