

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903064



# 运用植物降温机制的围护结构防热设计

陈丹丹, 冉茂宇

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 通过对植物降温机制进行分类梳理, 阐述植物降温机制与建筑围护结构传热方式的联系; 同时, 对现有的相关研究及应用进行归纳总结, 提出基于植物降温机制的围护结构防热设计方法。研究表明: 运用植物降温机制的围护结构防热设计具有独特的适应性。

**关键词:** 防热设计; 植物降温机制; 围护结构; 传热方式

**中图分类号:** TU 111.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2020)01-0039-07

## Heat Protection Design of Building Envelope Using Plant Cooling Mechanism

CHEN Dandan, RAN Maoyu

(College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Under the discussion of the mechanism of plant cooling, the relationship between the mechanism of plant cooling and the heat transfer mode of building envelope is investigated; then the existing relevant research and application are summarized, and the thermal protection design method of building envelope based on plant cooling mechanism is proposed. The research results show that the heat protection design of the building envelope using the plant cooling mechanism has unique adaptability.

**Keywords:** heat protection design; plant cooling mechanism; building envelope; heat transfer method

建筑最基本的功能是为人们提供遮风挡雨的庇护所。我国炎热气候区居住着半数以上的人口, 因此, 越来越多的房屋必须进行建筑防热设计<sup>[1]</sup>。在防热设计过程中, 建筑围护结构是决定室内热舒适质量的关键因素。传统建筑围护结构虽然在保温隔热、遮阳挡雨方面起着屏障作用, 但由于其为实体材料构件, 只是一种媒介<sup>[2-4]</sup>, 并不能主动调节或适应气候。植物具有独特的生理结构和生理特性, 能够适应不断变化的天气条件<sup>[5-7]</sup>, 有着天生的气候适应能力。一方面, 植物对建筑环境的改善已经有相关应用, 典型的受自然启发的防热方式是垂直绿化或屋顶绿化<sup>[8-9]</sup>; 另一方面, 植物与建筑有很多相似之处, 植物扎根于土壤中, 并固定于其所处的位置。因此, 选择植物降温机制作为研究的出发点。目前面临的许多问题已经通过自然以有效、可持续和创造性的方式得到解决<sup>[10]</sup>。向大自然寻求应对经验是建筑领域一个新兴的研究方向, 它提供了巨大的潜力和灵感, 可以改善和发展非生物系统。它不是简单地模仿自然, 而是超越形式, 寻求对其适应原则的更好理解。因此, 基于植物降温机制的围护结构防热设计成为人们关注的课题。本文通过对植物降温机制进行分类梳理, 阐述植物降温机制与建筑围护结构传热方式的联系, 并对现有的相关研究及应用进行归纳总结, 提出基于植物降温机制的围护结构防热设计方法。

**收稿日期:** 2019-03-29

**通信作者:** 冉茂宇(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事建筑热工与建筑节能的研究。E-mail: 373664489@qq.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51678254); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(17014085002)

1 植物降温机制

植物在适应自然时,长期固定于一处,表现为静态应对策略,通过形态和自身结构体现;在面对环境变化时,则表现为动态应对策略,植物往往通过环境的外力驱动及自身的生理活动调节进行反应.

1.1 静态应对机制

1.1.1 形态分布 自遮阳的概念广泛存在于多肉植物中,主要体现在刺和凸起、肋面、凹槽,或光滑的交替凹凸表面(如仙人掌上不规则的脊),这些看似不规则的现象降低了太阳辐射的入射角<sup>[11-12]</sup>.就光而言,尽管仙人掌的表面积与体积比增加,但是肋状形态会产生自阴影,从而降低蒸腾速率.仙人掌的几何变化被认为是主动辐射拦截的适应性的结果.

植物有效光合作用是通过叶片高密度的单层分布或疏松的多层分布实现的<sup>[13]</sup>.例如,小花沙参叶片倾向于拥有较高的茎,从而超越相邻的叶片,下层的叶片倾向于水平扩张以增加光拦截.通过水平方向的延伸和扩展,使叶片的平面区域最大化,从而最大程度接受太阳辐射<sup>[14]</sup>.

有些干旱炎热地区生长的植物,如冬青用密集的小叶子、刺和毛代替了大叶子,以减少叶片表面暴露阳光直射下,从而防止叶片自身温度过高,同时,允许空气在植被冠层之间流通<sup>[15]</sup>.

一些植物具有适应干旱地区气候的特殊形态,利用重力将水直接引到它们的根部,使其吸收水分<sup>[16]</sup>,如肉质植物龙舌兰,其叶末端尖锐,边缘多刺,且从根部开始生长,叶子的凹形将雨水或冷凝水引向根部<sup>[17]</sup>.

1.1.2 光学特性 多肉富士在炎热的夏季通过高反射率的叶片降低自身温度,所以在建筑中使用合适的颜色可以减少辐射吸收的能量.银色和有光泽的叶片吸光度比其他叶片低约 20%<sup>[18-19]</sup>.因此,用于反射的蜡质涂层也同样具有减少辐射的作用<sup>[20]</sup>.

1.2 动态应对机制

1.2.1 环境驱动 植物有保护重要器官或获得最佳的光照和温度条件的倾向<sup>[21]</sup>.一些植物表现出相对较快的运动,使茎和叶向光方向弯曲,以提高光合效率.还有一类植物如瘦叉柱花,它们利用花的向日性来跟踪太阳的日常运动,以确保其生殖器官获得最佳温度.

植物还利用湿度驱动机制实现形状变化,如松果在相对湿度发生变化时,其封闭的松锥逐渐打开.植物细胞壁是一种亲水性物质,当它暴露在干燥的空气中时,由于水分蒸发,它的体积会缩小.吸湿体积的变化是可逆的,因此,当细胞壁再次暴露在潮湿的空气中,它将吸收水分并膨胀<sup>[22]</sup>.吸湿膨胀收缩过程相对较慢,不需要任何生化能量,且对周围环境变化有响应<sup>[23]</sup>.

植物的运动是对气候变化的直接反应<sup>[24]</sup>.为了获得最大的暴露,叶片往往具有清晰的组织和分布,在植物体内具有较强的适应性和可塑性.在最低限度的照射下,植物在受到高强度照射(如中午)活力较弱时,会重新调整方向,叶片倾斜度较低,防止正常光线照射等情况的发生<sup>[25]</sup>.植物倾向于改变它们的倾角,以便根据不同的气候调节光的截留<sup>[26]</sup>,如薄荷叶片较低层次的叶子弯曲以获得最大阳光辐射.

1.2.2 生理活动 蒸腾作用对降低叶片表面温度同样有重要影响.由袁智<sup>[27]</sup>建立的单个叶片传热传质模型研究可知,气孔的蒸腾作用在叶片散热体系中起着重要的作用.整个夏季叶片蒸腾作用蒸发潜热总量占叶片总散热的 32.9%.

植物水分上升的主要通道是木质部中的导管,水分上升的动力主要来自植物的蒸腾拉力和导管的毛细作用<sup>[28]</sup>.毛细管作用的发生是由于液体和周围固体表面的分子间相互吸引<sup>[29]</sup>.液体分子的粘附作用使一些水沿着管壁流动.毛细管越窄,液体上升得越高.

植物表皮的气孔是调节温度的特殊装置,是蒸腾作用发生的地方.气孔通过张开或闭合控制气体交换,防止植物水分流失<sup>[30]</sup>.如果进入植物的水分多于蒸发的,则细胞壁受到的压力增大,气孔口打开,以蒸发掉更多的水分;如果气候干旱,蒸发掉的水分多于进入植物的水分,则气孔关闭<sup>[31]</sup>.

2 建筑围护结构防热设计过程

将植物降温机制转变为设计需求,对于防热设计而言非常重要.自然提供了一个大型的适应策略数据库,形态和生理行为是从自然系统中复制到建筑中最常见的特征.由于其目的是降低温度、调节热量,

因此, 传热过程是决定建筑围护结构性能的主要标准.

2.1 建筑传热过程

在夏热冬暖及夏热冬冷地区, 夏季气温炎热, 造成室内过热, 影响了人们的活动及健康, 因此, 需考虑建筑防热设计<sup>[1]</sup>. 一般来说, 传热过程有 3 种主要方式, 即辐射、传导和对流. 对于生物体, 与物质相变有关的传热方式是蒸发<sup>[32]</sup>. 传热过程是自然生物的策略和相应的建筑特征之间的共同点. 然而, 植物降温策略所产生的降温效果并非单一传热方式带来的, 而是多种传热方式共同作用的结果. 因此, 在讨论传热方式与建筑防热设计之间的联系时, 以植物降温机制的主导传热方式为依据进行相关讨论.

2.2 降温机制的转化

在收集植物降温机制及植物与环境的相互作用后, 提取植物降温形态行为等元素, 以主导传热原理为桥梁, 将相同主导传热原理的植物降温元素与建筑围护结构防热元素进行对应与联系, 使围护结构设计时最大程度地适应自然气候, 实现降温. 植物降温机制及相应的建筑围护结构防热策略, 如表 1 所示. 此仿生方法的步骤如下: 1) 植物应对高温方案识别; 2) 提取降温元素; 3) 明确传热方式; 4) 明确对围护结构防热策略; 5) 明确概念设计整体部分解决方案之间的冲突; 6) 进行抽象转化; 7) 原理应用.

表 1 植物降温机制及相应的建筑围护结构防热策略  
Tab. 1 Plant cooling mechanism and thermal protection strategy of building enclosure

植物降温策略		提取降温元素	主导传热方式	围护结构防热策略
静态应对机制	形态分布	仙人掌不规则脊	辐射	建筑形体自遮阳结构
		叶片的疏密度	辐射	遮阳板的疏密度
		植物叶片较小	辐射/对流	遮阳板的疏密度
		植物叶片形态利用重力导水注入根部	蒸发	吸水降温材料的雨水收集
	光学特性	叶片的高反射	辐射	遮阳板材料的颜色和反射率
动态应对机制	环境驱动	植物受风的驱动	对流	根据室内、外气压差调节自适应结构
		植物获得最佳光照的倾向	辐射	遮阳板的倾角
		植物对光线的跟踪运动	辐射	遮阳板的自调节性
		植物湿度驱动	蒸发	根据室内、外温、湿度变化的自适应结构
	生理活动	植物叶片的蒸腾作用	蒸发	围护结构材料的相变性
		植物导管毛细作用	蒸发	围护结构材料吸水特性
		植物叶片的气孔	蒸发	根据温、湿度变化的自适应结构

3 降温策略应用分析

建筑围护结构防热设计主要基于 3 种建筑降温策略: 遮阳; 蒸发; 通风, 这些策略主要通过建筑围护结构表达<sup>[33]</sup>. 植物对大自然的适应是整体的, 并非是某项生理特征或生理行为应对某项自然现象. 在讨论建筑某项防热策略时, 会出现一个生理结构或行为产生多个节能效果. 因此, 应以其主导的作用为分类依据.

3.1 遮阳

由于辐射是可见光和非可见光的有效传热方式之一, 遮阳阻挡辐射会阻碍传热, 从而导致被动降温. 目前, 用于建筑遮阳设备的可调节性比较有限, 主要为太阳辐射的极端情况设计, 而不是为全部暴露在太阳辐射下所设计<sup>[34]</sup>. Reichert 等<sup>[35]</sup>研究植物如何以最小的能量, 利用形态、组成和行为方式, 实现最佳遮阳效果.

Gosztonyi<sup>[36]</sup>通过研究仙人掌的几何形态, 从而优化建筑围护结构的自遮阳质量, 研究表明, 几何基础形式对采光或遮阳有重要影响, 阴影和能量交换在很大程度上受到体几何的影响, 从而达到建筑降温的效果. 将仙人掌的脊状结构转换到建筑物的立面表面, 可以实现气候上理想的折叠立面, 特别是对炎热和阳光充足地区的建筑.

Badarnah 等<sup>[37]</sup>开发了以叶片的向光性为灵感的调节遮阳系统, 由独立的遮阳板组成, 这些遮阳板由一个附着装置固定. 叶子状的元素被安排在一个网格上, 允许它们跟随太阳的位置自由移动. 该系统

产生了一个高效的遮阳,同时,可以达到最大限度的太阳能增益.研究表明,对于早晨的低海拔地区,根据方位角的不同,遮阳板集中在包络线的东侧,密度高或低;对于高度和方位角的不同组合,生成了不同的遮阳系统组织模式.目前的遮阳系统只考虑高度角或方位角,而没有考虑它们的综合影响(早上和晚上的高海拔角的水平百叶窗或低海拔的垂直百叶窗).这种高度和方位角的结合是非常重要的,为了覆盖全天的路径辐射,在此遮阳系统中可以实现.

为了避免沙漠的烈日,Cilento<sup>[38]</sup>以花瓣受太阳辐射开合为灵感,为 Al Bahar 塔楼设计了双层立面系统.塔楼外立面被动态设计成随着太阳的运动打开和关闭,太阳的能量增益下降了 50%.

3.2 蒸发

建筑外表面直接利用太阳能使表层水分蒸发而获得冷却的方法,最早是由美国学者提出的<sup>[39]</sup>.植物的蒸腾作用对于植物叶片同样具有蒸发降温的作用.叶片在吸收光辐射进行光合作用的同时,吸收了大量热量,通过蒸腾作用散热,可防止叶温过高,避免热害<sup>[40]</sup>.

Badarnah 等<sup>[41]</sup>设计了以气孔蒸腾作用降温为灵感的气孔砖.它是一种 3D 打印的砖体,其中含有湿的多孔部件,用于蒸发冷却,该直接蒸发冷却器被应用于干旱地区.通过直接蒸发冷却,外部空气吹过饱和水介质(通常是纤维素),从而蒸发冷却.

Šuklje 等<sup>[42]</sup>提出了消除绿色外墙的缺点的仿生立面,仿生立面由仿生叶、光伏电池和蒸发矩阵组成.这些组件的双重作用是提高光伏系统的效率,并在建筑周围的微气候中冷却空气.研究表明,与绿色外立面相比,仿生外立面的微气候层温度略高,可以确定所开发的仿生系统是功能性的.此外,对绿色微气候层和仿生立面的绝对湿度进行对比分析,后者的自我调节性能更好.除了对仿生立面微气候层的温度和流动条件的影响外,开发的仿生叶还可以影响更高的发电量,同时,可显著降低与建筑的生态足迹相关的二氧化碳排放量.

相对湿度的变化导致封闭的松锥逐渐打开.该机制依赖于双层结构,活跃的组织外层,厚壁细胞在暴露于湿气时纵向扩张并在干燥时收缩<sup>[43]</sup>.Reichert 等<sup>[35]</sup>以木材的各向异性尺寸变化作为实际响应层的出发点,利用吸湿材料的特性,研究了适应环境变化的自主响应建筑系统.研究表明,这种类型的集成功能在物质层上允许复杂的、分散的行为模式,而不需要任何控制单元.同时,此结构减少了故障点的数量,并允许系统在发生大部分故障时仍然运行.

3.3 通风

建筑物内的自然通风是十分必要的,它是决定人们健康和舒适的重要因素之一.自然通风相应的过程是:1) 自然对流,需要温度梯度来完成这一过程;2) 压差,速度梯度和体积变化影响这一过程<sup>[44]</sup>.植物在降低自身温度时,其形态和生理活动方面也有增强对流的适应策略.

文献[45]中,Jin 以气孔为灵感,开发了自适应立面概念,提取叶片静脉结构为仿生概念,抽象出六角形概念为表皮组成元素,并与气孔自我调节概念相结合.构建与植物气孔系统相对应的双层立面,通过建筑围护结构的适应性进行温度管理,控制室内、外气体交换.

3.4 案例评价

植物降温机制相关的研究案例,如表 2 所示.

表 2 植物降温机制相关的研究案例  
Tab. 2 Study case related to plant cooling mechanism

植物降温机制	提取降温元素	案例名称	概念/项目/研究	防热设计策略	节能效果	模拟/建成地区
形态分布/静态	仙人掌不规则脊	优化建筑围护结构的自遮阳质量模拟	研究	遮阳	仙人掌形态的总照射量低于几何简单体积(每平方米太阳照射量较低)	慕尼黑
环境驱动/动态	植物获得最佳光照倾向	遮阳系统	研究	遮阳	用密度较小的阴影面获得最大所需阴影面积,避免自阴影,或用密度较高的阴影面获得最大能量的阴影	代尔夫特
环境驱动/动态	植物的向日性	Al Bahar 塔楼遮阳构件	项目	遮阳	太阳的能量增益下降 50%	阿布扎比

续表

Continue table

植物降温机制	提取降温元素	案例名称	概念/项目/研究	防热设计策略	节能效果	模拟/建成地区
生理活动/动态	植物叶片的蒸腾作用	气孔砖	概念	蒸发	直接蒸发冷却器的效率每年节省了大量的能源消耗,模块化房屋或教室中可节省高达 70% 的能源消耗	耶路撒冷
生理活动/动态	植物叶片的蒸腾作用	仿生绿色外墙立面	研究	蒸发	仿生与绿色外立面的热性能一致,表面温度降低 20.8 K,日发电量提高 6.6%	斯洛文尼亚
环境驱动/动态	受湿度影响的松锥开闭	自主响应建筑系统	研究	蒸发	与机械和/或电子驱动系统相比,它显著提高了结构的简单性	斯图加特
生理活动/动态	植物气孔受温湿度影响的开闭	自适应立面概念	概念	通风	—	—

将植物降温机制与其相关案例进行对比和梳理,分析其防热性能优劣,可发现以下 3 点不足.

1) 基于植物降温机制的围护结构防热设计相关研究还停留在概念及研究阶段,应用方面还处于初级阶段.

2) 在遮阳、蒸发、通风三者应用研究总结中,植物降温机制在通风策略方面的研究较少,因此,在通风方面的研究是未来具有弥补空白的方向.

3) 对植物适应性相应的研究受到地理气候因素的局限,如在动态遮阳案例中,遮阳因素受到太阳高度角的影响.

未来的研究将以普适性原则为依据,从而发掘通用的建筑适应性围护构件.

4 结论

1) 通过对植物降温机制的分类与总结,从植物适应性静态和动态应对机制出发,了解植物在应对气候挑战时有自身的适应性,为下一步围护结构防热提供设计灵感.

2) 根据植物应对环境的形态及行为抽象简化,以主导传热过程为桥梁,将其抽象为建筑围护结构防热设计元素,为基于植物降温机制的围护结构防热设计提供相关的设计思路.

3) 将目前现有的植物降温机制相关的案例进行归纳总结,分析现阶段的研究现状,为未来研究提供设计参考.

虽然已有大量的实验证明植物具有降温作用,但是对于大部分植物的降温表现缺乏具体的量化研究;植物的适应表现并非是一种策略对应一种解决方案,往往是一对多的关系,因此,在设计层面需要对设计需求更深层面的考虑;基于植物降温机制的围护结构防热设计相关研究目前还处于初级阶段,需要未来更多的发掘与深入探索.

参考文献:

[1] 华南理工大学,重庆大学,大连理工大学,等. 建筑物理[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002.

[2] ARMSTRONG R. Living architecture: How synthetic biology can remake our cities and reshape our lives[M]. New York:TED books,2012.

[3] LIU Lifang,LI Hong,LAZZARETTO A,*et al.* The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 912-932. DOI: 10. 1016/j. rser. 2016. 11. 140.

[4] LEATHERBARROW D,MOSTAFAVI M. Surface architecture[M]. Cambridge:MIT Press,2005.

[5] AL-OBAIDI K M,ISMAIL M,RAHMAN A M A. Design and performance of a novel innovative roofing system for tropical landed houses[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85: 488-504. DOI:10. 1016/j. enconman. 2014. 05. 101.

- [6] BARBOSA S,IP K. Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2014,40:1019-1029. DOI:10. 1016/j. rser. 2014. 07. 192.
- [7] 李海霞,冉茂宇. 人文生态建筑的设计思考[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*,2006,27(3):280-283. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-5013. 2006. 03. 016.
- [8] OTTELÉ M. Green facades and roofs[M]//LABRINCHA J A. *Biotechnologies and biomimetics for civil engineering*. Berlin:Springer,2014.
- [9] OTTELÉ M. A green building envelope: A crucial contribution to biophilicities[M]//TORGAL F P,LABRINCHA J A,DIAMANTI M V,*et al.* *Biotechnologies and biomimetics for civil engineering*. Cham:Springer,2015.
- [10] YUAN Yanping,YU Xiaoping,YANG Xiaojiao,*et al.* Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2017,74:771-787. DOI:10. 1016/j. rser. 2017. 03. 004.
- [11] NOBEL P S. Interception of photosynthetically active radiation by cacti of different morphology[J]. *Oecologia*,1980,45(2):160-166. DOI:10. 1007/bf00346455.
- [12] MAUSETH J D. Theoretical aspects of surface-to-volume ratios and water-storage capacities of succulent shoots [J]. *American Journal of Botany*,2000,87(8):1107-1115. DOI:10. 2307/2656647.
- [13] NIKLAS K J. The role of phyllotactic pattern as a “developmental constraint” on the interception of light by leaf surfaces[J]. *Evolution*,1988,42(1):1-16. DOI:10. 1111/j. 1558-5646. 1988. tb04103. x.
- [14] KING D A. Correlations between biomass allocation, relative growth rate and light environment in tropical forest saplings[J]. *Functional Ecology*,1991,5(4):485-492. DOI:10. 2307/2389630.
- [15] BATANOUNY K H. *Plants in the deserts of the Middle East*[M]. Berlin: Springer, 2001. DOI:10. 1007/978-3-662-04480-3.
- [16] BADARNAH L. Towards the LIVING envelope: Biomimetics for building envelope adaptation[D]. Delft:Delft University of Technology,2012. DOI:10. 4233/uuid:4128b611-9b48-4c8d-b52f-38a59ad5de65.
- [17] BADARNAH L. Water management lessons from nature for applications to buildings[J]. *Procedia Engineering*,2016,145:1432-1439. DOI:10. 1016/j. proeng. 2016. 04. 180.
- [18] VOGEL S. Leaves in the lowest and highest winds: Temperature, force and shape[J]. *New Phytologist*,2009,183(1):13-26. DOI:10. 1111/j. 1469-8137. 2009. 02854. x.
- [19] DIRKS I,RAVIV B,SHELEF O,*et al.* Green roofs: What can we learn from desert plants? [J]. *Israel Journal of Ecology and Evolution*,2016,62(1/2):58-67. DOI:10. 1080/15659801. 2016. 1140619.
- [20] EHLENGER J,BJÖRKMAN O,MOONEY H A. Leaf pubescence: Effects on absorptance and photosynthesis in a desert shrub[J]. *Science*,1976,192(4237):376-377. DOI:10. 1126/science. 192. 4237. 376.
- [21] ZHANG Shu,AI Honglian,YU Wenbin,*et al.* Flower heliotropism of *Anemone rivularis* (Ranunculaceae) in the Himalayas: Effects on floral temperature and reproductive fitness[J]. *Plant Ecology*,2010,209(2):301-312. DOI:10. 1007/s11258-010-9739-4.
- [22] KATIFORI E,ALBEN S,CERDA E,*et al.* Foldable structures and the natural design of pollen grains[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,2010,107(17):7635-7639. DOI:10. 1073/pnas. 0911223107.
- [23] DUMAIS J,FORTERRE Y. “Vegetable dynamics”: The role of water in plant movements[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*,2012,44(1):453-478. DOI:10. 1146/annurev-fluid-120710-101200.
- [24] SCHLEICHER S. Bio-inspired compliant mechanisms for architectural design: Transferring bending and folding principles of plant leaves to flexible kinetic structures[D]. Stuttgart:University Stuttgart,2015.
- [25] EHLENGER J,FORSETH I. Solar tracking by plants[J]. *Science*,1980,210(4474):1094-1098. DOI:10. 1126/science. 210. 4474. 1094.
- [26] EZCURRA E,MONTANA C,ARIZAGA S. Architecture, light interception, and distribution of *Larrea* species in the Monte Desert, Argentina[J]. *Ecology*,1991,72(1):23-34. DOI:10. 2307/1938899.
- [27] 袁智. 植物叶片蒸腾作用模拟[D]. 合肥:中国科学技术大学,2013.
- [28] 周清. 植物输水过程模拟研究[D]. 天津:天津大学,2004.
- [29] 高世桥,刘海鹏. *毛细力学*[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [30] VOGEL S. *The life of a leaf*[M]. Chicago:University of Chicago Press,2012.

- [31] 刘怀景. 人类的仿生技术[M]. 北京:现代出版社,2012.
- [32] MAZZOLENI I. Architecture follows nature-biomimetic principles for innovative design[M]. Boca Raton: Crc Press,2013.
- [33] MOHAMED A S Y. Biomimetic architecture: Creating a passive defense system in building skin to solve zero carbon construction dilemma[J]. EQA-International Journal of Environmental Quality,2018,29:1-28. DOI:10.6092/issn.2281-4485/7855.
- [34] BADARNAH L,KNAACK U. Organizational features in leaves for application in shading systems for building envelopes[J]. WIT Transactions on Ecology and the Environment,2008,114:87-96. DOI:10.2495/DN080101.
- [35] REICHERT S,MENGES A,CORREA D. Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness[J]. Computer-Aided Design,2015,60:50-69. DOI:10.1016/j.cad.2014.02.010.
- [36] GOSZTONYI S. BioSkin-Bionische Fassaden: Potenziale aus der Bionik für adaptive energieeffiziente Fassaden der Zukunft[C]//Proceedings of the 17th International Holzbau-Forum. [S.l.]:[s.n.],2011:1-14.
- [37] BADARNAH L,KNAACK U. Shading/energy generating skin inspired from natural systems[C]//Proceedings of the SB08: World Sustainable Building Conference. Melbourne:[s.n.],2008:305-312.
- [38] CILENTO K. Al Bahar towers responsive facade/aedas[J/OL]. (2012-09-05)[2019-03-20]. <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>.
- [39] 孟庆林. 建筑外表面被动蒸发冷却热过程研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),1997,25(1):63. DOI:10.3321/j.issn:1000-565X.1997.01.009.
- [40] 周云龙,刘宁,刘全儒. 植物生物学[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [41] BADARNAH L,FARCHI Y N,KNAACK U,*et al.* Solutions from nature for building envelope thermoregulation [J]. Design and Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering,2010,5:251-262. DOI:10.2495/DN100221.
- [42] ŠUKLJE T,MEDVED S,ARKAR C. An experimental study on a microclimatic layer of a bionic façade inspired by vertical greenery[J]. Journal of Bionic Engineering,2013,10(2):177-185. DOI:10.1016/S1672-6529(13)60213-9.
- [43] LÓPEZ M,RUBIO R,MARTÍN S,*et al.* Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles[J]. Journal of Facade Design and Engineering,2015,3(1):27-38. DOI:10.3233/FDE-150026.
- [44] KUMAR A R,VIJYAKUMAR K,SINIVASAN P. A Review on passive cooling practices in residential buildings [J]. International Journal of Mathematical Sciences and Engineering,2014,3(1):1-5.
- [45] POHL G,NACHTIGALL W. Biomimetics for architecture & design: Nature-analogies-technology[M]. New York:Springer,2015.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)