

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第21期 Vol.31 No.21 **2011**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 31 卷 第 21 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

基于景观格局理论和理想风水模式的藏族乡土聚落景观空间解析——以甘肃省迭部县扎尕那村落为例·····	史利莎,严力蛟,黄璐,等 (6305)
武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律·····	游巍斌,何东进,巫丽芸,等 (6317)
旅游地道路生态持续性评价——以云南省玉龙县为例·····	蒋依依 (6328)
城市空间形态紧凑度模型构建方法研究·····	赵景柱,宋瑜,石龙宇,等 (6338)
丹顶鹤多尺度生境选择机制——以黄河三角洲自然保护区为例·····	曹铭昌,刘高焕,徐海根 (6344)
西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征·····	凡非得,王克林,熊鹰,等 (6353)
流域尺度海量生态环境数据建库关键技术——以塔里木河流域为例·····	高凡,闫正龙,黄强 (6363)
雌雄异株植物鼠李的生殖分配·····	王娟,张春雨,赵秀海,等 (6371)
长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应·····	王晓明,赵秀海,高露双,等 (6378)
不同高寒退化草地阿尔泰针茅种群的小尺度点格局·····	赵成章,任珩,盛亚萍,等 (6388)
残存银杏群落的结构及种群更新特征·····	杨永川,穆建平, TANG Cindy Q, 等 (6396)
濒危植物安徽羽叶报春两种花型的繁育特性及其适应进化·····	邵剑文,张文娟,张小平 (6410)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林的乔木叶片功能性状特征·····	罗璐,申国珍,谢宗强,等 (6420)
不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征·····	王丽艳,韩有志,张成梁,等 (6429)
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林分的影响·····	张喜,崔迎春,朱军,等 (6442)
内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和生理生态适应性·····	马成仓,高玉葆,李清芳,等 (6451)
古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析·····	司朗明,刘彤,刘斌,等 (6460)
白石砬子国家级自然保护区天然林的自然稀疏·····	周永斌,殷有,殷鸣放,等 (6469)
黑龙江省东完达山地区东北虎猎物种群现状及动态趋势·····	张常智,张明海 (6481)
基于 GIS 的马铃薯甲虫扩散与河流关系研究——以新疆沙湾县为例·····	李超,张智,郭文超,等 (6488)
2010 年广西兴安地区稻纵卷叶螟发生动态及迁飞轨迹分析·····	蒋春先,齐会会,孙明阳,等 (6495)
B 型烟粉虱对寄主转换的适应性·····	周福才,李传明,顾爱祥,等 (6505)
利用 PCR-DGGE 方法分析不同鸡群的盲肠微生物菌群结构变化·····	李永洙, Yongquan Cui (6513)
鸡粪改良铜尾矿对 3 种豆科植物生长及基质微生物量和酶活性的影响·····	张宏,沈章军,阳贵德,等 (6522)
铜绿微囊藻对紫外辐射的生理代谢响应·····	汪燕,李珊珊,李建宏,等 (6532)
10 种常见甲藻细胞体积与细胞碳、氮含量的关系·····	王燕,李瑞香,董双林,等 (6540)
冬季太湖表层底泥产毒蓝藻群落结构和种群丰度·····	李大命,孔繁翔,于洋,等 (6551)
城市机动车道颗粒物扩散对绿化隔离带空间结构的响应·····	蔺银鼎,武小刚,郝兴宇,等 (6561)
新疆城镇化与土地资源产出效益的空间分异及其协调性·····	杨宇,刘毅,董雯,等 (6568)
山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及 $\delta^{15}\text{N}$ 溯源·····	徐春英,李玉中,李巧珍,等 (6579)
增温对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响·····	肖国举,张强,张峰举,等 (6588)
一种估测小麦冠层氮含量的新高光谱指数·····	梁亮,杨敏华,邓凯东,等 (6594)
黄河上游灌区稻田 N_2O 排放特征·····	张惠,杨正礼,罗良国,等 (6606)
专论与综述	
植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望·····	黄娟,莫江明,孔国辉,等 (6616)
植物种群更新限制——从种子生产到幼树建成·····	李宁,白冰,鲁长虎 (6624)
研究简报	
遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响·····	杜成凤,李潮海,刘天学,等 (6633)
学术信息与动态	
科学、系统与可持续性——第六届工业生态学国际大会述评·····	石海佳,梁赛,王震,等 (6641)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 340 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2011-11	



封面图说: 鹤立——丹顶鹤是世界 15 种鹤数量极小的一种,主要栖息在沼泽、浅滩、芦苇塘等湿地,以捕食小鱼虾、昆虫、蛙蚺、软体动物为主,也吃植物的根茎、种子、嫩芽。善于奔驰飞翔,喜欢结群生活。丹顶鹤属迁徙鸟类,主要在我国的黑龙江、吉林、俄罗斯西伯利亚东部、朝鲜北部以及日本等地繁殖。在长江下游一带越冬。在中国文化中有“仙鹤”之说。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录,濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。

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

马成仓,高玉葆,李清芳,郭宏宇,陈登科,豆胜,王金龙. 内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和生理生态适应性. 生态学报, 2011, 31 (21): 6451-6459.

Ma C C, Gao Y B, Li Q F, Guo H Y, Chen D K, Dou S, Wang J L. Morphological and physiological adaptation of *Caragana* species in the Inner Mongolia Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (21): 6451-6459.

内蒙古高原锦鸡儿属植物的形态和 生理生态适应性

马成仓^{1,*}, 高玉葆^{1,2}, 李清芳¹, 郭宏宇², 陈登科¹, 豆胜¹, 王金龙²

(1. 天津师范大学生命科学学院天津市细胞遗传与分子调控重点实验室, 天津 300387; 2. 南开大学生命科学学院, 天津 300071)

摘要:比较研究内蒙古高原锦鸡儿属(*Caragana*)中生种,旱生种和强旱生种的叶片形态结构、渗透调节、气孔调节和保护酶,目的是揭示锦鸡儿属不同类型植物的生态适应策略。中生种叶片平展,被稀疏绿色短柔毛;旱生种叶片平展或呈瓦状,被灰色柔毛;强旱生种叶片呈瓦状或卷成筒状,被直立或伏帖绢毛。叶片厚度强旱生种>旱生种>中生种,叶片面积、生物量和比叶面积(SLA)强旱生种<旱生种<中生种。叶片长宽比,强旱生种和旱生种大于中生种。这些形态结构导致保水能力强旱生种>旱生种>中生种,光能利用能力中生种>旱生种>强旱生种。渗透调节物质含量、细胞质离子浓度和细胞渗透势强旱生种>旱生种>中生种。渗透调节物质含量的差异主要表现在强旱生种可溶性糖和无机离子含量远高于旱生种,后者又远高于中生种。叶含水量、自由水含量、叶水势和气孔导度中生种>旱生种>强旱生种,束缚水含量、束缚水/自由水比值、POD和SOD活性正好相反,CAT活性旱生种>中生种>强旱生种。这些生理特性导致抗旱能力强旱生种>旱生种>中生种,但代谢速率正好相反。旱生种和中生种表现出较少的日水分亏缺,强旱生种水分亏缺从清晨到傍晚持续大幅增加。细胞膜相对透性和MDA含量强旱生种>旱生种>中生种。自由基含量表现为旱生种>中生种>强旱生种。这些数据说明虽然旱生种和强旱生种形成了多种特点来适应干旱环境,但仍然是不充分的。结论:(1)分布于半湿润至半干旱区的锦鸡儿属中生种依靠活跃的代谢、大量的水分消耗和快速生长使其在生物环境中取得竞争优势;生活在干旱地区和强干旱地区的旱生种和强旱生种依靠低代谢、节水和高抗旱性来抵抗苛刻的非生物环境。(2)旱生种和强旱生种主要通过可溶性糖和无机离子的积累,调节细胞质渗透势,保持水分平衡,这是一种相对节省能量的适应对策。

关键词:锦鸡儿属;适应性;叶形态结构;渗透调节;水分关系;保护酶系统

Morphological and physiological adaptation of *Caragana* species in the Inner Mongolia Plateau

MA Chengcang^{1,*}, GAO Yubao^{1,2}, LI Qingfang¹, GUO Hongyu², CHEN Dengke¹, DOU Sheng¹, WANG Jinlong²

1 Tianjin Key Laboratory of Cyto-Genetical and Molecular Regulation, College of Life Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

2 College of Life Science, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract: The morphological structure, osmotic adjustment, stomatal regulation and antioxidative enzymes of mesophilous, xerophilous and super-xerophilous species of *Caragana* were studied, in order to understand their ecological adaptation mechanisms. The results showed that flat leaves with few green villi were common in mesophilous species, tile-shaped leaves with offwhite villi were common in xerophilous species and tile-shaped or tube-shaped leaves with densely vertical or fallen silky villi were common in super-xerophilous species. Leaf thickness was greatest in super-xerophilous species, less in xerophilous species, and least in mesophilous species. Leaf area, leaf biomass, and specific leaf area (SLA) were highest

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB106802)

收稿日期:2010-08-02; **修订日期:**2011-04-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: machengcang@163.com

for mesophilous species, with xerophilous species having lower values, and super-xerophilous species having the lowest values. The thickness-area ratio and length-width ratio in super-xerophilous species and xerophilous species were greater than those in mesophilous species. With these morphological features, the water retention capability was highest in super-xerophilous species, and lower and lowest in xerophilous and mesophilous species, respectively; conversely, light use capability was highest in mesophilous species, followed by xerophilous and super-xerophilous species, respectively. The osmotic adjustment substances content, cytoplasmic ion concentration and osmotic potential of super-xerophilous species were the highest, with those of xerophilous species being intermediate and those of mesophilous species being the lowest. The most obvious differences in osmotic adjustment substances content were that the soluble sugar and inorganic ion contents decreased substantially from super-xerophilous to xerophilous and then to mesophilous species. The leaf total and free water content, leaf water potential, as well as stomatal conductance were highest in mesophilous species, intermediate in xerophilous species and lowest in super-xerophilous species, whereas the bound water content, ratio between bound and free water, peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) activity were in the reverse order. Catalase (CAT) activity was highest in xerophilous, intermediate in mesophilous, and lowest in super-xerophilous species. These ecophysiological characteristics resulted in different drought resistance ability and metabolism intensity among *Caragana* species. Super-xerophilous species had the strongest drought resistance, while xerophilous species had medium drought resistance and mesophilous species had the lowest drought resistance, whereas the metabolism intensity was the highest in mesophilous species, intermediate in xerophilous species and lowest in super-xerophilous species. The diurnal water deficit of xerophilous and mesophilous species was low, and super-xerophilous species had gradually increasing diurnal water deficit from dawn to dusk. Both permeability of plasma membrane and malondialdehyde (MDA) content were greatest in super-xerophilous species, intermediate in xerophilous species, and least in mesophilous species. Free radical content was highest in xerophilous species, with mesophilous and super-xerophilous species having intermediate and lowest values, respectively. These results indicated that although the xerophilous and super-xerophilous species had evolved many morphological and physiological characteristics to cope with the arid environment in desert, their adaptation might still be insufficient.

From this study, we can draw two main conclusions: (1) The morphological and physiological characteristics of *Caragana* species vary in accordance with the environmental conditions of their distribution areas in the Inner Mongolia Plateau. The wide range of variation in morphological and physiological characteristics may be the biological base for the broad distribution of *Caragana* species in the Inner Mongolia Plateau. With an active metabolism, fast growth and high water consumption, mesophilous *Caragana* species have strong competitive ability. A low metabolism, economical water use strategy and strong stress tolerance, especially to drought, enables xerophilous and super-xerophilous *Caragana* species to thrive in harsh environmental conditions. (2) Xerophilous and super-xerophilous *Caragana* species adjust their cell osmotic potential mainly through accumulating soluble sugars and inorganic ions, which are probably energy-saving adaptation strategies in stressful environments with less productivity.

Key Words: adaptability; antioxidative enzymes; *Caragana*; leaf morphology; osmotic adjustment; water relations

内蒙古高原光辐射和气温从东北向西南递增,年降水量从东北向西南递减。气候变化形成光-温-湿的明显梯度和多种多样的水热组合。其中对植物生长发育影响最大的是水分,由东向西递减的降水和递增的蒸发量差异分化出湿润、半湿润偏湿、半湿润偏干、半干旱偏润、半干旱偏干、干旱、很干旱、强干旱和极干旱等9个水分型。内蒙古高原分布了锦鸡儿属植物16种,它们的分布表现出:从东北向西南,从森林到草原到荒漠,种类逐渐增加;多数种表现地带性分布,分化出适应半湿润至半干旱地区的中生种,适应半干旱至干旱地区的旱生种和适应干旱至极干旱气候的强旱生种。关于锦鸡儿属一些重要种对环境的形态和生理生态适应性已经

有一些报道^[1-6],但以整个属为对象,研究其综合生态适应性尚未见报道。

植物对于干旱环境的适应性是形态结构、生理和生化等多方面遗传特性的综合结果,通过比较形态结构、生理和生化特性来认识不同类型植物间的适应机制是十分必要的。水分调节能力是植物适应干旱环境的关键机制。渗透调节是导致植物在干旱环境中吸收水分、保持膨压的主要对策,所以渗透调节物质和束缚水/自由水比例的研究已引起人们的广泛关注^[7-10]。减小气孔导度是植物经济用水的关键^[11],同样,降低叶生物量、缩小叶面积、叶片密被明亮柔毛有利于减少光吸收,降低蒸腾^[8,12-13]。除此之外,保护酶系统是植物在逆境下生存的重要生理基础。本文比较研究锦鸡儿属中生种、旱生种和强旱生种的叶片形态结构、渗透调节、气孔调节和保护酶,目的是揭示内蒙古高原锦鸡儿属不同类型植物的生态适应策略。

1 材料和方法

1.1 野外调查和植物材料采集

野外调查和实验材料采集于2003年(7月2日—8月5日)和2007年(7月1日—8月4日)进行。主要考察地点的自然概况数据和植物种见表1(中卫县沙坡头沙漠试验站为人工栽培外,其它皆为天然分布)。对每个地点的锦鸡儿属(*Caragana*)植物做总体考察后,每种选3个典型样地,选取30个成年灌丛,进行现场测定和取样。用叶面积仪测定80个叶片面积,用游标卡尺测量80个叶片厚度(每次测10片),计算厚度面积比;测定100片叶生物量,计算比叶面积(SLA);测定20个叶片长度和宽度,计算长宽比(所有形态测定叶片均为不同灌丛的成熟叶片);从7:00到19:00每3h取叶片3—4g,烘干法测定叶含水量,计算叶水分亏缺日变化;取13:00新鲜叶片测定细胞质离子浓度和水势;用LI-6400便携式光合测定系统测定气孔导度日变化,从7:00到19:00每2h测定1轮,每轮测定60次(每个灌丛2次),取日平均值。取30、60、100cm深的土壤30—50g测含水量,求平均值;取叶片30g用液氮罐带回实验室进行生理生化分析。

1.2 生理指标测定

细胞质离子浓度测定取新鲜叶0.2g,煎碎,置试管加入10mL蒸馏水,沸水浴中煮15min使细胞中离子充分溶出,用电导率仪测定溶出液的电导率,以植物体含水量作为溶剂计算细胞质离子浓度(用电导率表示)。可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝比色法。游离氨基酸含量测定采用茚三酮比色法。脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法(脯氨酸与茚三酮显红色,与其它氨基酸不同,通常测定的游离氨基酸中不包括脯氨酸)。可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法。有机酸含量测定用NaOH滴定法。K、Na、Ca、Mg、Cu、Zn和Mn含量测定采用原子吸收分光光度计法。Cl⁻含量测定采用硝酸银沉淀法。NO₃⁻和NO₂⁻含量测定采用磺胺比色法。渗透调节物质的浓度均以植物体含水量作为溶剂进行计算^[10,14],渗透势利用 $\psi_s = RT \times n_s / V_w$ 公式计算^[10,14]。将K、Na、Ca、Mg、Cu、Zn、Mn、Cl⁻、NO₃⁻和NO₂⁻产生的渗透势求和计算出无机离子的渗透势。水势测定采用小液流法。自由水和束缚水含量采用阿贝折射仪法。自由基含量测定采用羟胺氧化法。POD活性测定采用愈创木酚法。SOD活性测定采用NBT光化学还原法。CAT测定采用滴定法。细胞膜相对透性测定采用电导率法。MDA含量测定采用硫代巴比妥酸法。

依据地理分布和以往对锦鸡儿属植物抗旱性的研究^[2,15-17],把所涉及的10个种分为中生种、旱生种和强旱生种。其中中生种包括树锦鸡儿(*C. sibirica*)、小叶锦鸡儿(*C. microphylla*)、甘蒙锦鸡儿(*C. opulens*),旱生种包括中间锦鸡儿(*C. davazamcii*)、狭叶锦鸡儿(*C. stenophylla*)、矮锦鸡儿(*C. pygmaea*),强旱生种包括垫状锦鸡儿(*C. tibetica*)、荒漠锦鸡儿(*C. roborovskyi*)、柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)、白皮锦鸡儿(*C. leucophloea*)。把不同地点、不同年份、同一物种的形态和生理指标求平均值,然后将每一类物种的形态和生理指标求平均值,作为该类的形态和生理特性。

不同类型锦鸡儿属植物的形态和生理指标用Duncan多重比较进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 锦鸡儿属植物的叶片形态学特性

中生种小叶锦鸡儿和树锦鸡儿叶片平展,甘蒙锦鸡儿叶片微瓦状;旱生种中间锦鸡儿叶片平展,狭叶锦鸡

表 1 主要考察地点的自然概况数据和植物种
Table 1 Environmental data and species for the main investigation sites

地点 Site	物种 Species	经度 Longitude °E	纬度 Latitude °N	海拔 Altitude /m	年降水量 Annual precipitation /mm	平均气温 Annual average temperature /°C	日照时间 Sun time /h	土壤含水量 (1—100cm) Soil water content/%	植被类型 Vegetation types
呼伦贝尔市	小叶锦鸡儿 <i>C. microphylla</i> 树锦鸡儿 <i>C. sibirica</i>	119.64	49.12	650.0	350	−2.20	2800	2.73	林草交错区 Forest-steppe zone
西乌珠穆沁旗	小叶锦鸡儿	117.60	44.58	995.9	340	1.47	2870	4.09	典型草原 Typical steppe
锡林浩特市	小叶锦鸡儿 狭叶锦鸡儿 <i>C. stenophylla</i>	116.07	43.95	989.5	281	2.35	2932	3.70	典型草原
阿巴嘎旗	小叶锦鸡儿 狭叶锦鸡儿	114.95	44.02	1126.1	245	1.20	3047	3.09	荒漠化草原 Desert steppe
苏尼特右旗	小叶锦鸡儿 狭叶锦鸡儿	112.90	42.40	1150.8	211	4.93	3167	2.40	荒漠化草原
二连浩特市	中间锦鸡儿 <i>C. davazamcii</i> 矮锦鸡儿 <i>C. pygmaea</i>	111.97	43.65	965.9	142	3.40	3055	2.68	荒漠化草原
和林格尔县	甘蒙锦鸡儿 <i>C. opulens</i>	111.88	40.33	1063.0	420	5.60	2942	9.21	荒漠化草原
达尔罕茂明安旗	中间锦鸡儿 狭叶锦鸡儿 垫状锦鸡儿 <i>C. tibetica</i>	110.43	41.70	1376.6	256	4.01	3061	2.16	荒漠化草原
乌拉特中旗	中间锦鸡儿	108.52	41.57	1288.0	199	5.07	3168	2.18	草原化荒漠 Steppe desert
杭锦后旗	狭叶锦鸡儿 柠条锦鸡儿 <i>C. korshinskii</i>	107.50	41.25	1284.8	150	5.82	3179	2.10	草原化荒漠
阿拉善左旗	柠条锦鸡儿 狭叶锦鸡儿 垫状锦鸡儿 荒漠锦鸡儿 <i>C. roborouskyi</i>	105.66	38.84	1561.0	110	7.80	3200	1.73	典型荒漠 Typical desert
中卫县	白皮锦鸡儿 <i>C. leucophloea</i>	104.95	37.51	1339.0	188	9.60	3264	2.87	沙漠 Desert

气候资料为 40a 平均值,土壤含水量为 3 个样地平均值

儿和矮锦鸡儿叶片呈瓦状;强旱生种柠条锦鸡儿叶片平展,荒漠锦鸡儿和白皮锦鸡儿叶片呈瓦状,垫状锦鸡儿叶片卷成筒状。中生种叶被稀疏绿色短柔毛,旱生种叶被灰色柔毛,强旱生种密被直立或伏帖绢毛。叶片厚度顺序为强旱生种>旱生种>中生种,而叶片面积正好相反,导致强旱生种厚度/面积比是旱生种的 1.63 倍,是中生种的 6.27 倍。强旱生种叶生物量和比叶面积(SLA)都小于旱生种,而旱生种小于中生种。从叶片长宽比来看,强旱生种和旱生种大于中生种,即旱生种的叶片更长、更窄,在相同生物量下降低叶面积(表 2)。

表 2 锦鸡儿属植物的叶片形态学特征

Table 2 Morphological characters of leaf blade of the *Caragana*

种类 Species group	形态 Shape	被毛 Hairy	厚度 Thickness /mm	面积 Area/ mm ²	厚度/面积 Thickness /Area ×10 ⁻³	长/宽 Length/ Width	干重 Dry weight /mg	比叶面积 SLA /(cm ² /g)
中生种 Mesophilous species	平展或微瓦状 Flat or tile-shaped	少量绿色柔毛 Few green villi	0.208c	95.10a	5.90c	2.11c	5.62a	152.30a
旱生种 Xerophilous species	平展或瓦状 Flat or tile-shaped	密灰色柔毛 Densely offwhite villi	0.235b	14.88b	22.68b	8.22a	2.00b	78.49b
强旱生种 Super-xerophilous species	平展或卷筒状 Flat or tubbish-shape	密直立或 伏帖绢毛 Densely vertical or fallen silky villis	0.323a	11.90b	37.02a	5.26b	1.62b	71.26b

表中同一列中不同字母表示差异显著 $P<0.05$

2.2 锦鸡儿属植物的水分调节能力

由表 3 看出,强旱生种渗透调节物质含量高于旱生种,旱生种高于中生种,从而导致渗透势强旱生种>旱生种>中生种。渗透调节物质含量最显著的差异是:强旱生种可溶性糖和无机离子含量远高于旱生种,后者又远高于中生种。可溶性蛋白、游离氨基酸和有机酸各类群间差异不大。另外采用电导法测定细胞质离子浓度强旱生种高于旱生种,旱生种高于中生种。

表 3 锦鸡儿属植物的主要渗透调节物质产生的渗透势(10^{-3} MPa)和细胞质离子浓度(mS/cm)Table 3 Osmotic potential (10^{-3} MPa) of the main osmotic adjustment substances and cytoplasmic ion concentration (mS/cm) of *Caragana*

种类 Species group	可溶性蛋白 Solubility protein	游离氨基酸 Free amino acids	有机酸 Organic acids	可溶性糖 Solubility sugar	无机离子 Inorganic ion	合计 Total	细胞质离子浓度 Cytoplasmic ion concentration
中生种 Mesophilous species	1.31a	71.11a	181.64b	370.63c	713.89c	1276c	48.97c
旱生种 Xerophilous species	1.20a	60.55ab	231.4a	486.80b	1047.82b	1807b	62.47b
强旱生种 Super-xerophilous species	1.38a	55.86b	177.34b	644.31a	1411.92a	2286a	84.00a

表中同一列中不同字母表示差异显著 $P<0.05$

强旱生种的叶含水量都远低于旱生种,而旱生种远低于中生种。除含水量不同外,水分状态也有差异,表现为:自由水含量中生种>旱生种>强旱生种,束缚水含量相反;束缚水/自由水比值强旱生种>旱生种>中生种。叶水势中生种>旱生种>强旱生种(表 4)。

对锦鸡儿属植物气孔导度的测定结果发现,气孔导度日平均值中生种($234.56 \text{ mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>旱生种($211.37 \text{ mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>强旱生种($152.93 \text{ mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

表 4 锦鸡儿属植物的水分状态
Table 4 Water states of leaf in *Caragana*

种类 Species group	含水量 Water content/%	自由水含量 Free water/%	束缚水含量 Bound water/%	束缚水/自由水 Bound water /Free water	水势 Water potential /MPa
中生种 Mesophilous species	63.72a	38.23a	25.47b	0.668c	-0.887b
旱生种 Xerophilous species	57.61b	29.02b	28.50a	0.981b	-1.426a
强旱生种 Super-xerophilous species	52.45c	23.70c	28.76a	1.229a	-1.542a

表中同一列中不同字母表示差异显著 $P<0.05$

2.3 锦鸡儿属植物的叶水分状况

植物体的水分状况在黎明前最好,日出后由于蒸腾失水大于根系吸水,叶水分亏缺升高。分布于干旱区的旱生种和半湿润至半干旱区的中生种水分亏缺表现出同样的日变化趋势,8:00—11:00 水分亏缺显著增加,11:00 后变化比较平稳。而生活在强干旱区的强旱生种水分亏缺日进程与前两类不同,水分亏缺从清晨到傍晚持续大幅增加。

2.4 锦鸡儿属植物的抗逆性

由表 5 可知,POD 和 SOD 活性强旱生种高于旱生种,旱生种高于中生种;CAT 活性旱生种>中生种>强旱生种。细胞膜相对透性和 MDA 含量强旱生种>旱生种>中生种。自由基含量表现为旱生种>中生种>强旱生种。

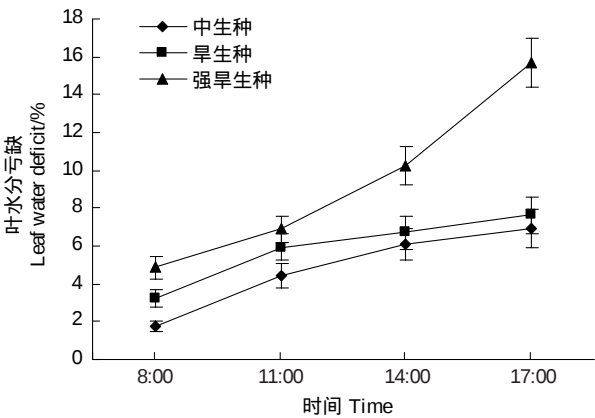


图 1 锦鸡儿属植物的水分亏缺日进程
Fig. 1 Diurnal changes of leaf water deficit of *Caragana*

表 5 锦鸡儿属植物的保护酶和伤害指标
Table 5 Antioxidative enzymes and cell injure index of *Caragana*

种类 Species group	POD 活性 POD activity /($\Delta A_{470} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 鲜重)	CAT 活性 CAT activity /($\text{mgH}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 鲜重)	SOD 活性 SOD activity /(unit/g 鲜重)	相对电导率 Relative electric conductivity /%	MDA 含量 MDA content /(nmol/g 干重)	自由基含量 Free radical content /($\mu\text{mol/g}$ 干重)
中生种 Mesophilous species	135.0c	60.89ab	1521c	13.27b	385.8b	0.703a
旱生种 Xerophilous species	193.8b	80.66a	1761b	14.77b	408.3b	0.775a
强旱生种 Super-xerophilous species	488.7a	41.11b	1952a	25.38a	461.5a	0.460b

表中同一列中不同字母表示差异显著 $P<0.05$

3 讨论

3.1 锦鸡儿属植物的形态适应特征

叶是植物散失水分的主要器官,生活在干旱区的植物通过叶厚度^[12,18]、面积^[13]、被毛^[8,12]等形态变异减少水分散失,这是植物适应干旱环境的重要特征。从本文研究结果来看,锦鸡儿属植物在叶形态、被毛、厚度、面积、长/宽比及 SLA 都表现出与分布区气候条件相一致的特点。分布于半湿润至半干旱区的中生种叶片呈平展或微瓦状、被少量绿色柔毛、叶片薄、椭圆形、面积大、生物量大、SLA 大,这些特性有利于吸收阳光进行活跃的气体交换,为快速生长积累物质基础,使这些种能够在激烈竞争的生物环境中保持竞争优势。分布于强干旱环境中的强旱生种叶片呈瓦状或卷筒状、密被直立或伏帖绢毛、叶片厚、条形或披针形、面积小、生物量小、SLA 小,这些特性缩小了受光面积,增强对光线反射能力,使叶温降低,在一定程度上阻碍了水分散失和气

体交换,提高了这些种的保水能力,使它们更好的适应干旱、高温和强辐射的环境。旱生种的叶片形态特性处于中生种和强旱生种之间。锦鸡儿属植物叶片形态学的一个显著特点是变异幅度大,中生种和强旱生种相比,叶片从平展被少量绿色柔毛到卷筒状密被伏贴绢毛,面积相差 8 倍,生物量相差 3.5 倍,SLA 相差 2 倍。大幅度的形态变异是锦鸡儿属植物适应显著变异的环境而广泛分布的生物学基础之一。以前的研究也表明,锦鸡儿属植物水分输导组织^[19]、叶解剖结构^[1,15]随分布地域的不同也表现出明显差异。

3.2 锦鸡儿属植物的生理生态适应特征

植物能根据土壤水分状况调节细胞渗透势,使植物保持一定的含水量,维持一定的膨压,从而保证细胞很多生理过程的正常运行^[10,20],这种渗透调节功能是其适应环境的重要生理基础^[12]。本文研究表明,生活在半湿润至半干旱区的中生种积累了较少渗透调节物质,细胞渗透势较低;生活在干旱区的旱生种积累了较多的渗透调节物质,细胞渗透势较高;分布于强干旱地区的强旱生种积累了最多的渗透调节物质,细胞渗透势最高;强旱生种细胞渗透势是中生种的 1.8 倍。大幅度细胞渗透调节使该属植物能够在显著不同的条件下吸收水分,既适应在半湿润区分布,也能在强干旱区生活。这是该属植物广泛分布的生理基础之一。

许多研究发现,可溶性糖是植物长期忍耐干旱环境的重要渗透调节物质^[7,10,20]。本文研究发现,随着干旱的加剧,锦鸡儿属植物把更多的光合产物——可溶性糖用于保持细胞渗透势和水分平衡。生活在半湿润至半干旱区的中生种将更多光合作用产物用于生长发育,保持它们在生物环境中的竞争优势。分布于强干旱地区的强旱生种把最多的可溶性糖用于调节渗透势,提高其抗旱性以对付苛刻的非生物环境,因为在这里生存比生长更重要。这种机制赋予锦鸡儿属植物更广泛的适应性。

很多干旱区植物用可溶性蛋白质和游离氨基酸作为渗透调节物质^[20-21]。然而生活在干旱区和强干旱区的锦鸡儿属植物主要通过积累可溶性糖和无机离子调节渗透势来适应极端环境。对于因为水分限制而生产力低下的干旱和强干旱地区来说,这无疑是一种相对节省能量(比合成可溶性蛋白、游离氨基酸、有机酸节省能量)的适应对策。这是该属植物能够在干旱和强干旱地区分布的生理机制之一。

植物组织含水量降低是适应干旱的表现。水分在植物体内的作用不但与其数量有关,而且与存在的状态有关,植物体内的束缚水和自由水含量及其比值常与植物对干旱的适应性有密切关系^[8]。从中生种到旱生种到强旱生种,总水分含量和自由水含量逐渐降低,束缚水含量和束缚水/自由水比值逐渐升高,强旱生种束缚水/自由水比值是中生种的 2 倍。大幅变异的束缚水/自由水比值引起抗旱性的大幅变异,导致该属植物能够适应多样性环境。对于中生种来说,更高的水分含量和自由水含量保证了植物有活跃的代谢和快速生长发育,保持其在半湿润至半干旱地区的竞争优势,而有较弱的抗旱性;对于强旱生种来说,低的水分含量和高的束缚水/自由水比值,导致植物的低代谢,强抗性,保证其在强干旱地区的生存。

水势是人们普遍认同的抗旱能力指标,水势低,抗旱能力强^[5]。旱生种和强旱生种的水势远低于中生种,使这些生活在干旱地区和强干旱地区的锦鸡儿属植物建立起更高的土壤-植物-大气水分梯度,有利于植物吸收土壤水分、保持水分平衡、适应严酷的水分环境。这种机制是建立在良好的渗透调节基础上。

适应干旱区生活的植物种有更强气孔调节能力^[22],以保证它们在干旱环境中保持水分平衡^[23-25]。三种类型的锦鸡儿属植物的气孔导度中生种最高,旱生种次之,强旱生种最低;强旱生种气孔导度比中生种降低了 35%。气孔导度的大幅变异有助于该属植物适应内蒙古高原从东北到西南广泛变异的水分环境。生活在半湿润至半干旱区的中生种,高气孔导度导致了高光合作用和高水分消耗,植物以大量消耗水分为代价保持高速增长;而分布于强干旱区的强旱生种,低气孔导度减少了水分丢失,同时也降低了光合作用,植物以降低生长速率为代价增强抗旱性。

从水分亏缺来看,对于半湿润至半干旱区的中生种来说,由于环境水分条件好,能够满足植物的需求,植物整日保持较少的水分亏缺;生活在干旱区旱生种,环境水分条件不好,但植物能通过形态变异、渗透调节和气孔调节,提高其保水能力,导致其保持较少的水分亏缺;而生活在强干旱区的强旱生种,环境极端干旱,植物虽然发展了形态和生理保水机制,但仍然不能完全对抗环境干旱,所以植物采取了放宽水分恒定性,在高度水

分亏缺时仍然保持生命的适应对策。

SOD、POD 和 CAT 的活性与植物对环境的适应密切相关^[26]。分布于强干旱区的锦鸡儿种 POD 和 SOD 活性最高,分布于干旱区的旱生种次之,分布于半湿润至半干旱区的中生种最低,强旱生种 POD 活性和 SOD 活性分别是中生种的 3.6 倍和 1.3 倍;旱生种的 CAT 活性高于中生种。这些特性都保证了旱生种和强旱生种更好地适应分布区的干旱或强干旱环境,是锦鸡儿属植物广泛适应性的原因之一。分布于强干旱地区强旱生种自由基含量小于旱生种和中生种就是一个具体体现。

细胞膜透性和膜脂质过氧化水平是评定植物对环境反应的方法^[27]。分布于强干旱地区的强旱生种细胞膜相对透性和 MDA 含量高于分布于干旱地区旱生种,后者又高于分布于半湿润至半干旱区的中生种;旱生种自由基含量高于中生种。这些表明虽然旱生种和强旱生种形成了多种形态和生理特点来适应环境,但仍然是不充分的。

4 结论

通过上述分析讨论,得出两点结论:(1) 锦鸡儿属植物的叶片形态结构和生理特性与其分布区的水分条件相适应,大幅度的形态和生理特性变异是该属植物广泛分布的生物学基础。分布于半湿润至半干旱区的中生种依靠活跃的代谢、大量的水分消耗和快速生长使其在激烈竞争的生物环境中保持竞争优势;生活在干旱地区和强干旱地区的旱生种和强旱生种依靠低代谢、节水和高抗旱性来抵抗苛刻的非生物环境;(2) 旱生种和强旱生种主要通过可溶性糖和无机离子的积累,调节细胞质渗透势,保持水分平衡,这是一种相对节省能量的适应对策,有利于该属植物适应因为水分限制而生产力低下的干旱和强干旱环境。

References:

- [1] Yan L, Li H, Liu Y. The anatomical ecology studies on the leaf of 13 species in *Caragana* genus. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(1): 100-106.
- [2] Yang J Y, Yang J, Yang M B, Liang N, Kong W X. Characteristics of the leaf epidermis of *Caragana* plants on the Ordos plateau and their ecological adaptations. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 961-967.
- [3] Ma C C, Gao Y B, Guo H Y Wang J L. Interspecific transition between *Caragana microphylla*, *C. davazamcii* and *C. korshinskii* along geographic gradient. II. Characteristics of photosynthesis and water metabolism. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45: 1228-1237.
- [4] Ma C C, Gao Y B, Jiang F Q, Wang J L, Guo H Y, Wu J B, Su D. The comparison studies of ecological and water regulation characteristics of *Caragana microphylla* and *Caragana stenophylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1442-1451.
- [5] Ma C C, Gao Y B, Guo H Y Wang J L, Wu J B, Xu J S. Physiological adaptations of four dominant *Caragana* species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72: 247-254.
- [6] Ma C C, Gao Y B, Guo H Y, Wu J B, Wang J L. Morphological adaptation of four dominant *Caragana* species in the desert area of the Inner Mongolia Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2308-2312.
- [7] Guicherd P, Peltier J P, Gout E, Bligny R, Marigo G. Osmotic adjustment in *Fraxinus excelsior* L.: malate and mannitol accumulation in leaves under drought conditions. *Trees*, 1997, 11: 155-161.
- [8] Jiang Z R. Probe into drought-resisting mechanism of *Ammopitanthus mongolicus* (Maxim) Cheng F. *Journal Desert Research*, 2000, 20(1): 71-74.
- [9] Patakas A, Nikolaou N, Zioziou E, Radoglou K, Noitsakis B. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. *Plant Science*, 2002, 163: 361-367.
- [10] Peltier J P, Marigo D, Marigo G. Involvement of malate and mannitol in the diurnal regulation of the water struts in members of *oleaceae*. *Trees*, 1997, 12: 27-34.
- [11] Wang M B, Li H J, Cai B F. Water ecophysiological characteristics of *Caragana korshinskii*. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(6): 494-501.
- [12] Quarrie S A, Stojanovic J, Pekic S. Improving drought resistance in small-grained cereals: A case study, progress and prospects. *Plant Growth Regulation*, 1999, 29: 1-21.
- [13] Roux X L, Bariac T. Seasonal variation in soil, grass and shrub water status in a West African humid savanna. *Oecologia*, 1998, 113: 456-466.
- [14] Zhao K F, Feng L T, Zhang S Q. Adaptive physiology of different ecotypes of *Phragmites Communis* to salinity in the Yellow River Delta I. Osmotica and their contributions to the osmotic adjustment. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(5): 463-469.

- [15] Yang J Y, Yang J, Yang M B, Kong W X, Liang N. Leaf anatomical structures and ecological adaptabilities of 8 *Caragana* species on Ordos Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(3): 175-179.
- [16] Zhu C Y, Zhao Y, Liu X, Gao C H, Liu Y L. A study on physiological drought of *Caragana* and other. *Arid Zone Research*, 1996, 13(1): 59-63.
- [17] Li J, Zhang X F. A Quantitative study on abilities of 12 plant species drought resistance of *Caragana* Fabr. by gradient analysis technique. *Journal Desert Research*, 1996, 16(4): 356-359.
- [18] Mendes M M, Gazarini L C, Rodrigues M L. Acclimation of *Myrtus communis* to contrasting Mediterranean light environments-effects on structure and chemical composition of foliage and plant water relations. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45: 165-178.
- [19] Cao W H, Zhang X Y. The secondary xylem anatomy of 6 desert plants of *Caragana*. *Acta Botanica Sinica*, 1991, 33(3): 181-187.
- [20] Iannucci A, Russo M, Arena L, Fonzo N D, Martiniello P. Water deficit effects on osmotic adjustment and solute accumulation in leaves of annual clovers. *European Journal of Agronomy*, 2002, 16: 111-122.
- [21] Close T J. Dehydrins: emergence of a biochemical role of a family of plant dehydration proteins. *Physiologia Plantarum*, 1996, 97: 795-803.
- [22] Vacher J J. Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: Significance of local adaptation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, 68: 99-108.
- [23] Correia O, Barradas M C D. Ecophysiological differences between male and female plants of *Pistacia lentiscus* L. *Plant Ecology*, 2000, 149: 131-142.
- [24] Jiang G, Tang H, Yu M, Dong M, Zhang X. Response of photosynthesis of different plant functional types to environmental changes along Northeast China Transect. *Tree*, 1999, 14: 72-82.
- [25] Marigo G, Peltier J P, Girel J, Pautou G. Success in the demographic expansion of *Fraxinus excelsior* L. *Trees*, 2000, 15: 1-13.
- [26] Lima A L S, DaMatta F M, Pinheiro H A, Totola M R, Loureiro M E. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 2002, 47: 239-247.
- [27] Bajji M, Kinet J M, Lutts S. The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. *Plant Growth Regulation*, 2002, 36: 61-70.

参考文献:

- [1] 燕玲, 李红, 刘艳. 13 种锦鸡儿属植物叶的解剖生态学研究. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1): 100-106.
- [2] 杨九艳, 杨劼, 杨明博, 梁娜, 孔维雪. 鄂尔多斯高原锦鸡儿属植物叶表皮特征及生态适应性植物. *生态学报*, 2005, 29(6): 961-967.
- [4] 马成仓, 高玉葆, 蒋福全, 王金龙, 郭宏宇, 吴建波, 苏丹. 小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿的生态和水分调节特性比较研究. *生态学报*, 2004, 24(7): 1442-1451.
- [6] 马成仓, 高玉葆, 郭宏宇, 吴建波, 王金龙. 内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属(*Caragana*)优势种的形态适应特征. *生态学报*, 2006, 26(7): 2308-2312.
- [8] 蒋志荣. 沙冬青抗旱机理的探讨. *中国沙漠*, 2000, 20(10): 71-74.
- [11] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 柠条的水分生理生态学特性. *植物生态学报*, 1996, 20(6): 494-501.
- [14] 赵可夫, 冯立田, 张圣强. 黄河三角洲不同生态型芦苇对盐度适应生理的研究 I. 渗透调节物质及其贡献. *生态学报*, 1998, 18(5): 463-469.
- [15] 杨九艳, 杨劼, 杨明博, 孔维雪, 梁娜. 鄂尔多斯高原锦鸡儿属植物叶的解剖结构及其生态适应性. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(3): 175-179.
- [16] 朱春云, 赵越, 刘霞, 高崇辉, 刘雅林. 锦鸡儿等旱生树种抗旱生理的研究. *干旱区研究*, 1996, 13(1): 59-63.
- [17] 李进, 张秀伏. 利用梯度分析技术对 12 种锦鸡儿属植物抗旱性的定量研究. *中国沙漠*, 1996, 16(4): 356-359.
- [19] 曹宛虹, 张新英. 锦鸡儿属 6 种沙生植物次生木质部解剖. *植物学报*, 1991, 33(3): 181-187.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 21 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Landscape spatial analysis of a traditional tibetan settlement based on landscape pattern theory and feng-shui theory; the case of Zhagana, Diebu, Gansu Province	SHI Lisha, YAN Lijiao, HUANG Lu, et al (6305)
Temporal-spatial differentiation and its change in the landscape ecological security of Wuyishan Scenery District	YOU Weibin, HE Dongjin, WU Liyun, et al (6317)
Evaluation of eco-sustainability of roads in a tourism area; a case study within Yulong County	JIANG Yiyi (6328)
Study on the compactness assessment model of urban spatial form	ZHAO Jingzhu, SONG Yu, SHI Longyu, et al (6338)
A multi-scale analysis of red-crowned crane's habitat selection at the Yellow River Delta Nature Reserve, Shandong, China	CAO Mingchang, LIU Gaohuan, XU Haigen (6344)
Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China	FAN Feide, WANG Kelin, XIONG Ying, et al (6353)
Construction of an eco-environmental database for watershed-scale data; an example from the Tarim River Basin	GAO Fan, YAN Zhenglong, HUANG Qiang (6363)
Reproductive allocation in dioecious shrub, <i>Rhamnus davurica</i>	WANG Juan, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai, et al (6371)
Age-dependent growth responses of <i>Pinus koraiensis</i> to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China	WANG Xiaoming, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (6378)
Fine-scale spatial point patterns of <i>Stipa krylovii</i> population in different alpine degraded grasslands	ZHAO Chengzhang, REN Heng, SHENG Yaping, et al (6388)
Community structure and population regeneration in remnant <i>Ginkgo biloba</i> stands	YANG Yongchuan, MU Jianping, TANG Cindy Q., et al (6396)
Reproductive characteristics and adaptive evolution of pin and thrum flowers in endangered species, <i>Primula merrilliana</i>	SHAO Jianwen, ZHANG Wenjuan, ZHANG Xiaoping (6410)
Leaf functional traits of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia	LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, et al (6420)
Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile	WANG Liyan, HAN Youzhi, ZHANG Chengliang, et al (6429)
Influence of fire on stands of <i>Pinus massoniana</i> in a karst mountain area of central Guizhou province	ZHANG Xi, CHUI Yingchun, ZHU Jun, et al (6442)
Morphological and physiological adaptation of <i>Caragana</i> species in the Inner Mongolia Plateau	MA Chengcang, GAO Yubao, LI Qingfang, et al (6451)
A comparative study on reasons of degenerated of <i>Haloxylon ammodendron</i> population in the western part of Gurbantunggut desert	SI Langming, LIU Tong, LIU Bin, et al (6460)
Self-thinning of natural broadleaved forests in Baishilazi Nature Reserve ...	ZHOU Yongbin, YIN You, YIN Mingfang, et al (6469)
Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province	ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai (6481)
The relationship between the occurrence of Colorado Potato Beetle, <i>Leptinotarsa decemlineata</i> , and rivers based on GIS: a case study of Shawan Country	LI Chao, ZHANG Zhi, GUO Wenchao, et al (6488)
Occurrence dynamics and trajectory analysis of <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> Guenée in Xing'an Guangxi Municipality in 2010	JIANG Chunxian, QI Huihui, SUN Mingyang, et al (6495)
Adaptability of B-biotype <i>Bemisia tabaci</i> (Gennadius) to Host Shift	ZHOU Fucui, LI Chuanming, GU Aixiang, et al (6505)
Structural change analysis of cecal bacterial flora in different poultry breeds using PCR-DGGE ...	LI Yongzhu, Yongquan Cui (6513)
Effect of chicken manure-amended copper mine tailings on growth of three leguminous species, soil microbial biomass and enzyme activities	ZHANG Hong, SHEN Zhangjun, YANG Guide, et al (6522)
Physiological response of <i>Microcystis</i> to solar UV radiation	WANG Yan, LI Shanshan, LI Jianhong, et al (6532)
Relationship between cell volume and cell carbon and cell nitrogen for ten common dinoflagellates	WANG Yan, LI Ruixiang, DONG Shuanglin, et al (6540)
The community structure and abundance of microcystin-producing cyanobacteria in surface sediment of Lake Taihu in winter	LI Daming, KONG Fanxiang, YU Yang, et al (6551)
Influence of green belt structure on the dispersion of particle pollutants in street canyons	LIN Yinding, WU Xiaogang, HAO Xingyu, et al (6561)
Spatio-temporal variation analysis of urbanization and land use benefit of oasis urban areas in Xinjiang	YANG Yu, LIU Yi, DONG Wen, et al (6568)
Nitrate contamination and source tracing from NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ in groundwater in Weifang, Shandong Province	XU Chunying, LI Yuzhong, LI Qiaozhen, et al (6579)
The impact of rising temperature on spring wheat production in the Yellow River irrigation region of Ningxia	XIAO Guoju, ZHANG Qiang, ZHANG Fengju, et al (6588)
A new hyperspectral index for the estimation of nitrogen contents of wheat canopy	LIANG Liang, YANG Minhua, DENG Kaidong, et al (6594)
The feature of N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River	ZHANG Hui, YANG Zhengli, LUO Liangguo, et al (6606)
Review and Monograph	
Research perspective for the effects of nitrogen deposition on biogenic volatile organic compounds	HUANG Juan, MO Jiangming, KONG Guohui, et al (6616)
Recruitment limitation of plant population: from seed production to sapling establishment	LI Ning, BAI Bing, LU Changhu (6624)
Scientific Note	
Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes	DU Chengfeng, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (6633)

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 21 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 21 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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.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