

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 15 期 Vol.31 No.15 **2011**

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 31 卷 第 15 期

2011 年 8 月 (半月刊)

目 次

地面节肢动物营养类群对土地覆被变化和管理扰动的响应·····	李锋瑞,刘继亮,化伟,等 (4169)
两种书虱微卫星富集文库的构建及比较·····	魏丹丹,袁明龙,王保军,等 (4182)
菲律宾蛤仔 EST-SSRs 标记开发及不同地理群体遗传多样性·····	闫喜武,虞志飞,秦艳杰,等 (4190)
菲律宾蛤仔大连群体不同世代的遗传多样性·····	虞志飞,闫喜武,杨霏,等 (4199)
玻璃温室与田间栽培小麦幼穗分化的比较·····	姜丽娜,赵艳岭,邵云,等 (4207)
施用有机肥环境下盐胁迫小麦幼苗长势和内源激素的变化·····	刘海英,崔长海,赵倩,等 (4215)
黄土高原半干旱区气候变化对春小麦生长发育的影响——以甘肃定西为例·····	姚玉璧,王润元,杨金虎,等 (4225)
不同耕作模式下稻田水中氮磷动态特征及减排潜力·····	冯国禄,杨仁斌 (4235)
大田环境下转 Bt 基因玉米对土壤酶活性的影响·····	颜世磊,赵蕾,孙红炜,等 (4244)
短期淹水培养对水稻土中地杆菌和厌氧粘细菌丰度的影响·····	朱超,Stefan Ratering,曲东,等 (4251)
气候变化背景下广东晚稻播期的适应性调整·····	王华,陈新光,胡飞,等 (4261)
长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响·····	何念鹏,韩兴国,于贵瑞 (4270)
黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力·····	刘迎春,王秋凤,于贵瑞,等 (4277)
植物叶表面的润湿性及其生态学意义·····	石辉,王会霞,李秧秧 (4287)
长白山北坡主要森林群落凋落物现存量月动态·····	郑金萍,郭忠玲,徐程扬,等 (4299)
古尔班通古特沙漠及周缘 52 种植物种子的萌发特性与生态意义·····	刘会良,宋明方,段士民,等 (4308)
吉首蒲儿根的繁殖生态学特性及其濒危成因·····	邓涛,陈功锡,张代贵,等 (4318)
栖息地永久性破坏的比例对物种多度稳定值影响的迭代算法·····	时培建,戈峰,杨清培 (4327)
喷施多效唑提高麻疯树幼苗耐盐性的生理机制·····	毛轶清,郑青松,陈健妙,等 (4334)
阿尔山落叶松主要蛀干害虫的种群空间生态位·····	袁菲,骆有庆,石娟,等 (4342)
2009 年云南省白背飞虱早期迁入种群的虫源地范围与降落机制·····	沈慧梅,吕建平,周金玉,等 (4350)
中华稻蝗长沙种群的生活史及其卵滞育的进化意义·····	朱道弘,张超,谭荣鹤 (4365)
“518”油桃主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	施晓丽,毕守东,耿继光,等 (4372)
青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化·····	张洪芝,吴鹏飞,杨大星,等 (4385)
青海可鲁克湖水鸟季节动态及渔鸥活动区分析·····	张国钢,刘冬平,侯韵秋,等 (4398)
排放与森林碳汇作用下云南省碳净排放量估计·····	刘慧雅,王铮,马晓哲 (4405)
北京城市生态占水研究·····	柏樱岚,王如松,姚亮 (4415)
专论与综述	
植物水分传输过程中的调控机制研究进展·····	杨启良,张富仓,刘小刚,等 (4427)
环境介质中的抗生素及其微生物生态效应·····	俞慎,王敏,洪有为 (4437)
自然生态系统中的厌氧氨氧化·····	沈李东,郑平,胡宝兰 (4447)
研究简报	
山东半岛南部海湾底栖动物群落生态特征及其与水环境的关系·····	张莹,吕振波,徐宗法,等 (4455)
新疆乌伦古湖浮游甲壳动物的季节演替及与环境因子的关系·····	杨丽丽,周小玉,刘其根,等 (4468)
不同施肥与灌水量对槟榔土壤氮挥发的影响·····	卢丽兰,甘炳春,许明会,等 (4477)
学术信息与动态	
水土资源保持的科学政策:全球视野及其应用——第 66 届美国水土保持学会国际学术年会述评·····	卫伟 (4485)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 320 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 34 * 2011-08



封面图说: 塞罕坝地处内蒙古高原南缘向华北平原的过渡带,地势分为坝上、坝下两部分。解放初期,这里是“飞鸟无栖树,黄沙遮天日”的荒原沙丘,自 1962 年建立了机械化林场之后,塞罕坝人建起了 110 多万亩人工林,造就了中国最大的人工林林场。这是让人叹为观止的落叶松人工林海。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

石辉,王会霞,李秧秧. 植物叶表面的润湿性及其生态学意义. 生态学报, 2011, 31(15): 4287-4298.

Shi H, Wang H X, Li Y Y. Wettability on plant leaf surfaces and its ecological significance. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4287-4298.

植物叶表面的润湿性及其生态学意义

石 辉^{1,*}, 王会霞¹, 李秧秧²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:植物叶表面的润湿性是各种生境中常见的一种现象, 表现了叶片对水的亲和能力。叶面的润湿性可以通过测定气、固、液界面的接触角大小确定, 接触角 $\theta < 110^\circ$ 的为润湿, $\theta > 130^\circ$ 的为不润湿, 表现出斥水性。影响叶片润湿性的主要因素有叶面蜡质含量与形态, 叶面绒毛数量、质地、形态和分布方式, 气孔和表皮细胞形态和大小, 叶水分状况等。叶表面的化学组成和形态是影响叶润湿性的主要内在原因, 但外界环境的变化通过影响表面的结构和形态来影响叶润湿性。叶面的润湿性是植物叶片截流降水的微观基础, 水分在润湿性强的叶面上铺展呈膜; 在不润湿的叶面上形成水珠, 容易在风和重力的作用下离开叶面; 铺展的水膜, 又会对叶的光合作用产生重要的影响。不同润湿性的叶面, 滞留、吸附、过滤各种大气污染物数量不同; 这些污染物沉降在叶片表面, 与叶面发生相互作用, 从而改变叶面的润湿性。植物叶含水量的高低对叶感染病菌有重要的影响, 在病菌感染期间如果叶表面完全润湿则有利于病菌侵染; 一旦病菌侵染, 又会对叶面结构造成破坏, 需要考虑润湿性能对防治病虫害的农药液滴持留的影响。对于润湿性小、斥水性大的植物, 其叶表面表现出一定的自清洁功能; 根据这些高疏水性、具有自清洁性的植物叶面特征, 可利用或借鉴生物学信息进行仿生设计或制造新的功能材料。润湿性作为固、气、液三相作用的综合结果, 是认识植物界面关系的微观基础, 对于植物叶面生态功能的认识具有重要的意义。

关键词:植物叶面; 润湿性; 斥水性

Wettability on plant leaf surfaces and its ecological significance

SHI Hui^{1,*}, WANG Huixia¹, LI Yangyang²

1 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

Abstract: Leaf wettability, indicating the affinity for water on the leaf surface, is a common phenomenon for plants in a wide variety of habitats. The contact angle (θ) of water on leaves measured at the gas, solid and liquid interface is an index of surface wettability, $\theta < 110^\circ$ for hydrophilic and $\theta > 130^\circ$ for hydrophobic. The main factors affecting leaf wettability include the wax content and crystal forms, the number and distribution of trichomes, and the shape and size of stomata and epidermal cells. The chemical composition and structure of leaf surfaces are internal causes, but the external environment can also influence wettability by affecting the structure and composition of the surface. The main ecological functions affected by leaf wettability are photosynthetic rate, interception of precipitation, pathogen infection and environmental quality. Precipitation interception on foliage surfaces is affected by high wettability as water droplets form a layer of film on the surface that is relatively easy retained on leaves. For low wettability or water-repellent leaves, water on the surface produces droplets that are more easily removed by wind and gravity. The spreading water film on leaves with high wettability can decrease photosynthesis due to high CO_2 diffusion resistance through water to stomata. Differences in leaf wettability can influence the amount of air pollutants that can be captured, absorbed, and filtrated by leaf surfaces; however, if air pollutants injure the leaf surface, a dramatic change in leaf surface wettability may result. For bacterial pathogens, a completely wettable leaf surface can make the leaf more susceptible to infection. Once the bacteria are disseminated, leaf

基金项目:国家自然科学基金项目(31070541); 国家林业局林业公益性行业科研专项(200904056); 陕西省重点学科培育学科项目资助

收稿日期:2011-03-07; **修订日期:**2011-06-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shihui06@126.com

wettability is changed, and may have some impacts on the retention of pesticide droplets used for disease control. Leaves with low wettability repel water and show some self-cleaning characteristics. Some new biomimetic functional materials are designed or manufactured on the basis of plant leaf surface properties with higher hydrophobic materials to enhance leaf self-cleaning. Wettability as a comprehensive response at the solid, gas and liquid phase interface of leaves and as such is important for understanding ecological functions of plants.

Key Words: leaf surface; wettability; hydrophobic

润湿是固体表面一种流体代替另一种流体的过程,一般所说的润湿主要指水在固体表面替代空气的过程^[1]。植物叶表面的润湿性是各种生境中常见的一种现象,表现了叶片对水的亲和能力;与润湿相对应的是不润湿——即斥水性。植物叶表面的润湿性对滞留、吸附、过滤大气污染物^[2-3]、截留降水^[4]、感染病虫害^[5-6]具有重要的影响;同时为工程仿生设计或制造提供生物学信息^[7]。研究植物叶润湿性对认识叶面的生态功能具有重要的理论和实践价值,本文对植物叶表面的润湿性研究做一综述。

1 植物叶表面润湿性的判断指标和测定方法

1.1 植物叶表面润湿性的判断指标

接触角是固、液、气三相交界处,自固—液界面经液体内部到气—液界面之间的夹角,通常以 θ 表示,是润湿性最为直接的一个表征指标(图 1)。固体表面液滴接触角是固体、液体、气体交界面表面张力平衡的结果,光滑表面上处于稳定或亚稳定状态的液滴接触角服从 Young 方程^[8]:

$$\gamma_{LG} \cos \theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (1)$$

式中, γ_{LG} 、 γ_{SG} 、 γ_{SL} 分别为与液体的饱和蒸汽呈平衡时液体的表面自由能(表面张力)、固体的表面自由能(表面张力)及固液间的界面自由能(界面张力); θ 为材料的本征接触角。

自然界中大多数生物表面都是非光滑表面,这种非光滑状态可以改变叶表面的润湿性,其接触角是表面的非光滑结构与表面的疏水物质共同作用的结果。Wenzel^[9]认为,由于非光滑表面的存在,实际的固、液接触面积大于表观几何上观察到的面积,表观上增加了疏水性(或亲水性)。可引入表征固体表面平整程度的表面粗糙度系数 r (液固真实接触面积和表观接触面积的比率)修正 Young 方程,描述表面粗糙度对润湿性的影响。

$$\cos \theta_w = r \cos \theta \quad (2)$$

式中, θ 是液体在光滑表面上的接触角; θ_w 是在表面粗糙因子为 r 的同种固体上的接触角, r 是表面粗糙度系数。对于粗糙表面,由于液固真实接触面积大于表观接触面积,因此 $r > 1$ 。当 $\theta > 90^\circ$ 时, $\theta_w > \theta$, 且 θ_w 随 r 的增大而增大;当 $\theta < 90^\circ$ 时, $\theta_w < \theta$, 且 θ_w 随 r 的增大而减小。因此,固体表面粗糙性对润湿性的影响取决于该固体材料表面的固有润湿性。

对大多数植物叶面而言,可以通过测定其固、液界面的接触角大小判断润湿性大小。按照界面化学的一般原则, $\theta < 90^\circ$ 为润湿, $\theta > 90^\circ$ 为不润湿,如果接触角远远大于 90° 则表现为斥水特征^[1]。但在叶表面润湿性研究过程中,根据研究目的的不同,不同的研究者采用了不同的标准。Rosado 等^[10]将接触角 $\theta < 40^\circ$ 认为是超级润湿, $40^\circ < \theta < 90^\circ$ 是高度润湿;而 Crisp^[11]将接触角 $\theta < 110^\circ$ 认为是经常所说的润湿,而 $\theta > 130^\circ$ 的认为不润湿,表现出斥水性;而 Yoshimitsu^[12]则进一步划分为 $130^\circ < \theta < 150^\circ$ 为斥水, $\theta > 150^\circ$ 为高度斥水。

1.2 接触角的测定方法

量角法是最常用的接触角测定方法^[2-4, 13-17],其原理是直接观察固体表面上稳定的平衡液滴、液体中附着

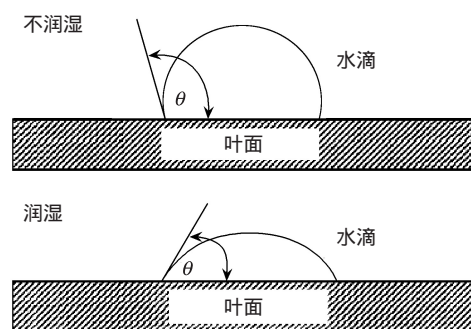


图 1 植物叶面接触角示意图

Fig. 1 The sketch of contact angle

于固体表面上气泡的外形,量算接触角大小,该方法具有直观简便的优点。在接触角测定中,不同的研究者所采用蒸馏水体积从 0.2 μL 到 50 μL 不等^[2-4, 13-17];对于针叶,叶表面较小,一般采用较小的液滴;阔叶可以采用较大的液滴测定,但液滴过大,在重力的影响下疏水性表面的接触角会降低,亲水性的表面接触角变化不明显^[17-18]。大量研究表明,液滴体积为 1—10 μL 时所测定的接触角与液滴体积无关^[17]。

2 植物叶表面润湿性的影响因素

植物叶表面的润湿性主要决定于叶片化学组成、微观几何结构和叶片的水分状况等主要内在原因,如蜡质含量、蜡质晶体形态及其疏水性质,叶片表面的绒毛数量、质地、形态和分布方式,气孔和表皮细胞形态和大小等^[2, 19-23]。外界环境的变化通过影响叶片表面的结构和形态影响叶面的润湿性,如植物外部的非生物因素往往影响叶表皮蜡质的合成与分泌、绒毛和气孔的发育^[24-27]。蜡质的成分会因各种水和干旱胁迫、臭氧和酸雨、水冲洗、磨损、污染物等的出现发生改变^[28-30]。空气成分的改变及温度、光照、降水等植物赖以生存的微环境条件在很大程度上会影响气孔^[26-27, 31-32]以及绒毛的特性^[25]。

2.1 蜡质

植物蜡质是覆盖在植物表皮细胞外的一层由亲脂性化合物构成的疏水层,其主要组分是脂肪族化合物、环状化合物和甾醇类化合物等^[24]。植物表皮的蜡质成分及形态在不同的种,同一个种的不同生长阶段都有变化^[24, 33-34]。随外部环境条件的不同,蜡质含量及成分各有不同^[33-36]。蜡质一般是不亲水的,其主要组分如链烷、酮、伯醇、仲醇、固醇等的接触角介于 94—109°^[37],故在不考虑其他因素影响的情况时,叶表面的润湿性主要取决于蜡质的有无、角质层与蜡质层的厚度以及角质与蜡质的比例。

Haines 等^[38]发现叶表面有大量蜡质覆盖的刺槐 (*Robinia pseudo-acacia*) 和北美鹅掌楸 (*Liriodendron tulipifera*) 的正面具有高的接触角,分别为 (131.6 $\pm$ 2.3)°、(124.8 $\pm$ 1.6)°,而表面蜡质较少的梁子菜 (*Erechtites hieracifolia*) 叶正面的接触角较小,为 (70.1 $\pm$ 2.7)°。Hanba^[39]等对蚕豆 (*Phaseolus vulgaris*) 和豌豆 (*Pisum sativum*) 叶表面润湿性的研究表明,蚕豆叶表面较豌豆易润湿,这与豌豆叶表面沉积的大量蜡质有关。Hall 和 Burke^[40]研究了新西兰的 52 种植被,发现接触角最高的为雪草 (*Chionochloa rigida*) 的背面,最低的为葡萄石韦 (*Pyrrosia serpens*) 的背面;高接触角叶面都有大量的蜡质沉积。Cape 等^[41]发现,从德国西南到苏格兰东北部的欧洲云杉 (*Picea abies*) 和欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 叶表面的润湿性随针叶表面的蜡质增加而降低,随叶面尘埃数量的增加而增加。Takamatsu 等^[42]的研究也发现,日本雪松 (*Cryptomeria japonica*) 叶片表面的蜡质由于不同生境的影响以及生长期的延长而导致叶面蜡质含量的变化;污染环境中叶面蜡质含量降低,润湿性增加;二年生雪松叶面蜡质含量降低,润湿性较一年生雪松增强。对于不同生境下的松树 (*Pinus monticola*) 幼苗,叶表面蜡质的数量与润湿性关系密切^[43]。疏水的银杏 (*Ginkgo biloba*) 叶表面以及橡树 (*Quercus robur*) 成熟叶表面密被蜡质晶体,而易润湿的山毛榉 (*Fagus sylvatica*) 叶表面仅有零星蜡质分布^[2]。

一些研究者借助有机溶剂去除叶面蜡质研究表皮蜡质对润湿性的影响。Burton 和 Bhushan^[44]将超疏水的莲 (*Nelumbo nucifera*) 和芋 (*Colocasia esculenta*) 叶表面蜡质用有机溶剂丙酮去除后测定接触角发现,去除蜡质后这 2 种植物叶面的接触角均下降到 90°以下。他们认为叶化学组成物质本身是亲水的,由于疏水的蜡质以及表面的突起而产生了疏水性。Boyce 等^[45]将疏水的香脂冷杉 (*Abies balsamea*) 叶表面的蜡质去除后接触角也明显降低,而亲水的红云杉 (*Picea rubens*) 接触角反而增大。王会霞等^[21]的研究也发现,表皮蜡质去除后大部分物种叶面接触角明显减小,尤其是疏水性强的物种;而亲水的加杨 (*Populus canadensis*) 背面、桃树 (*Prunus persica*) 正面、栎树 (*Koelreuteria paniculata*) 背面蜡质去除后接触角反而增大。研究表明,叶表面的蜡质去除后物种的接触角增大一般不会超过 100°^[21, 45]。叶表面蜡质去除后接触角变化与有机溶剂破坏叶面结构和本身的物理特性,并在叶表面产生的多孔结构有关^[45]。

虽然一些研究结果表明植物叶片的润湿性随蜡质含量的升高而降低,但接触角与蜡质含量之间并不呈简单的线性关系^[21, 46],说明蜡质对叶润湿性的影响除受含量的影响外,还与蜡质单元体形态结构、化学组成等因素有关。表皮蜡质分为外层蜡质和内层蜡质,外层蜡质一般会形成自组装的蜡质晶体^[28],往往形成二维微

米级和三维纳米级的粗糙结构^[47-48],这些微结构对叶润湿性具有重要影响^[49-51]。Barthlott 等^[49]利用扫描电子显微镜观察了多种植物表皮蜡质的形态结构,并将蜡质的微观形态结构分为柱状、管状、垂直片状、线状等 26 类,而片状和管状是最主要的类型。在自然界,最典型的是以莲叶为代表的植物叶表面,其接触角一般在 150°以上,具有超疏水的特性;此类表面上除具有疏水的化学组分外,更重要的是微观尺度上具有的微细粗糙结构。在电子显微镜下,莲叶表面具有双层微观结构,即由微米尺度的细胞和其上的纳米尺度的蜡质晶体两部分组成(图 2),基于二维微米级和三维纳米级的双重结构,莲叶与水的接触角高达 160°以上^[44, 52]。芋叶表面分布有大量大小为 8—10 μm 的微凸体,而单个微凸体是由许多纳米结构的材料堆积而成,且其下表层分布了直径为 20—50 nm 的针状结构纳米微颗粒,这样的双层结构微凸体与疏水的蜡质共同作用导致芋叶表面与水的接触角可达 160°^[7, 44](图 3)。稻米叶面的微凸体呈矩阵状分布,其微米结构的微凸体直径大约为 5—8 μm ,次表层分布了直径为 20—50 nm 的针状结构纳米颗粒,水滴与其表面的接触角为 $(157\pm 2)^\circ$ ^[7](图 4)。因此,蜡质对植物叶表面润湿性的影响是蜡质单元体形状、结构、分布密度、化学组成及含量等因素的综合结果。由于植物表皮的蜡质成分及存在形态在不同的种、同一个种的不同生长阶段都有变化,这可部分解释物种之间叶表面润湿性的差异及润湿性的时间分布特征。

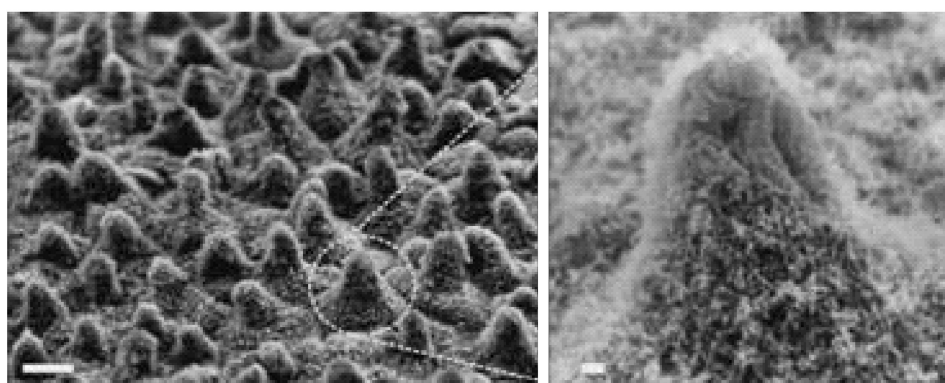


图 2 莲叶表面 SEM 图(左:标尺 10 μm ;右:标尺 1 μm)^[52]

Fig. 2 SEM images of the leaf surface of lotus (Left: scale bar 10 μm , Right: scale bar 1 μm)^[52]

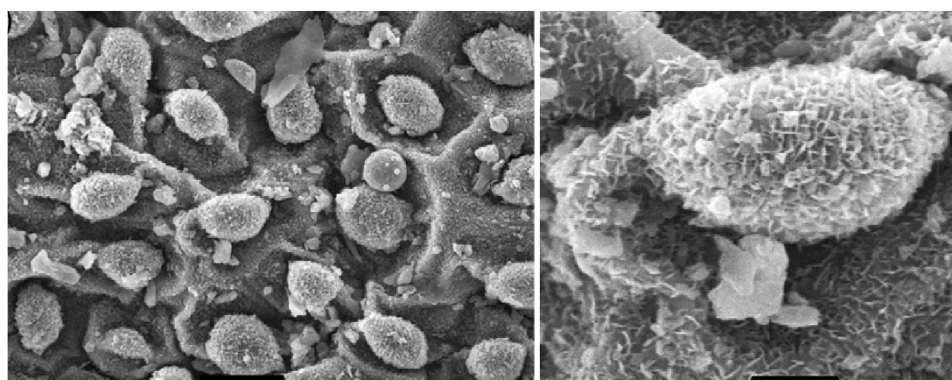


图 3 芋叶表面 SEM 图(左:标尺 20 μm ;右:标尺 5 μm)^[7]

Fig. 3 SEM images of the leaf surface of taro (Left: scale bar 20 μm , Right: scale bar 5 μm)^[7]

2.2 绒毛

叶面绒毛是植物体表的一种结构,是植物对环境条件适应的一种表现,具有重要的生理生态意义^[53-55]。叶面绒毛的形态和密度受生境影响较大,干旱环境中植物叶面绒毛较湿润环境多^[15, 56],环境污染胁迫也能导致叶面绒毛形态、数量等发生变化^[25]。具有绒毛的叶面情况复杂,绒毛的分布密度、形态、质地和类型都将直接影响叶表面的润湿性。

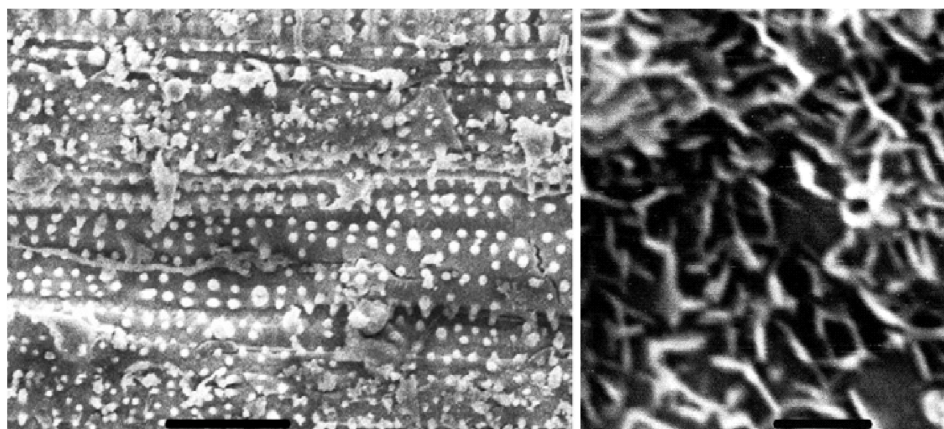


图4 稻米叶表面 SEM 图(左:标尺 50 μm ;右:标尺 1 μm)^[7]

Fig. 4 SEM images of the leaf surface of rice (Left: scale bar 50 μm , Right: scale bar 1 μm)^[7]

Brewer 和 Smith^[57]发现大豆叶面绒毛的分布密度和分布方式导致叶润湿性的差异;稀疏分布绒毛的叶面接触角小,而密被绒毛的叶面具有高的疏水性。Brewer 和 Smith^[58]对山区和亚山区 50 种植物叶润湿性的研究表明,叶面绒毛密度和接触角存在显著的正相关关系。翠菊(*Callistephus chinensis*)、线麻(*Cannabis sativa*)和蚊子草(*Filipendula palmata*)叶下表面均具有不同形态或规律或均匀分布的绒毛,这种特殊的结构使它们具有超疏水性^[59]。王淑杰等^[60]的研究发现,表皮绒毛对叶润湿性的影响非常复杂,密生表皮毛的翠菊接触角高达 139°,而密生柔毛的绣线菊(*Spiraea salicifolia*)叶面接触角仅为 97°;同样着生刺毛的野莲(*Nelumbo nucifera*)正面和翠菊反面,刺毛的形态不同而导致它们具有不同的润湿性,呈凸状且具蜡质的野莲正面的接触角为 150°,而翠菊反面的接触角为 97°。Kumar 等^[46]的结果也表明具有高绒毛密度的西南牡蒿(*Artemisia parviflora*)具有强的疏水性($\theta > 140^\circ$),而绒毛密度低的叶片接触角则较小。Brewer 等^[61]和 Pandey 和 Nagar^[14]认为绒毛密度大的叶面具有大的接触角,并依据绒毛密度将植物叶面分为低绒毛密度的易润湿,中等绒毛密度的中等润湿以及高绒毛密度的不润湿 3 种类型。当绒毛密度 >25 个/ mm^2 时可能会形成绒毛冠层,从而使叶片具有极强的疏水性。

Brewer 等^[58, 61]将水滴与绒毛之间的作用方式分为 3 种类型:一是较低密度的绒毛并不影响水滴的滞留或润湿;二是较低密度的针状长绒毛刺破了水滴表面易诱导水滴分散成膜;三是高密度绒毛可能形成绒毛冠层促使叶表水滴成珠(图 5)。杨晓东等^[62]发现苘麻(*Abutilon theophrasti*)和菊芋(*Helianthus tuberosus*)叶面上分布有细长毛刺,其接触角仅为 $(43 \pm 2)^\circ$ 、 $(46 \pm 2)^\circ$ 。王会霞等^[21]也发现,榆叶梅(*Prunus triloba*)叶正面分布有少量的针状长绒毛,叶面的接触角为 $(84.8 \pm 12.3)^\circ$;表面密被细小绒毛的国槐(*Sophora japonica*)和悬铃木(*Platanus acerifolia*)叶正背面均具有强的疏水性。叶面上较长的针状绒毛刺破了水滴表面而使水分易于浸入毛刺基底部位,起到了引流的作用,加快了水滴的铺展,从而表现出良好的亲水性能。疏水情形则是由于突起单元长细比值较小,毛状体突起单元由于表面较“钝”未能刺破浸入表面的水膜,使凸包与水膜间产生气泡,水膜被“抬起”,从而表现出疏水性提高。一旦去掉绒毛,悬铃木和广玉兰(*Magnolia grandiflora*)的接触角都发生了显著变化,广玉兰甚至降低了近

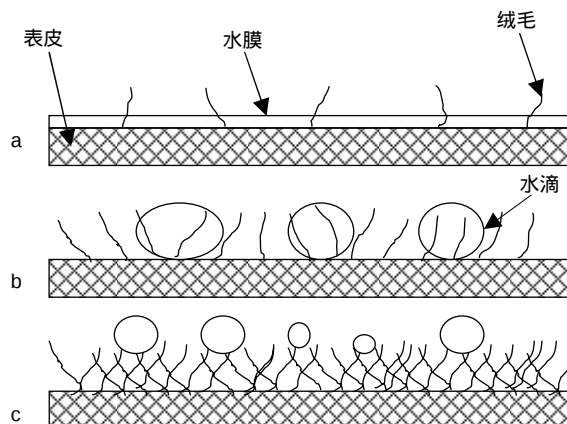


图5 绒毛与水之间的相互作用^[58, 61]

Fig. 5 Types of trichome interactions with water^[58, 61]

a. 低绒毛密度不影响叶面上水的滞留或润湿;b. 较低密度的绒毛刺破了水滴表面;c. 水分在高密度的绒毛上形成水珠

60°^[21, 63]。Neinhuis 和 Barthlott^[64]对 200 种疏水植物叶面微结构的研究发现,绒毛表面是否有蜡质是影响叶润湿性的重要因素。绒毛上无蜡质的物种其疏水性仅维持极短的时间,数分钟后水滴将刺穿绒毛而导致润湿性的变化;而绒毛上有蜡质的物种,即使绒毛长达 2 mm 或稀疏的分布,其疏水性仍能维持较长时间。

2.3 气孔密度

一般认为陆生植物叶下表皮气孔密度大于上表皮,气孔的数量、排列和位置随植株种类和生活环境而不同。气孔的数量和分布特征对植物生命活动具有重要影响,也是造成植物叶片润湿性差异的重要原因之一。一些研究发现植物叶正背面具有不同的润湿性,通常情况下背面接触角高于正面^[4, 14-15, 21, 40, 58],这与气孔的分布特征一致。Brewer 和 Nuñez^[15]的研究结果表明,植物叶表面气孔密度较大的物种具有较强的疏水性。Pandey 和 Nagar^[14]、王会霞等^[21]的研究也显示气孔密度大的叶面具有较强的疏水性。但气孔密度与润湿性之间并不呈简单的线性关系。Juniper 和 Jeffree^[65]、Brewer 和 Smith^[57]和 Kumar 等^[46]在不同的植物上都曾发现过叶面的润湿性与气孔密度没有显著的相关性。

2.4 表皮细胞

一般认为表皮细胞形态对叶润湿性的影响随表皮细胞突起的梯度呈负相关变化。Haines 等^[38]发现凸状表皮细胞表面覆盖蜡被的北美鹅掌楸疏水性较单一因素存在时疏水性增强。突起表皮细胞覆盖蜡质的银杏叶疏水性较表皮细胞平滑覆蜡被的橡树叶疏水性强,二者不同的表面结构是整个生长期叶润湿性变化差异的主要因素^[2]。小檗(*Berberis*)和柔毛羽衣草(*Alchemilla mollis*)表皮细胞呈光滑均匀或微凸状,接触角较小;莲、芋、海芋(*Alocasia macrorrhiza*)等物种表面分布有大量乳头状突起,尤其是莲叶表面,其表皮细胞凸起且密度达到了 3431 个/mm²,使其与水滴的接触面积较光滑表面降低了 92.8%,具有超疏水的性质^[19]。王淑杰等^[60]发现表皮细胞凹凸不平且被蜡质的翠菊、野莲和旱金莲(*Tropaeolum majus*)叶表面接触角大。

表皮细胞形态对叶润湿性的影响随表皮细胞突起的梯度呈负相关变化并不是绝对的。Neinhuis 和 Barthlott^[64]对多种超疏水植物叶面的扫描电镜观察发现,表皮细胞突起从 5 μm 到 100 μm,但其接触角没有明显变化;因此认为叶表皮蜡质晶体的形态结构以及绒毛上蜡质的有无对润湿性的影响可能更明显。

2.5 叶水分状态

在宏观尺度上,干旱生境中植物趋向于有低湿润性的特点^[4, 15];在微观尺度上,叶水分状况影响湿润性则比较复杂。Fogg^[23]发现在离体叶中,随叶子萎蔫,接触角变化很大,一旦叶膨压恢复,接触角即可恢复;因此他认为叶接触角呈现典型的日变化(可高达 30°),这种日变化与叶含水量变化有关,其主要原因是叶失水之后出现了各种褶皱。而 Weiss^[22]研究了 3 种不同叶表面结构的植物叶水势变化对叶正面接触角的影响,发现食用豆(起皱、相对无蜡质的表面,*Phaseolus vulgaris*)和大豆(起皱、无蜡质但表面附有稠密的绒毛,*Glycine max*)叶正面接触角呈现日变化;而具有相对光滑蜡质表面的紫苜蓿(*Medicago sativa*)接触角几乎不变。在充分灌水的条件下,3 种不同叶面结构的物种接触角变化不大。

2.6 其他因素

除上述介绍的几点影响因素之外,植物叶面的润湿性还与叶龄^[45]、叶在树冠的位置^[10, 45]、叶面附生生物^[5, 17, 66]、植物生长的海拔高度^[67]、污染物^[25, 68]等因素有关。

3 植物叶面润湿性研究的生态学意义

3.1 对光合速率的影响

一个小的水滴可以覆盖 25 mm²的区域,其中包含的气孔多达上万个,由于 CO₂在空气中的扩散速率是水中的 10000 倍^[69],因此润湿性的不同导致水分是否在叶面形成水膜,对植物光合作用的影响很大。Hanba 等^[39]发现在高空气湿度情况下,疏水性的大豆叶气孔导度增加 12.5%,1, 5-二磷酸核酮糖羧化酶(Ribulose biphosphate carboxylase oxygenase, Rubisco)含量变化不明显,对 CO₂的吸收速率增加了 28%;而亲水性的豌豆叶气孔导度和 Rubisco 含量分别下降 16%、55%,对 CO₂的吸收速率降低了 22%。Brewer 和 Smith^[57]发现叶面露水造成叶光合速率的降低;具有较大接触角不易润湿的叶面,水珠与叶面的接触面积小,对光合作用的

影响较小;易润湿的叶面,水分呈水膜或斑块状,与叶面的接触面积大,被水覆盖的气孔相对较多,导致光合速率下降的较多。在昼夜温差和湿度较大的环境中,露水的形成是非常普遍的,因此浮水植物和挺水植物的光合速率可能对叶的润湿性更为敏感^[70];Madsen 和 Sand-Jensen^[71]认为叶面的润湿性对于水生植物的浮水叶进化可能非常重要。在亚高山环境,露水和雾可一直持续至整个早晨,而此时间段的植物水分状况和环境条件更适合光合作用,亚高山植被表现出随润湿增强而光合速率降低的趋势,同时在叶表面干燥后迅速达到原来的水平^[70]。Smith 和 McClean^[72]认为,许多陆生植物在生育期内经常遇到雨、雾、露水等润湿叶面的过程,植物叶面的斥水性(不润湿)可能是植物从水生环境到陆生环境进化过程的一个重要途径。

3.2 对降水截留的影响

植物冠层截留降水是个重要的生态水文过程,直接影响雨水在生态系统中的循环。对一次降雨事件,冠层截留率变化很大,最高可近 70%,受植被类型、年龄、密度、叶面积指数、降水强度、降水量、风速等多种因素的影响^[73]。在叶面尺度上,叶的润湿特征不同导致水分在叶面存在状态的差异。在润湿性强的叶面上水珠容易铺展,形成一层水膜,这样水分既相对容易保留在叶面上;不润湿的叶面上水分形成水珠,容易在风和重力的作用下离开叶面^[4];植物叶面的润湿性成为降水截留重要的微观基础。植物叶面对不同形态水分的持留能力不同^[4, 38],从而对冠层截留产生影响。Hall 和 Burke^[40]观察了降水过程中水分在叶面的存在状态,发现接触角大于 90°的不润湿叶片表面几乎没有水滴,接触角介于 49—70°之间的叶面上水分多以水膜状态存在,而接触角在 70—90°的叶面上水分则以水膜和水滴共存的状态存在。Bradley 等^[74]对 18 种三叶草的研究发现,最大持水量变化于 110—360 g/m²,大叶能截留较多水量且叶湿润的时间较长。Haines 等^[38]发现易润湿的叶面具有较大的持水量,而不易润湿的叶片由于表面附属物、蜡质晶体等的作用而具有低的持水能力。Brewer 和 Smith^[58]发现林下、林缘及开阔环境中的植物叶面的润湿性以及露珠截留量明显不同;开阔环境中植物叶面接触角最大,对露珠的截留量也最大,为 60—250 g/m²;林缘次之,截留量为 20—60 g/m²;而林下植物最小,截留量一般在 10 g/m²以下。Tanakamaru 等^[75]发现,大麦幼叶的持水能力明显低于老叶,认为可能的原因是幼叶表面蜡质的含量高于老叶而导致润湿性的差异。在植物地带分布的特征上,随不同干旱梯度植物趋向于有低润湿性和低持水能力的特点,有利于根际水分的补充;干旱地区植物叶面低的润湿性可能是植物对环境的一种适应性调试^[4, 15]。

3.3 对病菌感染的影响

许多致病孢子只有在适宜的水分条件下才能在叶片上萌芽并侵染到植物体内,植物叶面上的水分是病菌生长所必需的重要水分来源^[24, 76];一般认为叶面过多的水分增加了植物遭受病虫害的几率^[5, 46, 73]。当表面超级润湿($\theta < 40^\circ$)时,黑腐病(*Phyllosticta ampellicida*)孢子几乎不能在植物叶表面粘附;而接触角大于 80°的葡萄(*Vitis vinifera*)叶面则极易感染黑腐病^[77]。Bunster 等^[5]发现,小麦叶片被恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)感染之后,叶面的润湿性显著增加;叶面的高润湿性可以降低叶面菌落数量。Knoll 和 Schreiber^[17]认为改变核桃(*Juglans regia*)叶表面的润湿性,可影响附生微生物的存在。Huber 和 Gillespie^[78]在对植物叶面润湿性和表皮病菌感染的关系中指出,露水持留时间的长短受气候、叶面润湿性、种植结构的影响。Cook^[79]发现,花生(*Arachis hypogaea*)叶片不润湿时,极少感染花生锈病(*Puccinia arachidis*)。Pinon 等^[6]在杂交杨树锈病感染研究中发现,锈病与雾以及叶面的润湿性之间有密切的关系,叶润湿性可以作为杨树抗病的一个特性指标。Kumar 等^[46]研究发现不同品系的茶叶感染病菌几率与叶面的润湿性、叶面微形态结构、表面化学组成密切相关。叶面无绒毛或具低绒毛密度、蜡质和酚含量高、较小接触角的物种易受病菌感染。Woo^[43]在 14 种针叶上也发现蜡质的数量和形态对叶面润湿性有重要的影响,建议这些特征可以作为抗松疱锈病(*Cronartium ribicola*)的指标。在粮食作物小麦上,小麦条锈病(*Puccinia striiformis*)感染期间如果叶片完全润湿则有利于病菌侵染^[80];一旦侵染病菌,又会对叶片的表面结果造成破坏^[5]。为了防治病虫害,各种农药被大量使用,其有效性的与农药液滴在叶面停留的时间密切相关,叶片的润湿性能又会对液滴的持留产生重要的影响^[80]。

3.4 对环境污染的响应

植物叶片在改善空气质量方面具有重要的作用,同时叶片的结构和功能又会受到空气质量的影响,导致叶面润湿性的变化^[81-83]。Adams 和 Hutchinson^[84]研究了暴露于酸雨中的卷心菜(*Brassica oleracea*)、甜菜(*Beta vulgaris*)、萝卜(*Raphanus sativus*)和向日葵(*Helianthus annuus*)叶片特征,发现接触角较小的萝卜和向日葵对酸雨起到了中和的作用,而不易润湿的卷心菜和甜菜叶片截留的雨水 pH 值反而降低。易润湿的向日葵和萝卜更易受酸雨的影响,酸雨胁迫加速了叶面营养物质的流失。Percy 和 Baker^[85]研究了不同模拟酸雨影响下的菜豆(*Phaseolus vulgaris*)、蚕豆(*Vicia faba*)、豌豆和芸苔(*Brassica napus*)的叶子从萌芽到全部展开的叶面特征;发现所有的叶子在低 pH 值模拟酸雨胁迫下,接触角要小于高 pH 值模拟酸雨胁迫下的接触角。其中的原因可能是酸雨改变了表面的蜡质结构和表皮膜的特性、降低了叶面的粗糙率,从而导致离子吸收通道的改变^[29]。臭氧是城市光化学烟雾的一种主要组分,若植物长期暴露在臭氧污染的环境中,会使叶表面的蜡质层破坏,润湿性增强,加速叶面水分的散失^[68]。Neinhuis 和 Barthlott^[2]对 3 种不同润湿性的植物整个生长季滞留颗粒物的能力以及润湿性进行了研究,发现不易润湿的银杏在整个生长季接触角均保持在 130—140°之间,其滞尘能力在整个生长季均较小,表现出“自洁”的润湿特性。橡树叶片在生长初期接触角高达 110°,但随着生长期的延长接触角明显降低,其滞尘能力也随着润湿性的增强而增强。亲水性的山毛榉叶片在整个生长季润湿性没有明显变化,其滞尘能力因叶面的易润湿而较强。Cape^[41]等在对欧洲退化和健康的欧洲云杉和苏格兰松的研究中指出整株暴露于环境中的植株更能反应环境状况,特别是欧洲云杉与空气污染等环境因子的关系更为密切;接触角等叶面特征结合长期环境影响因子,可以作为一个地区森林退化风险的评价工具。Takamatsu 等^[42]在日本的研究发现,暴露于污染环境中的雪松叶面沉积有大量的颗粒污染物质,这些颗粒物质与叶面发生相互作用加速了叶表皮蜡质的破坏,从而导致润湿性的增加,加速了叶水分散失和营养物质的流失。在城市环境中,各种废气和颗粒物质对植物形成了多污染源影响的综合效应,Pal 等^[25]发现在较高交通流量下叶面蜡质受到损坏;与低交通流量环境下生长的同种植物相比,角质层褶皱,绒毛密度增大且绒毛增长。

4 在仿生材料上的应用

润湿性小、斥水性大的植物,其叶片表现出一定的自清洁功能。以莲叶为代表的多种植物的叶面接触角高达 150°,具有高疏水性、自清洗性和低滞后性^[86],这一现象被称为“莲荷效应”^[64]。植物表面这一独特的特性,在生物工程方面产生了巨大反响,借助这一成果,科研人员设计制造出具有不粘水和 not 粘油功能的表面材料^[62]。Fürstner 等^[87]以自然界中的超疏水植物叶面为模板,用有机硅复制了叶面的微结构,得到了形貌与天然叶面相似的各种人造表面,其表面接触角大于 150°而滚动角在 7—12°之内。Guo 和 Liu^[7]得到了具有微—纳米二级结构的铝合金和铜合金粗糙表面,其接触角分别达到了 $(161\pm 2)^\circ$ 、 $(170\pm 2)^\circ$ 。Lee 等^[88]采用紫外纳米压印技术(Ultraviolet Nanoimprint Lithography, UV—NIL)得到了接触角为 142°的超疏水表面。Ma 等^[89]将聚苯乙烯-聚二甲基硅氧烷嵌段共聚物的四氢呋喃和二甲基甲酰胺乳液静电纺丝植入基板,得到由直径为 150—450 nm 超细纤维组成的立体网状结构,这种粗糙表面与水的接触角可达 163°。Sun 等^[90]通过热分解酞菁铁与酞菁钇在石英玻璃片上生长出碳纳米管阵列,经 $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ 表面修饰,得到超疏水—超疏油的双疏表面,其与水的接触角为 171°,与菜籽油的接触角为 161°。Rao 等^[91]将甲基三甲氧基硅烷、氨水、甲醇按一定比例混合后置于高压釜中,在达到超临界态后闪蒸,甲基三甲氧基硅烷之间脱水缩合发生交联,并在基板上生长出具有一定结构的凝胶,形成接触角高达 173°的超疏水表面。这些利用或借鉴生物表面润湿信息进行仿生设计或制造成为全球热点课题,在不粘水和 not 粘油的功能材料研究方面取得了巨大的进展,并被应用于玻璃的防污、雷达、天线表面信号的衰减、人体植入材料的表面涂层等各个方面。

5 结语

植物叶片的润湿性是各种生境中常见的一种现象,影响植物叶的光合作用、降水截留、病菌感染、环境质量,从而影响生态系统的生物多样性和生物量、养分和水分平衡、生物地球化学循环以及生产力。但在这方面

的研究中,主要是生物信息专家通过研究不同植物润湿性的差异及其与表面结构的关系进行生物仿生设计,环境学家研究污染对植物润湿性的影响;对于植物润湿性的生态学意义研究相对缺乏。如植物叶表面的润湿性空间格局可为现有的区域生物地球化学循环模型与植被地理模型的耦合提供科学依据,有助于从机理上解释区域植被对全球环境的适应与响应机制。在干旱地区,斥水性的植物有利于根际水分的补充;在多雾地区,叶面斥水有利于维持较高的光合速率;同时叶面的润湿性也可作为环境的指示指标。

植物叶面是植物-大气相互作用的关键生态界面,在生态系统生物多样性形成与维系,物质、能量交换过程中发挥着重要的作用,该界面与液态水之间的相互作用一直是植物学家研究的热点。润湿性作为植物固、气、液三相作用的综合结果,是认识植物界面关系的微观基础。

References:

- [1] Gu T R, Zhu B Y, Li W L, Ma J M, Dai L R, Cheng H M. Surface chemistry. Beijing: Science Press, 1994, 359-388.
- [2] Neinhuis C, Barthlott W. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak, and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability. *New Phytologist*, 1998, 138(1): 91-98.
- [3] Wang H X, Shi H, Li Y Y. Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3077-3082.
- [4] Holder C D. Leaf water repellency of species in Guatemala and Colorado (USA) and its significance to forest hydrology studies. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(1/2): 147-154.
- [5] Bunster L, Fokkema N J, Schippers B. Effect of surface-active *Pseudomonas* spp. on leaf wettability. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989, 55(6): 1340-1345.
- [6] Pinon J, Frey P, Husson C. Wettability of poplar leaves influences dew formation and infection by *Melampsora larici-populina*. *Plant Disease*, 2006, 90(2): 177-184.
- [7] Guo Z G, Liu W M. Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: binary structure and unitary structure. *Plant Science*, 2007, 172(6): 1103-1112.
- [8] Young T. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95: 65-87.
- [9] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.
- [10] Rosado B H P, Oliveira R S, Aidar M P M. Is leaf water repellency related to vapor pressure deficit and crown exposure in tropical forests? *Acta Oecologica*, 2010, 36(6): 645-649.
- [11] Crisp D J. Waterproofing mechanisms in animals and plants. *Waterproofing and Water Repellency*, 1963, 14: 416-481.
- [12] Yoshimitsu Z, Nakajima A, Watanabe T, Hashimoto K. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets. *Langmuir*, 2002, 18(15): 5818-5822.
- [13] Sase H, Takahashi A, Sato M, Kobayashi H, Nakata M, Totsuka T. Seasonal variation in the atmospheric deposition of inorganic constituents and canopy interactions in a Japanese cedar forest. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1): 1-10.
- [14] Pandey S, Nagar P K. Patterns of leaf surface wetness in some important medicinal and aromatic plants of Western Himalaya. *Flora*, 2003, 198(5): 349-357.
- [15] Brewer C A, Nuñez C I. Patterns of leaf wettability along an extreme moisture gradient in western Patagonia, Argentina. *International Journal of Plant Sciences*, 2007, 168(5): 555-562.
- [16] Sundberg M, Månsson A, Tågerud S. Contact angle measurements by confocal microscopy for non-destructive microscale surface characterization. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 313(2): 454-460.
- [17] Knoll D, Schreiber L. Influence of epiphytic micro-organisms on leaf wettability: wetting of the upper leaf surface of *Juglans regia* and of model surfaces in relation to colonization by micro-organisms. *New Phytologist*, 1998, 140(2): 271-282.
- [18] Zhang S W, Lian Y Y. Water repellence and contact angle measurement. *Modern Measurement & Test*, 1994, 3: 36-41.
- [19] Wagner P, Fürstner R, Barthlott W, Neinhuis C. Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(385): 1295-1303.
- [20] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [21] Wang H X, Shi H, Li Y Y. Leaf surface wettability of major plant species for urban greening in Xi'an and related affecting factors. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(4): 630-636.
- [22] Weiss A. Contact angle of water droplets in relation to leaf water potential. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 43(3/4): 251-259.

- [23] Fogg G E. Quantitative studies on the wetting of leaves by water. *Proceedings of the Royal Society of London (Series B. Biological Sciences)*, 1947, 134 (877): 503-522.
- [24] Müller C, Riederer M. Plant surface properties in chemical ecology. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, 31(11): 2621-2651.
- [25] Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad K J, Behl H M. Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? *Flora*, 2002, 197(1): 47-55.
- [26] Gray J E, Holroyd G H, van der Lee F M, Bahrami A R, Sijmons P C, Woodward F I, Schuch W, Hetherington A M. The *HIC* signalling pathway links CO₂ perception to stomatal development. *Nature*, 2000, 408: 713-716.
- [27] Wali B, Iqbal M, Mahmooduzzafar. Anatomical and functional responses of *Calendula officinalis* L. to SO₂ stress as observed at different stages of plant development. *Flora*, 2007, 202(4): 268-280.
- [28] Koch K, Hartmann K D, Schreiber L, Barthlott W, Neinhuis C. Influences of air humidity during the cultivation of plants on wax chemical composition, morphology and leaf surface wettability. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(1): 1-9.
- [29] Percy K E, Baker E A. Effects of simulated acid rain on production, morphology and composition of epicuticular wax and on cuticular membrane development. *New Phytologist*, 1987, 107(3): 577-589.
- [30] Percy K E, Jensen K F, Mcquattie C J. Effects of ozone and acidic fog on red spruce needle epicuticular wax production, chemical composition, cuticular membrane ultrastructure and needle wettability. *New Phytologist*, 1992, 122(1): 71-80.
- [31] Elagöz V, Han S S, Manning W J. Acquired changes in stomatal characteristics in response to ozone during plant growth and leaf development of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) indicate phenotypic plasticity. *Environmental Pollution*, 2006, 140(3): 395-405.
- [32] Liu-Gitz L, Britz S J, Wergin W P. Blue light inhibits stomatal development in soybean isolines containing kaempferol-3-O-2^G-glycosyl-gentiobioside (K9), a unique flavonoid glycoside. *Plant, Cell & Environment*, 2000, 23(8): 883-891.
- [33] Jetter R, Schäffer S. Chemical composition of the *Prunus laurocerasus* leaf surface. Dynamic changes of the epicuticular wax film during leaf development. *Plant Physiology*, 2001, 126(4): 1725-1737.
- [34] Meusel I, Neinhuis C, Markstädter C, Barthlott W. Ultrastructure, chemical composition, and recrystallization of epicuticular waxes: transversely ridged rodlets. *Canadian Journal of Botany*, 1999, 77(5): 706-720.
- [35] Cameron K D, Teece M A, Bevilacqua E, Smart L B. Diversity of cuticular wax among *Salix* species and *Populus* species hybrids. *Phytochemistry*, 2002, 60(7): 715-725.
- [36] Xu S J, Jiang P A, Wang Z W, Wang Y. Crystal structures and chemical composition of leaf surface wax depositions on the desert moss *Syntrichia caninervis*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2010, 37(6): 723-730.
- [37] Holloway P J. The effects of superficial wax on leaf wettability. *Annals of Applied Biology*, 1969, 63(1): 145-153.
- [38] Haines B L, Jernstedt J A, Neufeld H S. Direct foliar effects of simulated acid rain. II. Leaf surface characteristics. *New Phytologist*, 1985, 99(3): 407-416.
- [39] Hanba Y T, Moriya A, Kimura K. Effect of leaf surface wetness and wettability on photosynthesis in bean and pea. *Plant, Cell & Environment*, 2004, 27(4): 413-421.
- [40] Hall D M, Burke W. Wettability of leaves of a selection of New Zealand plants. *New Zealand Journal of Botany*, 1974, 12: 283-298.
- [41] Cape J N, Paterson I S, Wolfenden J. Regional variation in surface properties of Norway spruce and scots pine needles in relation to forest decline. *Environmental Pollution*, 1989, 58(4): 325-342.
- [42] Takamatsu T, Sase H, Takada J. Some physiological properties of *Cryptomeria japonica* leaves from Kanto, Japan: potential factors causing tree decline. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(4): 663-672.
- [43] Woo K S, Fins L, McDonald G I, Wenny D L, Eramian A. Effects of nursery environment on needle morphology of *Pinus monticola* Dougl. and implications for tree improvement programs. *New Forests*, 2002, 24(2): 113-129.
- [44] Burton Z, Bhushan B. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces. *Ultramicroscopy*, 2006, 106(8/9): 709-719.
- [45] Boyce R L, McCune D C, Berlyn G P. A comparison of foliar wettability of red spruce and balsam fir growing at high elevation. *New Phytologist*, 1991, 117(4): 543-555.
- [46] Kumar N, Pandey S, Bhattacharya A, Ahuja P S. Do leaf surface characteristics affect *Agrobacterium* infection in tea [*Camellia sinensis* (L.) O Kuntze]? *Journal of Biosciences*, 2004, 29(3): 309-317.
- [47] Li J J, Huang J H, Xie S C. Plant wax and its response to environmental conditions: an overview. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 565-574.
- [48] Bhushan B, Jung Y C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*, 2011, 56(1): 1-108.
- [49] Barthlott W, Neinhuis C, Cutler D, Ditsch F, Meusel I, Theisen I, Wilhelm H. Classification and terminology of plant epicuticular waxes.

- Botanical Journal of the Linnean Society, 1998, 126(3): 237-260.
- [50] Koch K, Bhushan B, Barthlott W. Multifunctional surface structures of plants: an inspiration for biomimetics. *Progress in Materials Science*, 2009, 54(2): 137-178.
- [51] Koch K, Ensikat H J. The hydrophobic coatings of plant surfaces: epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity and molecular self-assembly. *Micron*, 2008, 39(7): 759-772.
- [52] Zorba V, Stratakis E, Barberoglou M, Spanakis E, Tzanetakis P, Anastasiadis S H, Fotakis C. Biomimetic artificial surfaces quantitatively reproduce the water repellency of a lotus leaf. *Advanced Materials*, 2008, 20(21): 4049-4054.
- [53] Ehleringer J R, Mooney H A. Leaf hairs: effects on physiological activity and adaptive value to a desert shrub. *Oecologia*, 1978, 37(2): 183-200.
- [54] Kenzo T, Yoneda R, Azani M A, Majid N M. Changes in leaf water use after removal of leaf lower surface hairs on *Mallotus macrostachyus* (Euphorbiaceae) in a tropical secondary forest in Malaysia. *Journal of Forest Research*, 2008, 13(2): 137-142.
- [55] Harrington D F, Clark C. Reduction in light reflectance of leaves of *Encelia densifolia* (Asteraceae) by trichome wetting. *Madroño*, 1989, 36(3): 180-186.
- [56] Liu J Q, Pu J C, Liu X M. Comparative studies on water relations and xeromorphic structures of some plant species in the middle part of the desert zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 1987, 29(6): 662-673.
- [57] Brewer C A, Smith W K. Influence of simulated dewfall on photosynthesis and yield in soybean isolines (*Glycine max* [L.] merr. cv Williams) with different trichome densities. *International Journal of Plant Sciences*, 1994, 155(4): 460-466.
- [58] Brewer C A, Smith W K. Patterns of leaf surface wetness for montane and subalpine plants. *Plant, Cell & Environment*, 1997, 20(1): 1-11.
- [59] Han Z W, Qiu Z M, Wang S J, Ren L Q. Relationship between non-smooth appearance and wettability of plant leaf surface. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(1): 110-115.
- [60] Wang S J, Ren L Q, Han Z W, Qiu Z M, Zhou C H. Non-smooth morphology of typical plant leaf surface and its anti-adhesion and hydrophobicity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(9): 16-19.
- [61] Brewer C A, Smith W K, Vogelmann T C. Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets. *Plant, Cell & Environment*, 1991, 14(9): 955-962.
- [62] Yang X D, Shang G R, Li Y T, Xiang M. Surface morphological characteristics comparisons of serious plant leaves with hydrophobic or hydrophilic function. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 38(3): 91-95.
- [63] Shi H, Li J Y. Primary research on the wettability of leaves of selected plants in Shaanxi Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(3): 202-205.
- [64] Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany*, 1997, 79(6): 667-677.
- [65] Juniper B E, Jeffree C E. *Plant Surfaces*. London: Edward Arnold, 1983.
- [66] Paoletti E, Raddi P, Scala S L. Relationships between transpiration, stomatal damage and leaf wettability in declining beech trees. *Chemosphere*, 1998, 36(4/5): 907-912.
- [67] Aryal B, Neuner G. Leaf wettability decreases along an extreme altitudinal gradient. *Oecologia*, 2010, 162(1): 1-9.
- [68] Schreuder M D J, van Hove L W A, Brewer C A. Ozone exposure affects leaf wettability and tree water balance. *New Phytologist*, 2001, 152(3): 443-454.
- [69] Nobel P S. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. San Diego: Academic Press, 1991.
- [70] Brewer C A, Smith W K. Leaf surface wetness and gas exchange in the pond lily *Nuphar polysepalum* (Nymphaeaceae). *American Journal of Botany*, 1995, 82(10): 1271-1277.
- [71] Madsen T V, Sand-Jensen K. Photosynthetic carbon assimilation in aquatic macrophytes. *Aquatic Botany*, 1991, 41(1/3): 5-40.
- [72] Smith W K, McClean T M. Adaptive relationship between leaf water repellency, stomatal distribution, and gas exchange. *American Journal of Botany*, 1989, 76(3): 465-469.
- [73] Bao W, Bao W K, He B H, Ding D R. Interception effects of forest ecosystems to precipitation: a review. *Journal of Mountain Research*, 2004, 22(4): 483-491.
- [74] Bradley D J, Gilbert G S, Parker I M. Susceptibility of clover species to fungal infection: the interaction of leaf surface traits and environment. *American Journal of Botany*, 2003, 90(6): 857-864.
- [75] Tanakamaru S, Takehana T, Kimura K. Effect of rainfall exposure on leaf wettability in near-isogenic barley lines with different leaf wax content. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1998, 54(2): 155-160.
- [76] Raina A K. Movement, feeding behaviour and growth of larvae of the sorghum shootfly, *Atherigona soccata*. *Insect Science and Its Application*,

- 1981, 2(1/2): 77-81.
- [77] Kuo K C, Hoch H C. Germination of *Phyllosticta ampellicida* pycnidiospores: prerequisite of adhesion to the substratum and the relationship of substratum wettability. *Fungal Genetics and Biology*, 1996, 20(1): 18-29.
- [78] Huber L, Gillespie T J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 1992, 30: 553-577.
- [79] Cook M. Peanut leaf wettability and susceptibility to infection by *Puccinia arachidis*. *Phytopathology*, 1980, 70(8): 826-830.
- [80] Watanabe T, Yamaguchi I. Evaluation of wettability of plant leaf surfaces. *Journal of Pesticide Science*, 1991, 16: 491-498.
- [81] Statler G D, Nordgaard J T. Leaf wettability of wheat in relation to infection by *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*. *Ecology and Epidemiology*, 1980, 70(7): 641-643.
- [82] Cao H F. Air pollution and its effects on plants in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, 10(1): 7-12.
- [83] Honour S L, Bell J N B, Ashenden T W, Cape J N, Power S A. Responses of herbaceous plants to urban air pollution: effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. *Environmental Pollution*, 2009, 157(4): 1279-1286.
- [84] Adams C M, Hutchinson T C. Comparative abilities of leaf surfaces to neutralize acidic raindrops II. The influence of leaf wettability, leaf age and rain duration on changes in droplet pH and chemistry on leaf surfaces. *New Phytologist*, 1987, 106(3): 437-456.
- [85] Percy K E, Baker E A. Effects of simulated acid rain on leaf wettability, rain retention and uptake of some inorganic ions. *New Phytologist*, 1988, 108(1): 75-82.
- [86] Wang Y, Mo Y F, Zhu M, Bai M W. Wettability of metal coatings with biomimic micro textures. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 203(1/2): 137-141.
- [87] Fürstner R, Barthlott W, Neinhuis C, Walzel P. Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, 2005, 21(3): 956-961.
- [88] Lee S M, Lee H S, Kim D S, Kwon T H. Fabrication of hydrophobic films replicated from plant leaves in nature. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(3/4): 553-559.
- [89] Ma M, Hill R M, Lowery J L, Fridrikh S V, Rutledge G C. Electrospun poly (styrene-*block*-dimethylsiloxane) block copolymer fibers exhibiting superhydrophobicity. *Langmuir*, 2005, 21(12): 5549-5554.
- [90] Sun T L, Wang G J, Liu H, Feng L, Jiang L, Zhu D B. Control over the wettability of an aligned carbon nanotube film. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(49): 14996-14997.
- [91] Rao A V, Kulkarni M M, Pajonk G M, Amalnerkar D P, Seth T. Synthesis and characterization of hydrophobic silica aerogels using trimethylethoxysilane as a co-precursor. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2003, 27(2): 103-109.

参考文献:

- [1] 顾惕人, 朱步瑶, 李外浪, 马季铭, 戴乐蓉, 程虎民. 表面化学. 北京: 科学出版社. 2004, 359-388.
- [3] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3077-3082.
- [18] 张世文, 康育英. 憎水性与接触角的测量. *现代计量测试*, 1994, 3: 36-41.
- [21] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 西安市常见绿化植物叶片润湿性能及其影响因素. *生态学杂志*, 2010, 29(4): 630-636.
- [47] 李婧婧, 黄俊华, 谢树成. 植物蜡质及其与环境的关系. *生态学报*, 2011, 31(2): 565-574.
- [56] 刘家琼, 蒲锦春, 刘新民. 我国沙漠中部地区主要不同生态类型植物的水分关系和旱生结构比较研究. *植物学报*, 1987, 29(6): 662-673.
- [59] 韩志武, 邱兆美, 王淑杰, 任露泉. 植物表面非光滑形态与润湿性的关系. *吉林大学学报(工学版)*, 2008, 38(1): 110-115.
- [60] 王淑杰, 任露泉, 韩志武, 邱兆美, 周长海. 典型植物叶表面非光滑形态的疏水防黏效应. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 16-19.
- [62] 杨晓东, 尚广瑞, 李雨田, 宣明. 植物叶表的润湿性能与其表面微观形貌的关系. *东北师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 38(3): 91-95.
- [63] 石辉, 李俊义. 植物叶片润湿性特征的初步研究. *水土保持通报*, 2009, 29(3): 202-205.
- [73] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 丁德蓉. 森林生态系统对降水的分配与拦截效应. *山地学报*, 2004, 22(4): 483-491.
- [82] 曹洪法. 我国大气污染及其对植物的影响. *生态学报*, 1990, 10(1): 7-12

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.31 ,No.15 August ,2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Trophic group responses of ground arthropods to land-cover change and management disturbance	LI Fengrui, LIU Jiliang, HUA Wei, et al (4169)
Construction and comparative analysis of enriched microsatellite library from <i>Liposcelis bostrychophila</i> and <i>L. entomophila</i> genome	WEI Dandan, YUAN Minglong, WANG Baojun, et al (4182)
Development of EST-SSRs markers and analysis of genetic diversities among different geographical populations of Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i>	YAN Xiwu, YU Zhifei, QIN Yanjie, et al (4190)
Genetic diversity of different generations of the Dalian population of Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i> through selective breeding	YU Zhifei, YAN Xiwu, YANG Fei, et al (4199)
Comparative study of spike differentiation in wheat in the glasshouse and field	JIANG Lina, ZHAO Yanling, SHAO Yun, et al (4207)
Effects of organic fertilizer on growth and endogenous hormone contents of wheat seedlings under salt stress	LIU Haiying, CUI Changhai, ZHAO Qian, et al (4215)
Impacts of climatic change on spring wheat growth in a semi-arid region of the Loess Plateau: a case study in Dingxi, Gansu Province	YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (4225)
Dynamic changes in nitrogen and phosphorus concentrations and emission-reduction potentials in paddy field water under different tillage models	FENG Guolu, YANG Renbin (4235)
Effects of planting and straw returning of transgenic Bt maize on soil enzyme activities under field condition	YAN Shilei, ZHAO Lei, SUN Hongwei, et al (4244)
Effects of short-term flooding on <i>Geobacteraceae</i> spp. and <i>Anaeromyxobacter</i> spp. abundance in paddy soil	ZHU Chao, Stefan Ratering, QU Dong, et al (4251)
Adaptive adjustments of the sowing date of late season rice under climate change in Guangdong Province	WANG Hua, CHEN Xinguang, HU Fei, et al (4261)
Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in Inner Mongolia, China	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui (4270)
Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau	LIU Yingchun, WANG Qiufeng, YU Guirui, et al (4277)
Wettability on plant leaf surfaces and its ecological significance	SHI Hui, WANG Huixia, LI Yangyang (4287)
Seasonal dynamics of litter accumulation in major forest communities on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China	ZHENG Jinping, GUO Zhongling, XU Chengyang, et al (4299)
A comparative study of seed germination traits of 52 species from Gurbantunggut Desert and its peripheral zone	LIU Huiliang, SONG Mingfang, DUAN Shimin, et al (4308)
The reproductive ecological characteristics of <i>Sinosenecio jishouensis</i> (Compositae) and its endangerment mechanisms	DENG Tao, CHEN Gongxi, ZHANG Daigui, et al (4318)
Iterative algorithm for analyzing the influence of the proportion of permanently destroyed sites on the equilibrium abundances of species	SHI Peijian, GE Feng, YANG Qingpei (4327)
Physiological mechanism of foliage spraying paclobutrazol on increasing salt tolerance of <i>Jatropha curcas</i> seedlings	MAO Yiqing, ZHENG Qingsong, CHEN Jianmiao, et al (4334)
Spatial ecological niche of main insect borers in larch of Aershan	YUAN Fei, LUO Youqing, SHI Juan, et al (4342)
Source areas and landing mechanism of early immigration of white-backed planthoppers <i>Sogatella furcifera</i> (Horváth) in Yunnan, 2009	SHEN Huimei, LÜ Jianping, ZHOU Jinyu, et al (4350)
Life history and the evolutionary significance of egg diapause in Changsha population of the rice grasshopper, <i>Oxya chinensis</i> (Orthoptera: Catantopidae)	ZHU Daohong, ZHANG Chao, TAN Ronghe (4365)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in "518" nectarine orchard	SHI Xiaoli, BI Shoudong, GENG Jiguang, et al (4372)
Dynamics of soil meso- and microfauna communities in Zoigê alpine meadows on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, China	ZHANG Hongzhi, WU Pengfei, YANG Daxing, et al (4385)
Seasonal changes in waterbirds population and movements of Great Black-headed Gull <i>Larus ichthyaetus</i> at Keluke Lake of Qinghai, China	ZHANG Guogang, LIU Dongping, HOU Yunqiu, et al (4398)
Predictions of net carbon emissions based on the emissions and forest carbon sinks in Yunnan Province	LIU Huiya, WANG Zheng, MA Xiaozhe (4405)
Ecological water depletion by human use in Beijing City	BAI Yinglan, WANG Rusong, YAO Liang (4415)
Review and Monograph	
Research progress on regulation mechanism for the process of water transport in plants	YANG Qiliang, ZHANG Fucang, LIU Xiaogang, et al (4427)
Antibiotics in environmental matrices and their effects on microbial ecosystems	YU Shen, WANG Min, HONG Youwei (4437)
Anaerobic ammonium oxidation in natural ecosystems	SHEN Lidong, ZHENG Ping, HU Baolan (4447)
Scientific Note	
Ecological characteristics of macrobenthic communities and their relation to water environmental factors in four bays of southern Shandong Peninsula	ZHANG Ying, LÜ Zhenbo, XU Zongfa, et al (4455)
Seasonal succession of crustacean zooplankton in relation to the major environmental factors in Lake Ulungur, Xinjiang	YANG Lili, ZHOU Xiaoyu, LIU Qigen, et al (4468)
Effect of different fertilization and irrigation practices on soil ammonia volatilization of Arecanut (<i>Areca catechu</i> L.)	LU Lilan, GAN Bingchun, XU Minghui, et al (4477)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 15 期 (2011 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 15 2011

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 70.00 元