

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第9期 Vol.34 No.9 2014

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 9 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 基于土壤食物网的生态系统复杂性-稳定性关系研究进展 陈云峰,唐 政,李 慧,等 (2173)
- 滇西北高原入湖河口退化湿地生态修复效益分析..... 符文超,田 昆,肖德荣,等 (2187)
- 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究
..... 李阳兵,罗光杰,白晓永,等 (2195)
- 青藏高原东缘高寒草原有毒植物分布与高原鼠兔、高原麝鼠的相关性 ... 金 樑,孙 莉,崔慧君,等 (2208)
- 周边不同生境条件对茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构的影响..... 黎健龙,唐劲驰,黎秀娣,等 (2216)

个体与基础生态

- 三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性对凋落物分解的影响 葛晓改,肖文发,曾立雄,等 (2228)
- 芦苇、香蒲和蘆草 3 种挺水植物的养分吸收动力学 张熙灵,王立新,刘华民,等 (2238)
- 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响 ... 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等 (2246)
- 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (2256)
- 遮阴对米槠和杉木原位排放甲烷的影响..... 陈细香,杨燕华,江 军,等 (2266)
- 桔小实蝇和番石榴实蝇对 6 种寄主果实的产卵选择适应性..... 刘 慧,侯柏华,张 灿,等 (2274)
- 鼠尾草属东亚分支的传粉模式..... 黄艳波,魏宇昆,葛斌杰,等 (2282)

种群、群落和生态系统

- 养分资源脉冲供给对几种微藻种间竞争的影响 李 伟 (2290)
- 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价..... 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等 (2297)
- 黄土丘陵区植物功能性状的尺度变化与依赖 丁 曼,温仲明,郑 颖 (2308)
- 湘潭锰矿栎树叶片和土壤 N、P 化学计量特征 徐露燕,田大伦,王光军,等 (2316)
- 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素..... 阳伏林,张 强,王文玉,等 (2323)
- 尾矿区不同植被恢复模式下高效固氮菌的筛选及 Biolog 鉴定..... 李 雯,阎爱华,黄秋娟,等 (2329)
- 四川理县杂谷脑干旱河谷岷江柏造林恢复效果评价..... 李东胜,罗 达,史作民,等 (2338)

景观、区域和全球生态

- 闽南-台湾浅滩渔场二长棘鲷群体景观多样性 蔡建堤,苏国强,马 超,等 (2347)
- 面向土系调查制图的小尺度区域景观分类——以宁镇丘陵区中一小区域为例.....
..... 卢浩东,潘剑君,付传城,等 (2356)

气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响…………… 胡 玮,严昌荣,李迎春,等 (2367)

资源与产业生态

基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析…………… 刘 源,李向阳,林剑艺,等 (2378)

可持续生计目标下的生态旅游发展模式——以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例……………

…………… 王 瑾,张玉钧,石 玲 (2388)

荔枝树干液流速率与气象因子的关系…………… 凡 超,邱燕萍,李志强,等 (2401)

肿腿蜂类寄生蜂室内控害效能评价——以松脊吉丁肿腿蜂为例…………… 展茂魁,杨忠岐,王小艺,等 (2411)

城乡与社会生态

内蒙古草原人类福祉与生态系统服务及其动态变化——以锡林郭勒草原为例……………

…………… 代光烁,娜日苏,董孝斌,等 (2422)

基于农业面源污染分区的三峡库区生态农业园建设研究…………… 刘 涓,谢 谦,倪九派,等 (2431)

“交通廊道蔓延”视角下山地城市典型样带空间格局梯度分析…………… 吕志强,代富强,周启刚 (2442)

学术信息与动态

美国地理学家协会 2014 年会述评…………… 孙然好,肖荣波 (2450)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 280 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2014-05



封面图说: 峰丛洼地石漠化——峰丛主要分布在云贵高原的边缘部分及桂西、桂西北地区,相对高度一般为 200—300m,高的可达 600m 以上。在峰丛之间,岩溶洼地、漏斗、落水洞很发育,常形成峰丛洼地或峰丛漏斗的组合形态。峰丛洼地中的土地相当贫瘠,由于当地人们依靠这些土地种植庄稼为生,石漠化的发展趋势已经越来越明显。尤其在土地承载力低、人口压力大的区域石漠化相当严重,研究峰丛洼地耕地资源分布、土地利用强度和石漠化发育状况之间的机理,有助于从本质上认识石漠化的发生,对石漠化治理实施科学指导。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201308152084

黄艳波, 魏宇昆, 葛斌杰, 王琦. 鼠尾草属东亚分支的传粉模式. 生态学报, 2014, 34(9): 2282-2289.

Huang Y B, Wei Y K, Ge B J, Wang Q. Pollination Mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2282-2289.

鼠尾草属东亚分支的传粉模式

黄艳波, 魏宇昆*, 葛斌杰, 王琦

(上海辰山植物园, 中国科学院上海辰山植物科学研究中心, 上海 201602)

摘要: 简述了世界鼠尾草属传粉模式多样性, 从宏观层面对东亚鼠尾草属分布中心——中国的鼠尾草属传粉模式进行归纳与总结。研究补充了以往所缺乏的东亚鼠尾草属核心类群的雄蕊结构和传粉模式, 并提出雄蕊结构的可能进化方向。根据花器官形态、内部结构、雄蕊特征、花粉接触传粉昆虫的部位, 将中国分布的鼠尾草属植物划分为 3 种模式类型: Type I, 短药隔杠杆传粉模式 (short-lever type), 主要发生在弧隔鼠尾草亚属 (subg. *Salvia* Benth.), 其雄蕊药隔短, 属原始结构类型; Type II, 长药隔杠杆传粉模式 (long-lever type), 主要发生在荔枝草亚属 (subg. *Sclarea* Benth.), 雄蕊药隔明显伸长, 是典型的背部杠杆传粉结构; Type III, 退化杠杆传粉模式 (degraded-lever type), 主要发生在鼠尾草亚属 (subg. *Allagospadonopsis* Briq.), 花冠筒变短变窄, 雄蕊下臂明显退化, 传粉者无需进入冠筒即可取食花蜜, 花粉触碰昆虫头部, 进而杠杆作用弱化。研究表明, 鼠尾草属传粉模式的进化趋向于提高传粉者的专一性, 同时保证传粉过程的有效性、精确性和忠实性, 推测具有退化雄蕊下臂的 Type III 模式可能更为进化。比较美洲和地中海 2 个进化分支的雄蕊结构和进化趋势, 东亚多样性中心可能是一个独立的进化分支。毫无疑问, 雄蕊结构与花器官和传粉功能高度相关, 是适应传粉者的进化表型, 它的进化对东亚分支的物种辐射与多样性形成可能具有关键作用。

关键词: 鼠尾草属; 杠杆传粉模式; 花器官多样性; 适应辐射; 东亚

Pollination Mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China)

HUANG Yanbo, WEI Yukun*, GE Binjie¹, WANG Qi

Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201602, China

Abstract: *Salvia*, comprised of almost 1000 species, is the largest genus in the Lamiaceae family and an ideal model system to investigate biological diversity and adaptive radiation. Plant diversity of this species is manifested by the diversification of flower organs and pollination mechanisms, which may be driving forces of their origins and evolution. *Salvia* is characterized by a staminal lever mechanism which is key to pollen transfer. In *Salvia*, the two monothetic stamens are modified into levers with a thin ligament between the connective and the filament, forming a joint, which is then divided into upper and lower arms. This enables the stamen to reversibly transfer pollen. A pollinator searching for nectar must push back the lower lever arms to allow the pollen-sacs at the end of the upper lever arms to be pressed onto the pollinator's head or back. Then, the pollinator visits a subsequent flower of the same species to transfer pollen to the plant stigma. In *Salvia*, parallel evolution occurs in American and Eurasian centers of diversity, which have different pollinators but a similar evolutionary direction for *Salvia* pollination mechanisms. In China, *Salvia* are classified by three pollination mechanisms based on floral traits, staminal structure, and pollen deposition on the body of bees. Type I (short-lever type) is the original group in the subgenus *Salvia* Benth. with two fertile upper and lower lever arms. Type II (long-lever type), which is found in the subgenus *Sclarea* Benth., involves a staminal lever mechanism that is characterized by two posterior thecae that are not expressed and fused. Type III (degraded-lever type), which is found in the subgenus *Allagospadonopsis* Briq.,

基金项目: 上海市绿化和市容管理局资助项目 (G102404, F132423)

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2014-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ykwei@sibs.ac.cn

has a degraded staminal lever structure with two separated and thin sterile posterior thecae. We discovered that these three pollination types contribute to the geographical distribution in China of the three *Salvia* subgenera. Type I was mainly distributed in southwest China with the Hengduan Mountains as its diversity center. Type II was mainly distributed in central China including Guizhou, Chongqing, east Sichuan, west Hubei, the Qinling Mountains and the Dabie Mountains. Type III was mainly distributed in eastern and southern China; specifically, the Tianmu, Wuyi and Nanling Mountains are their distribution and diversity centers. Unique pollination mechanisms of each plant are based on two aspects of the staminal structures and their automatic movements. Staminal automatic movement was observed in some *Salvia* species with small flowers from Type II or Type III. In the corolla, some plant stamens can automatically and slowly make a downward, involuted movement during stamen ageing. Then, the stigma will finally occupy this position the mature stamens had occupied before to accept the pollen from other flowers of the same *Salvia* species. The evolution of *Salvia* pollination mechanisms gives rise to pollinator specialization, validity, accuracy, and fidelity. Type III plant species have shorter and narrower flower tubes; pollinators are not required to enter the tube to access nectar. Rather, the pollen can be deposited on the pollinator's forehead. Thus, the pollination pattern of Type III *Salvia* plants are more evolved in terms of energy-saving and specialization. Staminal lever mechanisms and floral structures involved in pollen transfer may be critical for adaptive radiation and speciation within *Salvia*. Future comprehensive species surveys and investigations into the floral structure of *Salvia* and their pollinators are needed to compare species across continents.

Key Words: *Salvia*; lever pollination mechanism; floral diversity; adaptive radiation; East Asia

鼠尾草属(*Salvia* L.)植物以富含多种芳香成分而著称,其含有的多种活性次生代谢产物在药物、食品、化妆品领域均有广泛的应用。本属是唇形科最大属和进化分支顶级^[1],约1000种左右,世界分布,具有雄蕊退化成2枚的特征,线形药隔并与花丝形成关节等花器官特征显示,鼠尾草的传粉结构为适应传粉生物而高度特化^[2]。美洲、地中海和东亚是鼠尾草属的3个多样性中心^[3],对叶绿体基因片段和雄蕊结构的分析初步证明,鼠尾草属的3个分布中心可能经历了平行进化(parallel evolution)过程。以往的研究只关注了美洲和地中海类群,而对东亚尤其是中国的鼠尾草属植物传粉生物学没有系统而完整地研究,对不同类群的雄蕊结构和传粉模式仍不清楚。本文基于对中国分布的鼠尾草属植物雄蕊结构和传粉过程的观察,结合植物的属下分布格局,在亚属水平上对其传粉模式的变化和可能的进化方向做了分析与讨论。雄蕊杠杆结构是否在东亚鼠尾草属物种辐射与多样性形成中具有关键作用,是值得进一步深入研究的问题,而对其雄蕊传粉结构功能的深入了解,对其适应性进化的阐明,将对该属植物雄蕊与传粉者在物种多样性形成和是否存在协同进化等研究提供有价值的参考。

1 鼠尾草属多样性的花器官与传粉模式

对鼠尾草属花器官的描述显示其花冠的长度差

异明显(4.5—130mm)、形态各异、颜色类型多样,雄蕊结构的细微变化可能改变植物的传粉模式,进而影响其繁育系统和物种多样性的形成,因此对花器官多样性形成及其功能研究尤为重要^[1]。鼠尾草属有高度特化的二强雄蕊,两个发育雄蕊药隔明显伸长将花粉囊分开,花丝与药隔连接处形成“关节”,将药隔分为上下臂,在传粉生物触动杠杆下臂向内运动时,整个雄蕊以“关节”为轴,上臂向下运动,将花粉涂抹在传粉者的背部完成传粉,是为典型的雄蕊背部杠杆传粉模式。除此之外,根据花丝和雄蕊长度,花丝与药隔比例,雄蕊上下臂花药发育状况,上下臂联合程度,雄蕊是否伸出花冠筒等特征又演化出多种雄蕊结构,形成多样化的传粉模式^[4-5]。鼠尾草属的二强雄蕊降低了雌雄蕊功能干扰的可能^[6],花粉输出效率更高^[7]。

鼠尾草属植物传粉模式按照花粉接触部位分为背部、腹部、体侧、额和翅部传粉,除背部传粉属于典型的杠杆模式外,另外几种杠杆通常弱化或完全退化;按照雄蕊的运动方式可分为被动位移与主动运动^[8],被动位移又可分为自上而下,自下而上和水平运动。鼠尾草属雄蕊主动运动只在少数类群中出现,某些类群的雄蕊随着花粉不断散播,伸长的药隔逐渐向下内卷,而后熟的雌蕊逐渐占据雄蕊花药原来的位置,接受传粉者带来的花粉。在某些情况下,

雄蕊的运动直接决定了访花者与花药(粉)接触的频率和精确性,影响着雌蕊的繁殖成效^[9]。

根据传粉生物,鼠尾草可分为虫媒和鸟媒两类传粉模式,虫媒以蜂类传粉为主,极少数为蝶、蝇或蛾类。对背部杠杆传粉模式的植物而言,雄蕊的结构保证了传粉的忠实性和可靠性。对于同域分布的几种鼠尾草,虽具有重叠的花期和传粉蜂,但可通过花冠的大小、杠杆的长度,控制花药触碰到蜂体的不同部位,通过机械隔离实现精确传粉,从而避免杂交^[10];另外,还可通过杠杆下臂先端联合形成的三维结构,迫使昆虫需推动下臂才能进入花冠取食花蜜,增加杠杆运动的稳定性,固定访花时昆虫取食花蜜的姿态,进一步保证传粉的可靠性和精确性^[11]。更为特化的例子如草地鼠尾草(*S. pratensis*)^[11]和丹参(*S. miltiorrhiza*)的雄蕊结构与传粉者的适应性进化,雄蕊下臂增大联合形成匙状,中间留一小孔,蜂只能通过口器深入小孔,推动下臂取食冠筒基部花蜜,同时保证雄蕊更稳定而规则地运动,将花粉有效地传播出去。

鸟媒的鼠尾草主要传粉者是蜂鸟^[12],根据传粉模式分为杠杆(92个种)和退化的杠杆结构两大类^[13-14]。一般认为鸟媒比蜂媒进化,鸟媒中的退化杠杆则比杠杆结构更进化^[1]。鸟媒的杠杆传粉是通过喙部推动杠杆运动,花粉借助鸟类的头部或前额传播。在退化杠杆模式中,药隔下臂紧贴冠筒上壁,缺少活动空间,药隔与花丝连接处也未发育成可自由运动的“关节”,雄蕊的杠杆作用消失,当蜂鸟进入冠筒取食花蜜时,雄蕊花药直接接触碰蜂鸟前额而完成传粉^[13]。

对于鼠尾草属植物的多样性分布和起源中心有不同见解。吴征镒等^[2]认为鼠尾草属是一个世界分布属,没有明显的分布中心,原始类群分布于地中海至中亚和墨西哥至美国南部,随后逐步扩散形成现在的分布格局^[15];Claßen-Bockhoff等人认为全世界有6个分布中心^[16],而Walker等人认为世界鼠尾草属有3个多样性中心^[3]。推测鼠尾草属起源于地中海和西亚^[2,16],也有可能起源于东亚^[17]。最近根据分子系统学和形态学分析表明,鼠尾草属并非是以以前认为的单系,而可能是在3个多样性中心经历了平行进化,3个进化分支分别与属外其他近缘类群构成独立的起源,雄蕊结构均从原始的杠杆结构演化

为更进化的形式^[18]。如美洲中心的蜂媒进化为鸟媒,由杠杆进化为非杠杆的传粉结构;地中海中心的原始杠杆结构进化为典型背部杠杆传粉结构等^[18]。鼠尾草属的物种数量远多于唇形科其他属,它们的雄蕊杠杆结构与传粉生物的适应性进化可能触发了该属的适应辐射和多样性的产生^[10],新物种时有发生^[19-25]。雄蕊结构可能是鼠尾草属起源和演化的关键性状,雄蕊结构与传粉生物的相互适应可能是其多样性产生的主要驱动力。

1.1 东亚(中国)类群的传粉模式其特征

1.1.1 东亚(中国)类群的分布格局与物种多样性

本研究发现,原产中国的弧隔鼠尾草亚属(subg. *Salvia* Benth.)、荔枝草亚属(subg. *Sclarea* Benth.)和鼠尾草亚属(subg. *Allagospadonopsis* Briq.)的分布区域有所不同。弧隔鼠尾草亚属(44种)除个别物种传播至华中、华北及华东部分地区之外,主要分布区在中国西南部的滇、川、藏地区,多样性中心为横断山区;荔枝草亚属(20种)分布区在云贵高原以东,南岭以北,燕山以南的华中至华东地区,多样性中心不明显,但以大别山—桐柏山—伏牛山和川东—湘鄂两个区域物种多样性较高;鼠尾草亚属(18种)以秦岭—淮河以南长江中下游的华东、华中及华南地区为主要分布区,以天目山—黄山—武夷山和南岭为多样性较高的区域。从3个亚属的分布核心区(图1)可以看出,尽管3个亚属的分布区有部分重

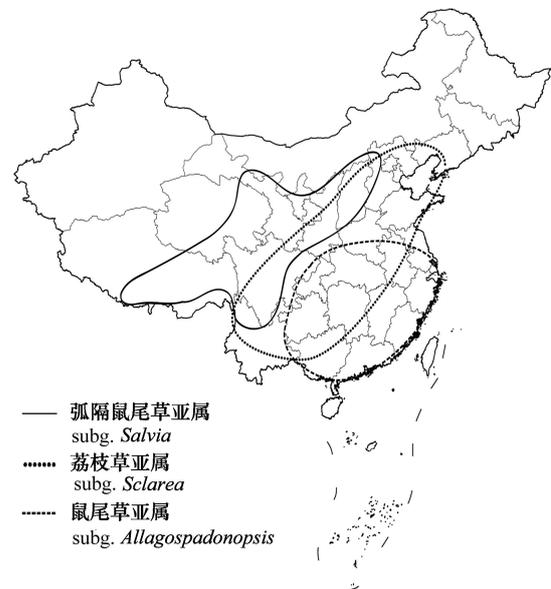


图1 中国鼠尾草属3个亚属的核心分布区示意图

Fig.1 The distribution pattern of three subgenera of *Salvia* in China

叠,但仍然呈现出从西南至华东逐步替代性的分布趋势;从物种多样性角度分析,西南物种多样性最高,华中地区的荔枝草亚属其次,华东分布的鼠尾草亚属物种多样性最低。

1.1.2 花部特征与传粉模式

东亚鼠尾草属花器官形态、颜色、大小,尤其是二强雄蕊的结构均表现出很高的多样性。笔者对中国分布鼠尾草属植物花器官的形态观察和解剖测量结果表明,3个亚属代表性物种的雄蕊结构和传粉模式明显不同,主要表现在花冠大小、雄蕊发育状况、

上下臂是否联合、药隔长度、药隔与花丝比例、药隔上下臂的比例等(表1),也是决定鼠尾草属传粉结构和功能的主要因素。除此之外,还有一些特殊形态的花器官结构,如莖叶鼠尾草(*S. sonchifolia*)和南川鼠尾草(*S. nanchuanensis*)的花冠筒明显变细增长呈管状;美丽鼠尾草(*S. meiliensis*)和河南鼠尾草(*S. honania*)的雌雄蕊完全伸出花冠之外,两个花药朝向内侧;荔枝草(*S. plebeia*)与佛光草(*S. substolonifera*)花冠的长度仅有5mm,雌雄蕊基本内藏于冠筒内等。

表1 中国鼠尾草属3种传粉模式

Table 1 Three types of pollination mechanism of Chinese *Salvia* species

性状 Characters	短药隔杠杆传粉模式 Type I (short-lever type)	长药隔杠杆传粉模式 Type II (long-lever type)	退化杠杆传粉模式 Type III (degraded-lever type)
轮伞花序花数量 No. of verticillaster flower	2—6	6或多花	2—多花
花冠形态 Corolla shape	花冠大型(长10—50mm),上唇多平伸短于冠筒	花冠大型或小型(长(4.5)—40mm),大型花冠上唇长于冠筒,直立近90°	花冠小型(长5—13mm)
雄蕊形态 Stamen shape	药隔弯成半圆形或弧形,花药内藏于上唇	药隔不为半圆形,上臂多少直伸,花药内藏于上唇	药隔不为半圆形,上臂多少直伸,花药多少外露
雄蕊发育状况 Stamen development status	上下臂花药均发育,上臂分离,下臂先端靠合	上臂花药发育、分离,下臂不育,先端明显增大、联合	上臂花药发育、靠合或分离,下臂不育,退化瘦小分离
药隔与花丝比例 Proportion of connective and filament	药隔比花丝短,或等长或稍长	药隔远长于花丝,常为2—10倍甚至更长	药隔远长于花丝,常为2—6倍
药隔上下臂比例 Upper and lower arm of connective	上下臂等长或上臂稍长	上臂远长于下臂	上臂远长于下臂
传粉模式 Pollination mechanism	以背部杠杆传粉模式为主,兼有其他模式	典型的雄蕊背部杠杆传粉模式	杠杆传粉模式弱化或退化
出现类群 Occurrence group	弧隔鼠尾草亚属 (subg. <i>Salvia</i> Benth.)	荔枝草亚属 (subg. <i>Sclarea</i> Benth.)	鼠尾草亚属 (subg. <i>Allagospadonopsis</i> Briq.)

根据花器官形态、内部结构、雄蕊特征、花粉接触传粉昆虫的部位,可将中国的鼠尾草划分为3种主要传粉模式。

Type I: 短药隔杠杆传粉模式(short-lever type),主要出现在弧隔鼠尾草亚属,药隔有一定伸长,但上下臂的花药均发育产生花粉。如圆苞鼠尾草(*S. cyclostegia*)具药隔增长的双药室雄蕊,药隔弧形,两端药室均发育,下臂花药顶端联合,传粉模式以背部杠杆传粉模式为主,兼有腹部等其他传粉模式(图2)^[26]。

Type II: 长药隔杠杆传粉模式(long-lever type),主要发生在荔枝草亚属,药隔显著伸长,雄蕊下臂不

育联合。以丹参(*S. miltiorrhiza*)为代表,具单药室(monothecate),下端药室退化不育,形成匙状增大,顶端联合,传粉模式为典型的背部杠杆传粉模式(图3)。

Type III: 退化杠杆传粉模式(degraded-lever type),主要发生在鼠尾草亚属,雄蕊下臂明显变小、萎缩,阻挡传粉者进入冠筒的杠杆作用弱化或退化。如铁线鼠尾草(*S. adiantifolia*),具单药室,下臂退化短小,不育且分离,据观察其传粉主要通过昆虫的头部进行,雄蕊结构的杠杆功能弱化,传粉模式为非杠杆的传粉模式(图4)。基于雄蕊结构、发育状况及进化程度,可将Type I(弧隔鼠尾草亚属)视为原始

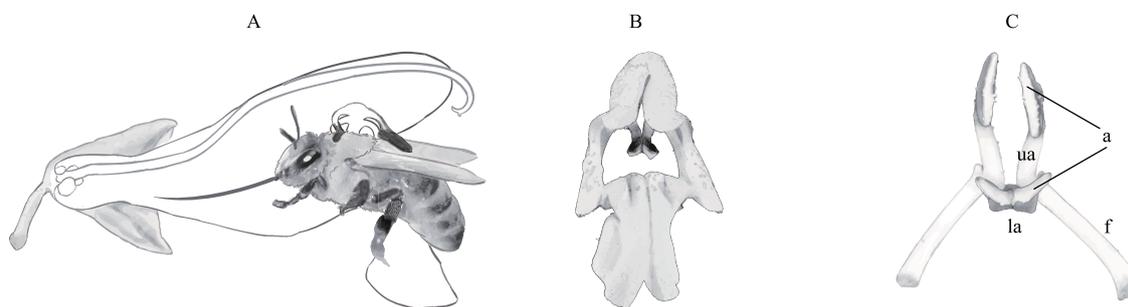


图2 短药隔杠杆传粉模式与雄蕊结构

Fig.2 The pollination mechanism and stamen structure of short-lever type

A. 传粉情况 Pollen transfer; B. 花冠筒正面观 A front view through the flower tube showing lower arms of stamens; C. 雄蕊结构兼示雄蕊可育靠合下臂 C. Stamen structure showing fertile upper and lower lever arms; Abbreviations: f, filament; a, anther; ua, upper arm; la, lower arm

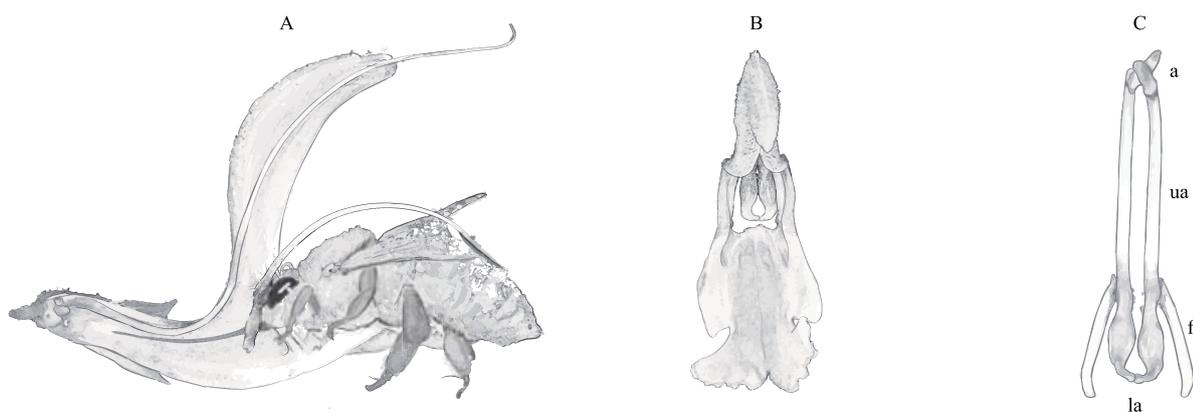


图3 长药隔杠杆传粉模式与雄蕊结构

Fig.3 The pollination mechanism and stamen structure of long-lever type

A. 传粉情况 Pollen transfer; B. 花冠筒正面观 A front view through the flower tube showing lower arms of stamens; C. 雄蕊结构兼示雄蕊不育联合下臂 Stamen structure showing fertile upper arms and fused sterile lower arms; Abbreviations: f, filament; a, anther; ua, upper arm; la, lower arm

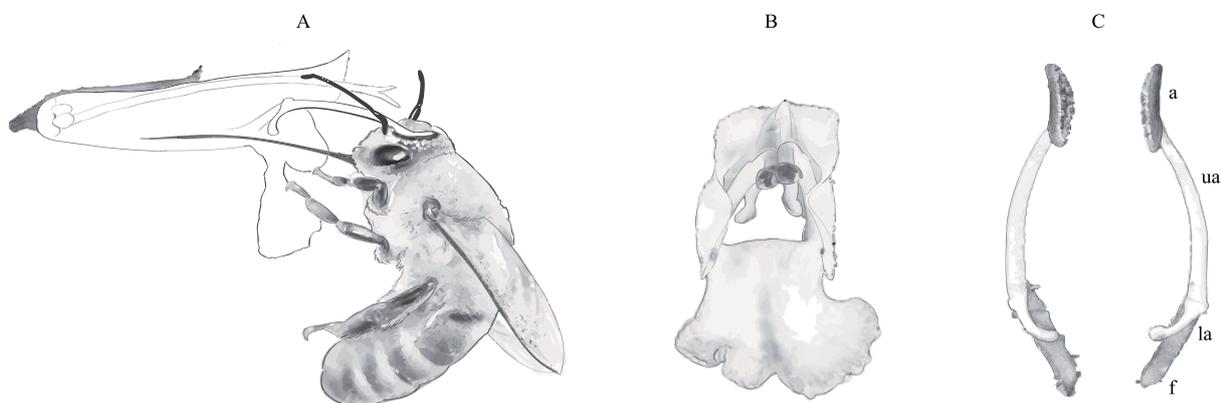


图4 退化杠杆传粉模式与雄蕊结构

Fig.4 The pollination mechanism and stamen structure of degraded-lever type

A. 传粉情况 Pollen transfer; B. 花冠筒正面观 A front view through the flower tube showing upper and lower arms of stamens; C. 雄蕊结构兼示雄蕊不育分离下臂 Stamen structure showing fertile upper arms and separated sterile lower arms; Abbreviations: f, filament; a, anther; ua, upper arm; la, lower arm

的杠杆传粉模式, Type II (荔枝草亚属) 是较进化的背部杠杆传粉模式, Type III (鼠尾草亚属) 尽管部分失去杠杆传粉功能, 但通过变窄的花筒开口、外露且相互靠合的花药, 使得昆虫吻部刚进入即接触其头部进行传粉, 比长杠杆 (需昆虫头部进入花筒触动杠杆) 更能适应访花时间短的小型昆虫, 从节省能量消耗以及传粉稳定性、专一性考虑, 可能是更为进化的传粉模式。

除了依靠昆虫传粉时的外力作用, 雄蕊发生被动位移之外, 还存在雄蕊的主动运动现象, 雄蕊的主动运动主要出现在鼠尾草亚属和荔枝草亚属中具小型花的物种当中。它们的雄蕊先于雌蕊成熟, 成熟具有花粉的雄蕊位于花冠筒的上部, 蜂取食花蜜时通过其前额带走花粉, 此时雌蕊尚未成熟而藏于花冠上唇, 在雄蕊逐渐从成熟至衰老过程中, 药隔上臂逐渐向下向内卷曲, 此时雌蕊逐渐成熟并占据之前雄蕊花药的位置, 以接受来自蜂携带的其他花的花粉, 从而完成异花授粉。任明迅认为雄蕊的缓慢运动可以巧妙地调整不同花期的雄蕊处于不同的空间位置, 可在不同阶段、不同位置分发花粉, 这可能是提高花粉输出与传粉准确率的一种适应机制, 促进了花的雄性功能; 同时, 雄蕊缓慢运动还可能提高调节雌雄蕊异位程度, 影响着花内雌雄蕊功能干扰、自交与异交水平等^[8-9]。

二强雄蕊的合生或离生在雄蕊结构中也有不同的进化适应意义和传粉功能差异^[27]。鼠尾草属的 3 个亚属雄蕊上下臂具有不同的发育及联合状况

(表 1)。如弧隔鼠尾草亚属可育上臂离生, 可育下臂花药靠合 (其中苜蓿叶鼠尾草上下臂的可育花药均靠合); 荔枝草亚属的可育上臂离生, 下臂不育花药合生; 鼠尾草亚属的上臂可育花药靠合, 下臂不育花药显著退化离生。雄蕊花药的合生状况是鼠尾草传粉功能的结构基础之一。Ren 与 Tang 认为, 雄蕊合生的好处在于通过聚集花药于同一位置, 可以有效地将花粉传播出去, 增加传粉者接触花粉的可能性和精确性, 延长接触花粉的时间^[27]。对于下臂不育联合的荔枝草亚属而言, 可能也有相同的进化选择优势。在鼠尾草亚属中, 大多数物种具有雄蕊上臂花药合生的现象, 传粉蜂无须进入花冠筒, 其前额便可稳定快速地触碰到花粉, 由于雄蕊形态和结构较为稳定, 雄蕊合生的不同方式以及合生程度可能也是重要的植物分类依据之一^[28]。

1.2 传粉模式的进化与扩散

基于杠杆状雄蕊的结构进化和系统发育过程, 推测 3 种雄蕊结构和传粉模式的进化方向可能是从短药隔杠杆向长药隔杠杆至退化的杠杆模式进行 (图 5), 而 3 种传粉模式的分布格局可为其进化方向提供证据, 也反映出雄蕊的进化历史和传粉模式的扩散方向 (图 1)。短药隔杠杆传粉模式 (Type I) 的雄蕊结构为原始模式, 花丝较长, 药隔伸长不明显, 上下臂均可育, 集中出现在中国西南横断山区, 该地区也是弧隔鼠尾草亚属的多样性分布中心, 仅有黄鼠狼花 (*S. tricuspis*) 向北扩散至山西和陕西中部, 阴生鼠尾草 (*S. umbratica*) 向东扩散至河北、安

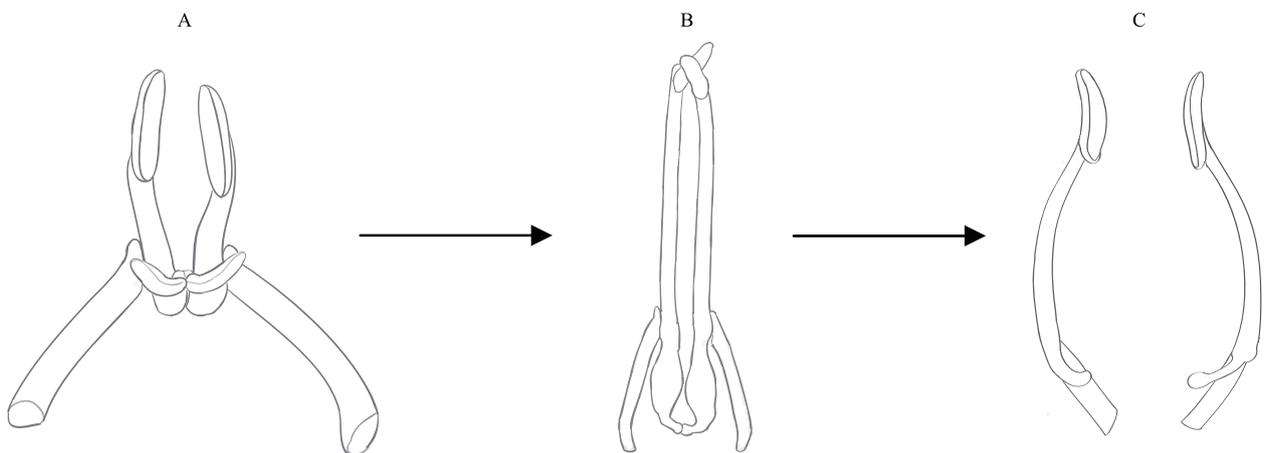


图 5 中国分布鼠尾草属植物雄蕊结构可能的进化途径

Fig.5 Hypothetical evolutionary trend of stamens in genus *Salvia* from China

A. 短药隔杠杆传粉模式 Short-lever type; B. 长药隔杠杆传粉模式 Long-lever type; C. 退化的杠杆传粉模式 Degraded-lever type

徽等省。从西南过渡到华中,传粉模式逐渐被长药隔杠杆传粉模式(Type II)所替代,花丝明显变短,药隔尤其是上臂显著伸长,下臂不育联合,具有此传粉模式的物种大多出现在大别山-桐柏山-伏牛山和川东-湘鄂两个区域。至华东和华南地区,传粉模式又逐渐被退化杠杆传粉模式(Type III)所替代,花冠明显变小,药隔下臂退化、缩小,下臂分离,杠杆传粉功能弱化甚至完全丧失,这种传粉模式以秦岭-淮河以南长江中下游的华东、华中及华南地区为主要分布区,物种多样性中心在天目山-黄山-武夷山和南岭地区。西南横断山区有可能是鼠尾草属东亚分支的起源中心,该区域鼠尾草的雄蕊结构保留了更多的原始特征,其中少数物种延伸分布至中国的中东部,而原始的短药隔杠杆传粉模式从西南横断山区向北、东、南3个方向,进化扩散形成长药隔杠杆传粉模式和退化的杠杆传粉模式。

2 研究展望

最近的研究认为鼠尾草属并非单系而是至少有3次独立的起源,分别在美洲、地中海至中亚和东亚,中国可能是东亚分支的起源中心^[3,19]。面对如此庞大而多样化的类群,目前的研究仅限于对少数传粉现象的描述,对东亚分支的鼠尾草属花器官多样性、传粉结构和传粉生物的适应性研究几乎没有涉及,急需开展大量的野外调查、形态解剖、传粉观察和定量分析等工作;对于东亚分支的雄蕊进化途径仍然未知,还需分子和形态两方面证据加以阐明。花内雄蕊的分化、运动以及进化适应在鼠尾草属物种形成中的研究价值显然比其他器官更为重要。雄蕊分化式样对传粉生态学、植物繁殖格局以及物种多样性形成的影响应该受到更多重视,也是传粉生物学的研究热点之一^[29];雄性功能的资源分配和雄性适合度的实现是塑造花部特征的重要因素,因此需要更加重视两性花的雄性功能及其在花部特征塑造与花进化上的贡献^[30]。鼠尾草属植物雄蕊的多样性无疑是较为理想的研究材料,未来还需要在完善鼠尾草物种多样性调查的基础上,深入系统地研究该区域鼠尾草属植物雄蕊结构及其与传粉生物的关系,结合对美洲和地中海两个分布中心鼠尾草属传粉模式的比较分析,期望阐明多样性传粉模式的进化方式及其所反映的物种多样性起源和方向。在已

知的中国84种鼠尾草属植物中^[31],仅对分布西南的圆苞鼠尾草(*S. cyclostegia*)传粉模式做过较深入的研究^[32],对其他物种的传粉模式尚不清楚。中国的鼠尾草属植物物种丰富,花器官形态和雄蕊传粉模式多样,加之气候及地质环境复杂,特有物种或极小种群的存在可能性相对较大。本文仅从宏观层面对中国分布鼠尾草属的雄蕊结构和传粉模式做了概况性分析和总结,今后将结合物种分布格局和传粉模式,从宏观和微观两个层面对其传粉生物学以及与传粉生物的适应进化进行系统与量化研究,以揭示雄蕊杠杆结构在东亚鼠尾草属物种辐射与多样性形成中的作用。

致谢:中国科学院武汉植物园任明迅博士对本研究给予帮助,刘欣雨女士帮助绘图,特此致谢。

References:

- [1] Wester P, Claßen-Bockhoff R. Pollination syndromes of New World *Salvia* species with special reference to bird pollination. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 2011, 98(1): 101-155.
- [2] Wu Z Y, Li X W. On the evolution and distribution in Labiatae. *Acta Botanica Yunnanica*, 1982, 4(2): 97-118.
- [3] Walker J B, Sytsma K J, Treutlein J, Wink M. *Salvia* (Lamiaceae) is not monophyletic: implications for the systematics, radiation, and ecological specializations of *Salvia* and tribe Mentheae. *American Journal of Botany*, 2004, 91(7): 1115-1125.
- [4] Zhang B, Sun S, Zhang Z Q, Li Q J. A review of the evolutionary and ecological significance of lever-like stamens. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 89-99.
- [5] Claßen-Bockhoff R, Crone M, Baikovay E. Stamen development in *Salvia* L.: homology reinvestigated. *International Journal of Plant Sciences*, 2004, 165(4): 475-498.
- [6] Ren M X. Intrafloral stamen differentiations and their adaptive significances. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 222-236.
- [7] Kudo G. Anther arrangement influences pollen deposition and removal in hermaphrodite flowers. *Functional Ecology*, 2003, 17: 349-355.
- [8] Ren M X. Stamen movements in hermaphroditic flowers: diversity and adaptive significance. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(7): 867-875.
- [9] Ren M X, Tang J Y. Up and down: stamen movements in *Ruta graveolens* (Rutaceae) enhance both outcrossing and delayed selfing. *Annals of Botany*, 2012, 110(5): 1017-1025.
- [10] Claßen-Bockhoff R, Speck T, Tweraser E, Wester P, Thimm S,

- Reith M. The staminal lever mechanism in *Salvia* L. (Lamiaceae): a key innovation for adaptive radiation? *Organism, Diversity & Evolution*, 2004, 4: 189-205.
- [11] Reith M, Baumann G, Claßen-Bockhoff R, Speck T. New insights into the functional morphology of the lever mechanism of *Salvia pratensis* (Lamiaceae). *Annals of Botany*, 2007, 100: 393-400.
- [12] Wester P, Claßen-Bockhoff R. Bird pollination in South African *Salvia* species. *Flora*, 2006, 201: 396-406.
- [13] Wester P, Claßen-Bockhoff R. Hummingbird pollination in *Salvia haenkei* (Lamiaceae) lacking the typical lever mechanism. *Plant Systematics and Evolution*, 2006, 257: 133-146.
- [14] Wester P, Claßen-Bockhoff R. Floral diversity and pollen transfer mechanisms in bird-pollinated *Salvia* species. *Annals of Botany*, 2007, 100: 401-421.
- [15] Wu Z Y, Sun H, Zhou Z K, Li D Z, Peng H. Floristics of seed plants from China. Beijing: Science Press, 2011: 120-121.
- [16] Claßen-Bockhoff R, Wester P, Tweraser E. The staminal lever mechanism in *Salvia* L. (Lamiaceae) — a review. *Plant Biology*, 2003, 5, 33-41.
- [17] Dieringer G, Ramamoorthy T P, Tenorio Lezama P. Floral visitors and their behavior to sympatric *Salvia* species (Lamiaceae) in Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, 1991, 13: 75-83.
- [18] Walker J B, Sytsma K J. Staminal evolution in the genus *Salvia* (Lamiaceae): molecular phylogenetic evidence for multiple origins of the staminal lever. *Annals of Botany*, 2007, 100: 375-391.
- [19] Donmez A. A new Turkish species of *Salvia* L. (Lamiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2001, 137: 413-416.
- [20] Celep F, Kahraman A, Dogan M. A new taxon of the genus *Salvia* (Lamiaceae) from Turkey. *Plant Ecology and Evolution*, 2011, 144(1): 111-114.
- [21] Huang X L, Li X W. Notes on *Salvia* Linn. in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1981, 19(2): 245-249.
- [22] Li X W. New plants from Hubei, China. *Bulletin of Botanical Research*, 1983, 3(3): 67-73.
- [23] Su S W, Shen Z A, He J Q. New species of the genus *Salvia* from Anhui. *Acta Botanica Yunnanica*, 1984, 6(1): 55-62.
- [24] He J Q. A new species of the genus *Salvia* from China. *Acta Botanica Yunnanica*, 1989, 11(4): 409-411.
- [25] Zhu Z Y, Min B Q, Wang Q L. Taxa nova *Salviorum labiatarum*. *Bulletin of Botanical Research*, 2011, 31(1): 1-3.
- [26] Zhang B, Sun S, Fang E Q, Bai X M. Evolutionary response of staminal lever mechanism of different species in *Salvia* to spatial variation in pollinators. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(7): 681-689.
- [27] Ren M X, Tang J Y. Anther fusion enhances pollen removal in *Campsis grandiflora*, a hermaphroditic flower with didynamous stamens. *International Journal of Plant Science*, 2010, 71(3): 275-282.
- [28] Ren M X. Stamen fusion in plants: diversity, adaptive significance, and taxonomic implications. *Journal of Systematics and Evolution*, 2008, 46(4): 452-466.
- [29] Huang S Q, Guo Y H. Progress in pollination biology. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 225-237.
- [30] Ren M X, Jiang X H, Zhang D Y. Some important questions in plant reproductive ecology. *Biodiversity Science*, 2012, 20(3): 241-249.
- [31] Li X W, Hedge I C. Lamiaceae//Wu Z Y, Raven P H, eds. *Flora of China*. Beijing: Science Press and St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 1994, 17: 196-223.
- [32] Zhang B, Claßen-Bockhoff R, Zhang Z Q, Sun S, Luo Y J, Li Q J. Functional implications of the staminal lever mechanism in *Salvia cyclostegia* (Lamiaceae). *Annals of Botany*, 2011, 107: 621-628.

参考文献:

- [2] 吴征镒, 李锡文. 论唇形科的进化与分布. *云南植物研究*, 1982, 4(2): 97-118.
- [4] 张勃, 孙杉, 张志强, 李庆军. 杠杆状雄蕊及其进化生态学意义. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 89-99.
- [6] 任明迅. 花内雄蕊分化及其适应意义. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 222-236.
- [8] 任明迅. 两性花的雄蕊运动: 多样性和适应意义. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 867-875.
- [15] 吴征镒, 孙航, 周浙昆, 李德洙, 彭华. 中国种子植物区系地理. 北京: 科学出版社, 2011: 120-121.
- [21] 黄秀兰, 李锡文. 鼠尾草属一些种类的增订. *植物分类学报*, 1981, 19(2): 245-249.
- [22] 李锡文. 中国湖北产新植物. *植物研究*, 1983, 3(3): 67-73.
- [23] 苏宋旺, 沈祖安, 何家庆. 安徽鼠尾草属新种. *云南植物研究*, 1984, 6(1): 55-62.
- [24] 何家庆. 中国鼠尾草属一新种. *云南植物研究*, 1989, 11(4): 409-411.
- [25] 祝正银, 闵伯清, 王秋玲. 唇形科鼠尾属新植物. *植物研究*, 2011, 31(1): 1-3.
- [26] 张勃, 孙杉, 方强恩, 白小明. 鼠尾草属不同物种的雄蕊杠杆机制对传粉者空间变异的进化响应. *植物生态学报*, 2012, 36(7): 681-689.
- [28] 任明迅. 植物雄蕊合生的多样性、适应意义及分类学意义初探. *植物分类学报*, 2008, 46(4): 452-466.
- [29] 黄双全, 郭友好. 传粉生物学的研究进展. *科学通报*, 2000, 45(3): 225-237.
- [30] 任明迅, 姜新华, 张大勇. 植物繁殖生态学的若干重要问题. *生物多样性*, 2012, 20(3): 241-249.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.9 May ,2014(Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on ecosystem complexity-stability relationships based on soil food web
..... CHEN Yunfeng, TANG Zheng, LI Hui, et al (2173)
- The ecological restoration effort of degraded estuarine wetland in Northwest Yunnan Plateau, China
..... FU Wenchao, TIAN Kun, XIAO Derong, et al (2187)
- The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression ...
..... LI Yangbing, LUO Guangjie, BAI Xiaoyong, et al (2195)
- Correlation between the distribution characteristics of poisonous plants and *Ochotona curzoniae*, *Myospalax baileyi* in the East of
Tibetan Plateau Alpine meadow ecosystem JIN Liang, SUN Li, CUI Huijun, et al (2208)
- Effects of the surrounding habitat on the spider community and leafhopper population in tea plantations
..... LI Jianlong, TANG Jingchi, LI Xiudi, et al (2216)

Autecology & Fundamentals

- Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area
..... GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (2228)
- Kinetics of nutrient uptake by three emergent plants, *Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Scirpus triquetra*
..... ZHANG Xiling, WANG Lixin, LIU Huamin, et al (2238)
- Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii*
plantation HU Qiwu, NIE Lanqin, ZHENG Yanming, et al (2246)
- Effects of shrub (*Caragana microphalla* Lam.) encroachment on water redistribution and utilization in the typical steppe of Inner
Mongolia PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (2256)
- Effects of shadowing on methane Emissions from *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata*
..... CHEN Xixiang, YANG Yanhua, JIANG Jun, et al (2266)
- Oviposition preference and offspring performance of the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* and guava fruit fly *B. correcta*
(Diptera: Tephritidae) on six host fruits LIU Hui, HOU Bohua, ZHANG Can, et al (2274)
- Pollination Mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China)
..... HUANG Yanbo, WEI Yukun, GE Binjie, et al (2282)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of resource pulse supply on interspecific competition of a few algal species LI Wei (2290)
- Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns
..... LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, et al (2297)
- Scale change and dependence of plant functional traits in hilly areas of the loess region, Shaanxi Province, China
..... DING Man, WEN Zhongming, ZHENG Ying (2308)
- N and P stoichiometry of *Koeleria paniculata* leaf and soil in Xiangtan Manganese Mine wasteland
..... XU Luyan, TIAN Dalun, WANG Guangjun, et al (2316)
- Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau
..... YANG Fulin, ZHANG Qiang, WANG Wenyu, et al (2323)
- Isolation and Biolog identification of the high-efficiency azotobacter from iron tailing under different vegetation restoration modes
..... LI Wen, YAN Aihua, HUANG Qiuxian, et al (2329)
- Assessing effects of *Cupressus chengiana* plantations in the dry valley of Zagunao River, Li county of Sichuan Province
..... LI Dongsheng, LUO Da, SHI Zuomin, et al (2338)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape diversity of *Paerargyrops edita* Tanaka stock in Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground CAI Jiandi, SU Guoqiang, MA Chao, et al (2347)
- Landscape classification in a small area for soil series survey and mapping: a case study in the Ningzhen hills, China LU Haodong, PAN Jianjun, FU Chuancheng, et al (2356)
- Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the north china plain HU Wei, YAN Changrong, LI Yingchun, et al (2367)

Resource and Industrial Ecology

- Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen City based on LMDI method LIU Yuan, LI Xiangyang, LIN Jianyi, et al (2378)
- Evaluation index system of sustainable livelihoods ecotourism strategy: a case study of wangjiazhai community in baiyangdian wetland nature reserve, Hebei WANG Jin, ZHANG Yujun, SHI Ling (2388)
- Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters FAN Chao, QIU Yanping, LI Zhiqiang, et al (2401)
- Evaluation on control efficiency of bethylid parasitoids on pest insects indoor: a case of *Sclerodermus* sp. (Hymenoptera: Bethylidae) ZHAN Maokui, YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, et al (2411)

Urban, Rural and Social Ecology

- The dynamic change of herdsman well-being and ecosystem services in grassland of Inner Mongolia: take Xilinguole League as example DAI Guangshuo, NA Risu, DONG Xiaobin, et al (2422)
- The construction of the eco-agricultural yards in three gorges reservoir area based on agricultural non-point source pollution zones LIU Juan, XIE Qian, Ni Jiupai, et al (2431)
- Spatial pattern gradient analysis of a transect in a hilly urban area in China from the perspective of transportation corridor sprawl LÜ Zhiqiang, DAI Fuqiang, ZHOU Qigang (2442)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 于贵瑞 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 9 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 9 (May, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元