

受损河流的生态修复

Ecological Rehabilitation of Damaged River System

倪晋仁/NI Jin-ren^{1,2}, 刘元元/LIU Yuan-yuan^{1,2}

1. 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871

2. 北京大学环境工程系, 北京 100871

1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871, China

2. Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

[摘要] 基于人类与河流关系的发展与变化,划分了原始自然、工程控制、污染治理和生态修复等4个阶段,以此为前提来分别审视不同阶段河流系统诸功能与河流健康之间的关系,分析各个阶段河流治理与生态修复的基础。伴随着社会经济的发展和人类对河流系统的粗放式开发利用,许多河流系统都受到了严重损害。受损河流的修复需要对多目标、多层次、多约束条件的复杂系统进行优化,对河流功能及其阈值和受损状况准确把握,在此基础上提出不同阶段河流治理和生态修复的方法和技术。

[关键词] 河流健康;河流功能;生态修复

[中图分类号] X171.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)07-0017-04

Abstract: Four phases were classified in terms of the relationship between human and rivers, including natural-cycled, engineering-regulated, pollution-controlled and ecological-rehabilitated phases. Based on the understanding of the relation between river health and river functions at certain stage, targets and principles for river regulation and rehabilitation were discussed. Note that most river systems were badly damaged due to over-exploitation. The idealized solutions to the river ecological rehabilitation should rely on the optimal analysis of the integrated system with multi-objective, multi-layer, multi-constraint characteristics. With reasonable consideration of river functions, thresholds and damaged levels, corresponding technologies and countermeasures for ecological rehabilitation of the damaged river systems were proposed.

Key Words: river health; river function; ecological rehabilitation

CLC Number: X171.4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)07-0017-04

1 河流与人类的关系

河流是人类赖以生存的水环境,是人类社会生存和发展的起源地^[1]。河流系统是自然界最重要的生态系统之一^{[2]15}。维护河流系统健康、实现人与河流持久的和谐共存,是河流生态修复的根本目标。人类与河流的关系虽然十分复杂,但是可以大致分为4个阶段,即原始自然阶段、工程控制阶段、污染治理阶段和生态修复阶段。

在漫长的原始自然阶段,人类多选河流流经的水草丰美之地聚居,对河流的利用仅为简单的农业灌溉和日常生活取水。在这一阶段,河流能提供远多于人类发展需求的服务,河流系统的许多功能尚未被人类认识、开发和利用,河流在复杂多变的外部条件下通过系统的自动调整得以发展和演变,不受或少受人类影响,人类与河流基本和谐相处。另一方面,由于在该阶段人类对河流自然灾害的防御能力很弱,因此对洪水等灾害多以被动躲避为主。

采用工程方法控制河流的实践源于防洪。早在公元前3400年,古埃及人就修建了尼罗河左岸大堤保护西部的首都和农田;2500年前,在安徽寿县就已修建芍陂水库。与防洪相关的河流工程控制措施除修建水库和堤防外,还有河道取直、蓄滞洪区、双层

河道、边堰系统和地下水库、堤坝加固等。人口增长和工农业发展使得河流工程控制措施扩展,并使供水、发电、航运等方面的工程措施不断完善。人类对河流的治理经历了从单纯防洪到多功能开发利用的过程,使得河流可以同时发挥多种功能,从而能够更好地满足人类发展的需求。

河流污染是人类对河流不当利用和控制的主要负面后果之一^{[3]2}。河流污染治理需要有效控制污染源的污染排放量,并将排污量控制在河流承载力之内。对于点源污染,目前采用的技术包括物化、生物及其相关组合的方法,常见的方法如絮凝沉淀、生物絮凝吸附、生物氧化、活性污泥法、生物膜法、固定化微生物-曝气生物滤池方法等^[4]。非点源污染与土地利用方式密切相关,因此对土地资源进行合理的规划、利用是控制非点源污染的有效途径之一。河流污染问题已在世界范围内受到广泛关注,各种污染控制技术迅速发展,为基于生物-生态集成的河流修复技术的应用奠定了基础。

河流系统功能健康的恶化主要表现为水中的养分、水的化学性质、水文特性和河流生态系统动力学特性等的改变,以及因此产生的对原水生生态系统和原物种的巨大压力^{[5]25}。从20世纪70年代开始,对河流生态系统进行综合修复成为一种先进的治河理

收稿日期:2006-04-20

基金项目:国家自然科学基金委员会和水利部联合资助项目(59890200)

作者简介:倪晋仁,男,北京大学环境工程系,教授,主要研究方向为环境工程和水沙科学;E-mail:nijinren@iee.pku.edu.cn

念。生态修复旨在使受损生态系统的结构和功能回复到受干扰前的自然状况^[6]。河流生态修复有多种方法^[7-8]，生态系统修复是使受损河流恢复其功能健康的根本途径。

2 河流健康与系统功能的关系

河流系统健康依赖于河流各项功能的满足。河流系统具有多种功能，如泄洪、供水、输沙、自净、景观、航运、发电、生态功能等。

河流的输水泄洪功能使其能够自动调节水文过程，具有蓄洪削峰的作用^[3]。河流的航运功能方便了地区之间的人口、物资等的流动^[9]。河流的输沙功能对于多沙河流来说至关重要，输沙功能的衰竭将导致河道淤积的加剧和河流系统功能的丧失^[10-11]。河流的发电功能源于地形上的落差形成的势能储蓄，是社会发展的主要动力。河流的供水功能为人类生存提供了必需的淡水资源，同时也为生态环境用水等提供了保障。河流的自净功能通过自然稀释、扩散、氧化等一系列物理和生物化学反应来净化由径流带入河流的污染物，从而保证了各种物质在河流生态系统中的循环利用和河流水环境的净化和改良^[12]。河流的生态功能是维持系统生物群落和栖息环境动态稳定的基础，同时也反映了河流抵御外来干扰和维持系统平衡的能力。河流的景观娱乐功能不仅涉及由狭义的河流水面、河岸绿化带以及滨河建筑物等给人们带来的视觉上的美感，而且涵盖广义的河流系统平衡和自然循环^[12-13]。河流的诸功能相互联系、相互影响、相互制约，任一项功能的衰退都可能导致整个河流系统功能偏离平衡。另一方面，河流系统作为一个整体必然会通过其系统功能的变化来体现其系统平衡和健康状况。这就需要综合考虑各项功能以及它们之间的协调关系，通过顺应河流在不同阶段自我调整的平衡趋势，实现河流生态系统的自然良性循环。

河流系统健康与否可以通过其各项功能的健康状况来反映。因此，河流系统平衡条件下各项功能的指标体系构建，便成为十分重要的任务。另一方面，对应于河流系统平衡的各项功能指标阈值的确定就成为衡量河流系统健康的关键。对河流各项功能状况（或受损程度）和河流系统健康的科学诊断，可以根据河流系统健康指标体系进行判断，具体可通过尼尔图（NiL 图）来直观地描述。图 1 中， w_i 表示各项功能对河流健康的权重； w_j 表示各要素对相应功能的权重。各功能要素偏离平衡阈值的程度越高，满足功能要求的程度越低，河流系统健康的状况就可能越差。图 1 中：第一圈层为目标层，是在不同阶段河流各项功能健康状态的综合反映，也是河流系统整体健康的集中体现；第二圈层为功能层，也是在多种约束条件下的分目标层，其中 $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n$ 可以分别表示河流的输水泄洪、航运、输沙、发电、供水、自净、生态和景观娱乐等功能中的任何一种；第三圈层为功能要素层，反映各项功能的主要方面和特征，可以用 $I_{11}, I_{12}, I_{21}, \dots, I_{ij}, \dots, I_{nm}$ 表示。其中，实线表示理想的平衡或健康状况，虚线表示实际状况，虚圈与实圈之间的距离表示实际值与期望值的偏离程度，距离越远，偏离越大。线条的粗细表示重要程度，线条越粗，该要素（功能）对上一层级的影响（或重要性）作用就越大。根据河流系统诸功能偏离对应阈值的情况（即各项功能需求的满足程度或功能受损程度），便可按下式对河流系统健康进行诊断：

$$HI_R = \sum_{i=1}^n I_i \times w_i$$

式中， HI_R 为河流健康综合指数； I_i 为第 i 个指标的无量纲值； w_i 为第 i 个指标对于总目标的权重。

3 河流生态修复基础

受损河流修复并不是简单地指使河流恢复到原始状态，而是使河流受损功能恢复到接近期望的理想状态，使河流生态系统趋向于建立健康的动态平衡。河流生态修复不能脱离人类和河流关系的发展阶段。在原始自然、工程控制、污染治理和生态修复等不同阶段，河流治理与修复的理念和任务有很大不同。

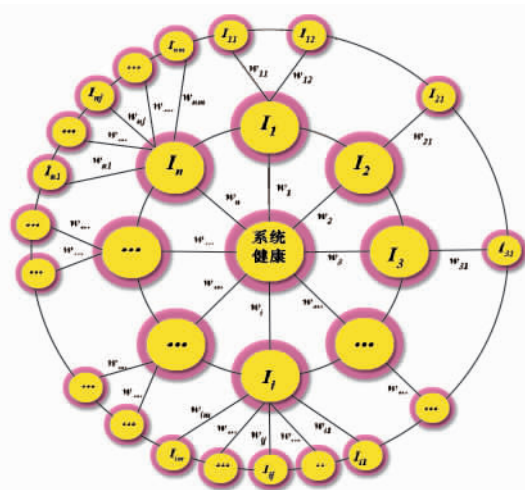


图 1 河流系统健康诊断分析的 NiL 图
Fig. 1 Analysis of river health diagnosis

原始自然阶段作为人类与河流关系的最初阶段，忠实地记录了河流生态系统追求动态“平衡”的历史轨迹，从而为生态修复留下了宝贵的参照体系。在该阶段，NiL 图第二圈层的功能项仅限于泄洪、输沙、供水、自净、生态和景观功能。河流系统总体上处于自然健康状态，在 NiL 图中各层只有实线存在，各项功能基本满足。河流工程控制阶段标志着更多的河流功能为人类所认识和开发，泄洪功能、航运功能、供水功能、发电功能得到扩展。在该阶段，由于大坝、水库对河流水体的拦蓄，造成输沙、生态、景观娱乐功能所需水量不足和生物多样性的减少，河流的主要功能均受到不同程度损害，河流系统开始偏离健康状态。河流污染治理阶段的重要标志是河流的严重污染。由于水质恶化，使得除泄洪、航运和发电功能以外的其他大多数功能受到损害，并直接影响到河流生态系统的健康和存亡。河流系统生态修复阶段标志着人类对河流认识的飞跃。在该阶段，河流的生态功能、输沙功能、景观娱乐功能受到更多关注，如何维护河流健康已成为重要治河理念。

河流治理和修复必须与所处“人类-河流”关系的相应阶段相适应，必须具备相应的条件。河流污染治理目标远低于生态修复阶段的目标。河流系统功能的生态修复不可能一蹴而就，在尚未完成污染治理阶段目标以前，不可能有效地再造生物的栖息环境、招徕本土生物和增加系统生物多样性。对于受损程度不同、约束条件不同的河流，应该根据实际情况合理规划治理修复进程。例如，莱茵河生态修复计划明确地把大马哈鱼返回到河流作为其标志；英国泰晤士河修复将大马哈鱼、鲑鱼、鳊鱼等作为河流生态修复的重要成效指标；德国众多河流的生态修复也都把河流系统中的各种生物放在十分重要的位置，将水体重建、河流水文循环恢复、使鱼类和底栖无脊椎动物返回到河流以实现河流生态系统完整性作为目标。德国 Isar 河的生态修复甚至将在河流中安全游泳、洗浴作为修复目标。我国的大部分地区在目前尚无法实现此类修复目标。

自然循环原则是生态修复的基本原则。应利用河流生态系统的自我调节能力,因势利导地采取适当的人为措施,使河流系统朝着自然和健康的方向发展,最大限度地构造人类和河流融洽和谐的环境。自然循环受到众多条件的约束,如气候、地质地貌、植被条件、河流状况、土地利用、城市规划、人口社会、产业结构、污染特征和管理机制等。全面综合考虑这些因素方可查明河流受损的程度和原因,并据此明确河流治理修复的阶段和相应措施。即使对于一条河流的不同河段,也可能在河道比降、河道断面和平面形态等方面存在很大差异,而且各项功能在不同河段的满足(受损)程度也不尽相同。因此,在进行河流修复时,应该按照分段细化的原则进行考察,选择最具优先权的河段入手进行生态修复,通过局部细化与整体优化的结合达到满意的修复效果^[102]。

生物多样性原则是河流生态系统平衡和健康的基础。因此,河流生态修复应该遵循生态学中的生物多样性原则,在防止生物入侵的前提下,引入本土生物,构建生境廊道,保护和增加河流系统生物多样性。河流生态修复的结果应该带给人们美好的享受。应按照景观生态学原理,增加景观异质性,保留原河道的自然线形,运用植物以及其他自然材料构造河流景观。河流生态系统的复杂性决定了最终修复结果和演替方向的不确定性,从而使得河流生态修复具有周期长、风险大、投资高的特点。因此,必须按照综合效益最大化原则,从流域系统出发进行整体分析,将近期利益与远期利益相结合,通过费用效益分析对现有货币条件下的费用、效益进行比较,根据河流所处的治理修复阶段提出河流修复的最佳方案,获得最大的河流修复成效,实现社会、经济和生态环境效益的最大化^{[5][6][102]}。

利益相关者有效参与原则有助于最大限度地反映不同利益相关者的需求,使各方面的利益得以有效协调;同时,使生态修复计划得以顺利实施,使河流系统得以健康维护。

4 河流生态修复技术

河流生态修复的目标是恢复河流系统受损的各项功能,从而从根本上恢复河流系统的健康。河流系统健康最终由各项功能来体现,因而河流生态修复的技术也大多针对功能修复入手。河流生态修复的主要技术方法包括缓冲区恢复、植被恢复、河道补水、生物-生态修复、生境修复等技术。其中,生物-生态修复技术是目前河流生态修复的重要方法。

4.1 缓冲区恢复

缓冲区是河流与陆地的交界区域。缓冲区恢复的主要作用是为洪水让路,起到分蓄和削减洪水的功能。其次,河流与缓冲区河漫滩之间的水文连通性是影响河流物种多样性的关键因素。缓冲区还具有其他修复作用:将洪水中污染物沉淀、过滤、净化,改善水质;截留、过滤暴雨径流,净化水体;提供野生动植物的生息环境;保持景观的自然特征;为人类提供良好的生活、休闲空间等。

4.2 植被恢复

植被恢复是最普遍的河流修复的重要技术方法。植被可以通过影响河流的流动、河岸抗冲刷强度、泥沙沉积、河床稳定性和河道形态而对河流产生很大影响。同时,合理分布的植被还有助于减轻洪水灾害、净化水体,提供景观休闲场所和多种生态服务功能。河道补水则有利于增加河流流量,提供输沙、自净、供水和生态功能需水量。

4.3 生物-生态修复

生物-生态修复涉及诸多方面的技术,如人工曝气复氧、底泥污染控制、生物强化人工河道、自然河道生态塘、生态沟渠、生态

护岸和生态修复耦合系统等。

4.3.1 人工曝气复氧

人工曝气复氧可以增加河流的溶解氧浓度,加速水体复氧过程,使河流的自净过程处于好氧状态。曝气生态净化系统是在曝气生物塘和人工湿地的基础上将污水净化与资源化相结合的技术,它以水生生物为主体,辅以适当的人工曝气,建立人工模拟生态处理系统,高效降解河流水体中的污染物。

4.3.2 底泥污染控制

底泥污染控制能有效地阻止污染物在河流系统中的迁移。底泥原位掩蔽技术——通过隔离底泥与水体而防止污染物向水体迁移;底泥原位生物降解处理技术——利用水生植物和微生物相互配合,在原地直接吸收、降解底泥中的污染物;底泥异位处理——通过对底泥疏浚、转移,利用生物-生态修复技术对疏浚底泥进行无害化处理后加以利用。

4.3.3 生物强化人工河道、生态沟渠及生态护岸

生物强化人工河道是指结合水系疏通工程和结构现状,构建的以生物处理为主体的人工河道,水质净化设施主体设于河道内或河流一侧,形成多级串联式的生物净化系统,从而改善水环境条件。自然河道生态塘则是以太阳能为初始能源,在塘中种植水生植物,进行水产和水禽养殖,形成人工生态系统。通过多条食物链的物质迁移、转化和能量的逐级传递、转化,可净化河水中的有机污染物。

生态沟渠是指根据水生植物的耐污能力及生理特征,充分利用现有沟渠条件,在不同渠段选择利用砾间接触氧化、强化生物接触氧化等措施,逐级净化水质,在达到分级净化水质功能的同时,将净化设施与地表景观融为一体,美化河流景观。生态护岸则是利用石头、木材、多孔混凝土构件和自然材质制成的柔性结构等构建,对河岸进行加固,防止河道淤积、侵蚀和下切,同时为野生动物提供栖息地和隐蔽场所,保障自然环境和人居环境的和谐统一。

4.3.4 生态修复耦合系统

生态修复耦合系统是综合人工湿地、微生物及水生动物协同净化等原理设计的生态修复系统,可去除河流水体中的营养盐和有机物,从而达到修复河流水环境的目的。其在利用湿地植物的同时,构建新的水生植物系统;在美化景观的同时,合理配置生态系统营养级结构;利用多种微生物净化水体的同时,构建具有完整营养级结构的水生动植物生态系统;并利用动植物、微生物的协同作用改善河流水质。

1) 生境修复是河流生态修复的重要途径。浅滩-深塘结构是河流经自然发育后形成的常见河道形态,有利于稳定河床和岸坡,有助于植被的良好发育和构建多样性的生物栖息地。通过修复河道系统和营造浅滩-深塘结构,能够增加水中溶解氧量和促进河流自净功能的恢复,还可营造天然的河流景观。恢复裁弯河流,利用弯曲河流消耗河流能量、减少下游侵蚀、增加输水时间的特点,可强化河流的自净功能;同时恢复了河流的天然景观,并使河流拥有更复杂的动植物群落。德国巴伐利亚州有意识地将原来裁弯取直的河道改为弯曲河道,让河流保持自然状态。美国密歇根州也将恢复河流弯曲作为东南部 Rouge 河景观修复的主要措施。

2) 鱼道恢复是近年来河流系统生态修复中最受关注的问题之一。鱼类必须通过栖息地间的通道,进行每天的觅食活动以及不同生命阶段中更大范围的活动。这些活动在遇到大坝、水库等结构时会被阻断,从而导致鱼类的局部灭绝。西方国家在进行河



流修复时普遍注意了鱼类通道的重建。可以通过限制河流中建筑物的自由落差、限制下游坡度、降低流速、保持足够水深,以及修建石坡鱼道、鱼类分水槽、鱼梯等方法修复鱼类活动通道^{[5]306}。

3) 水生生物群落修复是指利用生态学基本原理以及水生生物的基础生物学特性,以人工和生物调控相结合的方式改善水体生态环境条件,通过引种移植、保护和生物操纵等技术措施,系统重建水生生物多样性。

河流生态修复技术的合理应用,使得河流的各项功能恢复到可以接受的程度,从而达到恢复河流系统健康的目标。对于特定的河流,应具体分析河流的主要功能以及它们之间的关系,明确各要素对诸项河流功能的重要性以及各项功能对河流系统健康的权重。功能分析的主要工作是在一定的约束条件下,明确受损河流功能和受损程度。修复方案的确定包括4个步骤:明确修复阶段,排列优先次序,制定修复措施,维护修复成果。在确定具体河流的受损功能、受损程度和河流所受的约束条件后,根据河流所处的阶段因地制宜地选择合理、有效的修复方法。

受损河流系统修复是一个十分复杂而且漫长的过程,各种措施带来的最终效果具有一定的不确定性。为了全面、谨慎地考虑各种可能的负面效果,避免或减小负面影响,必须对河流进行适时监测和评估,以便在必要时更改修复措施,调整和完善修复工程。另外,河流系统是个非常复杂的系统,它对各种措施做出的反应非常缓慢,这就需要对河流治理和修复给予长期、持续的关注,以便判断河流治理修复的成效并及时总结治理和修复工程的经验教训^{[5]179}。

5 结束语

河流和人类的关系大致经历了原始自然、工程控制、污染治理和生态修复4个主要阶段。由于在不同阶段河流主要功能的健康(或受损)程度和诸项功能的相对重要性不同,河流系统的健康状况不同,因而河流治理和修复的主要任务也有所不同。河流生态修复以恢复河流系统健康为目标,以满足社会、经济和生态环境需求为对象,以河流健康与河流系统诸功能之间的关系为主线,遵循自然循环、功能需求、生物多样性、效益最大化和利益相关者参与的基本原则,提供行之有效的河流生态修复技术。河流生态修复是一个多目标、多层次、多约束、多措施的复杂问题。只有对河流功能及其阈值和受损状况准确把握,才能对河流系统的

健康进行科学诊断,并据此提出不同阶段河流治理和生态修复的合理方法及技术。

参考文献 (References)

- [1] 倪晋仁, 马蔼乃. 河流动力地貌学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998.
- [2] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2002, 9: 14-19.
- [3] 钱正英, 陈家琦, 冯杰. 人与河流和谐发展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 1-5.
- [4] 叶正芳, 倪晋仁, 李彦锋, 等. 污水高效处理和资源化的固定化微生物技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(4): 332-337.
- [5] RUTHERFURD I D, JERIE K, MARSH N. A rehabilitation manual for Australian streams[R]. Land and Water Resources Research and Development Corporation, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 2000.
- [6] CAIRNS J, PRATT J R, PRATT R. Ecological restoration through behavioral change[J]. Restoration Ecology, 1995, 3(1): 51-53.
- [7] WILLIAMS T C, DEE P E. A citizen's approach to integrated river basin management[J]. Water Science and Technology, 1995, 32 (5-6): 169-174.
- [8] WEBB A A, ERSKINE W D. A practical scientific approach to riparian vegetation rehabilitation in Australia[J]. Journal of Environmental Management, 2003, 68: 329-341.
- [9] CARPENTIER S, MOILLERON R, BELTRAN C, et al. Quality of dredged material in the river Seine basin (France). II. Micropollutant[J]. The Science of the Total Environment, 2002, 299: 57-72.
- [10] 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J]. 水利学报, 2002(10): 1-7.
- [11] 罗华铭, 李天宏, 倪晋仁, 等. 多沙河流的生态环境需水特点研究[J]. 中国科学 E 辑, 2004, 34(增刊): 155-164.
- [12] PIRES A M, COWX I G, COELHO M M. Seasonal changes in fish community structure of intermittent streams in the middle reaches of the Guadiana basin[J]. Journal of Fish Biology, 1999, 54: 235-249.
- [13] JUNGWIRTH M, MUHAR S, SCHMUTZ S. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes[J]. Freshwater Biology, 2002, 47: 867-887.

(责任编辑 李向荣)

· 科技新闻 ·

我国大学生发现植物传粉新途径

6月22日,英国《自然》杂志刊登了一篇关于植物授粉的研究文章“传粉:一种兰花的自发授精策略”,文中报告了刘可为等人发现的一种兰花自花传粉的新途径,它是一种适应生态环境的繁衍策略。

长期以来,人们对植物自花传粉机制的认识是,传粉通常经由风、昆虫、重力等外部传递媒介来实现,而一旦生态环境发生变化,这些外部媒介全部丧失后,植物将如何实现正常繁衍进化或是就此消亡,一直没有定论。

刘可为等人发现一种兰花展现出了奇妙的机制。《自然》杂志的编辑介绍说,名为 *Holcoglossum amesianum* 的兰花表现出一种开花植物中以前我们不知道的授粉机制,神奇的是,这种雌雄同体的花能将自己的花粉囊旋转 360°,将花粉插入自己的柱头空腔中,而不需要任何授粉代理或媒介的帮助。该现象在无风、干旱条件下且昆虫很少的时候出现在中国云南省高海拔森林中的树干上,可能是植物对极端生存环境的一种适应。

令人惊讶的是,这篇研究文章的第一作者刘可为,系中国科学技术大学生命科学学院的本科二年级学生、清华大学深圳研究生院实习生,今年只有19岁。而《自然》杂志是世界顶级学术刊物,且较少刊登植物方面的研究文章。*H. amesianum* 兰花的独特传粉方式是2002年刘可为还是高中生时在深圳国家兰科植物种质资源保护中心发现的,后与专家经数年研究,终于确认了这是此前不为人知的、一种为适应环境而进化出的自花传粉机制。(本刊记者 黄永明)

