

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **2012**

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 32 卷 第 17 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 翀,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

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

DOI: 10.5846/stxb201112141913

高建国, 章艺, 吴玉环, 邱志军, 徐根娣, 刘鹏, 李文巧, 姚国浩. 基于生物生态因子分析的长序榆保护策略. 生态学报, 2012, 32(17): 5287-5298.

Gao J G Zhang Y, Wu Y H, Qiu Z J, Xu G D, Liu P, Li W Q, Yao G H. Conservation strategies for *Ulmus elongata* based on the analysis of biological and ecological factors. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5287-5298.

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略

高建国¹, 章 艺², 吴玉环³, 邱志军¹, 徐根娣¹, 刘 鹏^{1,*}, 李文巧¹, 姚国浩¹

(1. 浙江师范大学植物学实验室, 金华 321004; 2. 浙江旅游职业学院, 杭州 311231; 3. 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036)

摘要:长序榆是我国二级重点保护的濒危植物, 对研究榆属、榆科植物的系统发生有重要意义, 并且具有潜在的经济价值。研究长序榆的生境特点, 对该种的引种、科学保护有重大意义, 通过对分布在我国的长序榆近两年的踏查发现, 长序榆主要集中在我国的安徽、浙江、江西和福建等省, 长序榆生境已经严重片段化, 自然干扰和人为干扰是造成其濒临灭绝的主要原因。长序榆多分布在海拔 600—900 m 的阳坡或半阳坡上, 其中最大的种群分布在浙江开化和遂昌, 分布区的特殊地势使其成为长序榆的冰期避难所。对 18 项生物学、生态学指标的主成分分析结果表明, 影响长序榆生存的主要环境因子是: 光照、土壤养分、坡向和海拔。对浙江松阳、江西武宁和福建南平数量极少的种群需优先进行迁地保护, 积极引种栽培; 而对于安徽歙县、浙江临安、开化和遂昌等大种群分布区, 应该扩大核心保护区面积, 避免人为破坏。

关键词:长序榆; 生境; 生物多样性; 保护策略

Conservation strategies for *Ulmus elongata* based on the analysis of biological and ecological factors

GAO Jianguo¹, ZHANG Yi², WU Yuhuan³, QIU Zhijun¹, XU Gendi¹, LIU Peng^{1,*}, LI Wenqiao¹, YAO Guohao¹

1 Laboratory of Botany, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2 Tourism College of Zhejiang China, Hangzhou 311231, China

3 College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China

Abstract: The Grade II protected endangered plant *Ulmus elongata* (Ulmaceae) is a significant phylogenetic member of the genus and the family; it may also have economic value. Research on the habitats occupied by *U. elongata* is important in support of its potential introduction into horticulture and for the conservation of this species. *Ulmus elongata* occurs mainly in Anhui, Fujian, Jiangxi and Zhejiang provinces based on our two years of field surveys in China. We concluded habitats of *U. elongata* have become severely fragmented. The main causes of local extirpations of this species were both natural events and human activities. The main forms of human impact were habitat destruction caused by mining and tourism, the demand for firewood from mature trees by local farmers and the urbanization and development of forest plantations. Natural disturbances were primarily caused by extreme weather, such as the blizzards of 2008, which caused extensive damage to *U. elongata* populations in Suichang County, Zhejiang Province, but natural disturbances cause less damage than human activities. *Ulmus elongata* primarily occurs at altitudes of 600—900m on sunny or partly sunny slopes. Suichang and Kaihua County in Zhejiang Province were glacial refugia and had the largest populations because of their special terrain. A Spearman correlation test shows the correlations of 18 biological and environmental factors to each other were significant

基金项目: 国家自然科学基金(30970188 和 30770161)资助; 浙江省自然科学基金(Y5090339)

收稿日期: 2011-12-14; 修订日期: 2012-06-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sky79@zjnu.cn

($P>0.05$), but only slightly or barely significant because of serious habitat fragmentation, indicating the communities of *U. elongata* were at different stages of succession. Principal component analysis shows the most important biological and environmental factors of habitats were light, soil nutrients, aspect and elevation. We extracted 4 principal components. Principal component 1, representing a light and energy factor, explained 28.408% of the total variance; principal component 2, driven by a soil factor, explained 27.031% of the variance; principal component 3, slope, accounted for 19.063% and principal component 4, elevation, explained 12.221% of the variance. Together, these four principal components explained 86.723% of the total variance. Light and energy, represented by principal component 1, were the main factors affecting populations of *U. elongata* because it is a heliophilous plant. *Ulmus elongata* was mainly found on slopes at higher elevations because destructive human activities had eliminated populations at lower elevations. We concluded *U. elongata* is highly endangered based on its habitat preferences and distribution, which easily led to local extirpations. The protection grade of *U. elongata* should be elevated since National Grade I is more suitable for providing adequate protection for this rare species. Different regions should adopt different protection strategies to meet the immediate needs of *U. elongata* populations. *In-situ* and *ex-situ* conservation should be combined with the sharing scientific knowledge related to *U. elongata*. The prior strategy was *ex-situ* conservation for Songyang County in Zhejiang Province, Wuning County in Jiangxi and Nanping City in Fujian provinces because their populations are small. Active introduction and cultivation were also needed. The core protected areas should be expanded for Shexian County in Anhui, as well as the city of Lin'an and Kaihua and Suichang counties in Zhejiang Province to avoid additional extirpations; human destruction must be prohibited. To the best of our knowledge, habitat loss and fragmentation are the primary reasons this species has become endangered; human activities were the primary reason for past local extirpations of *U. elongata*. However, the physiological and ecological effects of habitat fragmentation on populations of *U. elongata* should be studied further. Also, there is a need to document the evolutionary status of *U. elongata* to verify its status as an *Ulmus* species and its membership in the Ulmaceae to help define priority conservation populations.

Key Words: *Ulmus elongata*; habitat; biodiversity; conservation strategy

生物多样性是人类宝贵的生产、生活资源,它一方面维持自然生态平衡,保持人类的生存环境,另一方面为人类提供了食物、药物、工业原料等,生物多样性更是整个生态系统维持其生态功能的基础和保障^[1]。然而,由于人类工业化、城市化以及环境污染,生物多样性正在以前所未有的速度丧失。生物多样性的丧失不仅会恶化人类的生存环境,还会直接危害人类的生命健康^[2]。2010年10月召开的生物多样性会议中公布了由英国皇家植物园和IUCN相关机构的调查报告,报告指出全球有超过20%的植物物种面临灭绝的危险,有人认为人类可能正在经历第六次生物大灭绝时期^[3]。因此保护生物多样性已经成为人们普遍关注的话题,如何尽量地减少物种损失以及认清物种灭绝的机理是科学家的研究目标。而在构建相对合理的保护策略之前需要对研究对象的生存状况有一定的了解,这是保护生物多样性的第一步。

长序榆(*Ulmus elongata*)是榆科榆属植物,由我国植物分类学家傅立国1979年在浙江遂昌发现的^[4],其花序、花梗及花被性状,花序着生的部位以及开花季节,与产于北美的墨西哥长序榆和翼枝长序榆等几个种相一致^[5],故归为一组,称长序榆组(Sect. *Chaetoptelea* (Liemb.) Schneid)。长序榆的发现丰富了我国榆属资料,对研究北美和东亚植物区系有重要的科学意义,但其数量稀少,且处于极度分散的状态(至今还未发现大片长序榆林的存在),故1999年被确定为国家二级重点保护植物^[6]。由于长序榆树干通直圆满、生长迅速、材质优良,被认为是具有潜在应用价值的树种^[7]。20世纪90年代福建南平来舟林业试验场对长序榆开展了部分研究,如对分布在福建南平的长序榆天然种群的调查发现林冠下无法更新和果实种子传播距离过近是导致野生状态更新不良的原因^[8-9]。康华靖等^[10]在对浙江九龙山的长序榆天然群落调查时发现林下缺少长序榆幼苗或幼树使其处于演替末期阶段。复壮生物学研究发现长序榆属愈伤组织生根类型^[7,11],实生苗基段是

最好的无性繁殖材料^[12],长序榆萌条数量与母桩地茎呈正相关^[13],气温是1年生长序榆幼苗生长的主要环境因子^[14-16]。然而,目前还没有我国长序榆的野生状态的生长状况的调查报告,这对科学地开展保护是不利的。植被生境是植物生活的空间和全部的环境因子的综合,是决定植物群落和生长状况的一个重要原因^[17]。探讨生境中影响长序榆生存和适应的主要因素,明确长序榆种群对环境因子的适应和变化趋势,揭示影响长序榆群落生长的主要环境因子,不仅可以更深入地认识濒危机理,同时也为构建合理的濒危植物优先保护种群的评价体系提供参考^[18]。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

研究地点是我国的长序榆主要分布地,有安徽歙县(AHSX)、浙江临安(ZJLA)清凉峰自然保护区、浙江开化(ZJKH)古田山和浙江遂昌(ZJSC)国家级自然保护区、浙江松阳(ZJSY)、以及江西武宁(JXWN)和福建南平(FJNP)7个地区,属于亚热带气候,土壤均为黑壤或黄壤,年均气温在16.2—19.5℃之间,年降雨量介于1488—1856 mm,年日照时数除浙江开化均超过1700h(表1)。长序榆群落主要伴生物种:乔木有枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、润楠(*Machilus pingii* Cheng ex Yang)、栲树(*Castanopsis fargesii* Franch)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、山胡椒(*Lindera glauca* (Sieb. et Zucc.) Bl.)、山鸡椒(*Laurus cubeba* Lour)、细叶青冈(*Cyclobalanopsis gracilis* (Rehd. et Wils) Cheng et T. Hong)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla* cv. *Pubescens*)等;灌木有乌药(*Lindera aggregata* (Sims) Kosterm)、山矾(*Symplocos sumuntia* Buch.-Ham. ex D. Don)、隔药铃(*Eurya muricata* Dunn)、油茶(*Camellia oleifera* Abel)、乌饭(*Vaccinium brevipedicellatum* C. Y. Wu ex Fang et Z. H. Pan)等;草本有地丁(*Viola philippica* Cav. Lcons et Descr. Pl. Hisp.)、淫羊藿(*Epimedium ogisui* Stearn)、茜草(*Rubia cordifolia* L.)、菝葜(*Smilax china* L.)、三脉紫菀(*Aster ageratoides* Turcz.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)等。

1.2 调查方法

野外调查于2009和2010的6—9月份进行,对长序榆分布较少的浙江松阳和江西武宁划分一个10 m×10 m的样方,其余地区均采用一个20 m×20 m的调查样方。测量所有分布区每株长序榆母树的胸径、树高和枝下高等参数,总计54株,同时记录样方内乔木、灌木和草本植物。使用GPS记录样地的经纬度和海拔,测定样方的坡度、坡向、岩石裸露度和盖度。根据长序榆的受损情况和受人为干扰的程度划定了极其轻微、轻微、中度和严重四个级别。

1.3 比叶面积

选取处于生长旺盛期的长序榆母树3株或以上(不足3株的取不同的叶位,尽量地选取能接受光照的部位)的叶片50片,做出标记,用叶面积扫描仪测量叶面积后,叶片经杀青后80℃烘干至恒重,用1/10000电子天平称干重,并计算比叶面积:SLA=叶面积/叶重量(cm^2/g)。

1.4 土壤和叶片理化测试

在每株母树的四周取0—20 cm土层的土样,每个地区的土样合并为一个,土壤pH值使用Sartorius 300 pH计测定,用EC-215电导仪测定土壤电导率,土水比为1:5,3次重复求平均值。土壤自然风干后过20目的筛子清除土中的枯枝落叶和小石块等杂质,然后置于研钵研碎并混合均匀。长序榆的叶片采用1.3中的材料,用剪刀剪碎后置于研钵研碎并混合均匀。土壤和叶片样品均过200目的筛子,分别用VARIO EL3精密元素分析仪测定C、N含量,并计算C/N的比值。

1.5 数据分析

气象数据均来自当地气象站和附近的气象局。比叶面积值是以10为底的对数平均值。土壤和叶片的C、N含量由百分比例换算成mg/g。

运用主成分分析法对年平均温度、年降雨量、年日照时数、海拔、坡度、坡向、乔木层盖度、岩石裸露度、样地总株数、土壤pH值、土壤电导率、土壤全碳、土壤全氮、土壤C/N、比叶面积、叶片全碳、叶片全氮、叶C/N等

18 项指标(表 1)进行主成分提取。其中坡向(ASP)的定量为:阳坡(1)、半阳坡(2)、半阴坡(3)和阴坡(4)^[19]。

表 1 长序榆各分布地的生物和环境因子

Table 1 The biological and environmental factors of *Ulmus elongata* in different areas

	地区 Areas						
	安徽歙县	浙江临安	浙江开化	江西武宁	浙江松阳	浙江遂昌	福建南平
纬度 Latitude(°N)	30°05′	30°02′	29°17′	28°58′	28°23′	28°23′	26°38′
经度 Longitude(°E)	118°52′	118°56′	118°07′	114°57′	119°20′	118°53′	117°57′
年平均温度 Mean annual temperature, MAT/°C	16.4 (-20—29.5)	16.4 (-13.1—38.2)	15.3 (-6.8—38.1)	16.6 (-13.5—41.9)	17.7 (-8.4—39.9)	16.2 (-10.5—36.5)	19.5 (-5.1—39.4)
年降雨量 Annual precipitation, APR/mm	1774	1628.6	1963.7	1488.3	1700	1855.6	1652.5
年日照时数 Annual sunshine duration, ASD/h	1963.2	1847.3	1334.1	1700	1840	1925	2018
海拔 Elevation, ELE/m	880	610	660	880	670	850	600
坡度 Slope, SLO/(°)	35	20	75	65	70	68	40
坡向 Aspect, ASP	2	3	2	4	3	1	2
乔木层盖度 Tree layer coverage, TLC/%	60	55	75	65	40	70	80
岩石裸露度 Bare rock ratio, BRR/(°)	50	45	30	20	10	80	10
样地总株数 Total number of species, TNS	25(8)	57(8)	150(14)	19(2)	17(1)	45(17)	34(4)
土壤 pH 值 Soil pH, SPH	4.93	4.29	4.04	4.45	3.76	4.13	3.97
土壤电导率 Soil electrical conductivity, SEC/(μS/cm)	539	221	266	161	158	138	260
土壤全碳 Soil total carbon, STC/(mg/g)	123.25	72.31	40.01	24.5	30.94	208.8	153.05
土壤全氮 Soil total nitrogen, STN/(mg/g)	13.07	9.16	7.94	5.73	6.45	21.57	5.48
土壤 C/N Soil C/N, SCN	9.43	7.89	5.05	4.27	4.8	9.6	27.95
比叶面积 Specific leaf area, SLA/(lg)	2.33	2.35	2.11	2.22	2.35	2.23	2.33
叶片全碳 Leaf total carbon, LTC/(mg/g)	426.9	419.5	429.75	424.25	394.55	411.75	391.3
叶片全氮 Leaf total nitrogen, LTN/(mg/g)	43.58	53.56	27.25	25.21	24.51	30.32	28.66
叶 C/N Leaf C/N, LCN	9.8	7.83	15.77	16.83	16.1	13.59	13.66
人为干扰	极其轻微	中度	轻微	中度	严重	极其轻微	严重
自然干扰	极其轻微	极其轻微	极其轻微	极其轻微	中度	严重	极其轻微

MAT 括号内的数据表示年最低和最高气温; TNS 括号内数字表示样地母树数; 相关性检验采用 Spearman 相关分析方法; 所有运算均在 PASW(SPSS 18.0)中进行

2 结果与分析

2.1 长序榆的生境特征

从表 1 可以看出,长序榆主要分布在海拔 600—900 m 之间,长序榆多生长在陡峭山坡的阳坡和半阳坡,占调查总株数的 77.44%。由于长序榆母树较为高大,乔木层盖度至少在 40% 以上。岩石裸露度在浙江遂昌九龙山可以高达 80%。长序榆生长的土壤为酸性黄土或黑土,pH 值 3.76—4.93。除江西武宁较贫瘠外,其余地区的土壤比较肥沃,总碳和总氮水平较高,保证了长序榆的正常生长。对长序榆生长较大的人为干扰主要是开矿(江西武宁)、旅游开发(浙江临安)和森林砍伐(福建南平),如在浙江临安和福建南平对长序榆母

树的直接砍伐造成了其种群急剧减小(图1)。自然干扰主要是雪灾造成的破坏,如浙江松阳和浙江九龙山的长序榆的断冠和断大枝^[20]。分布在安徽歙县的长序榆群落以长序榆+枫香为主,土壤是较为肥沃的黑壤,长序榆生长在小溪旁边,水源较为充足。浙江临安的群落以长序榆+枫香+润楠为主,着生半阴坡,表现出了与安徽歙县相似的生境特征。浙江开化以长序榆+山鸡椒+油茶群落为主,在林窗和林缘有幼苗更新,胸径(DBH)>1 cm 的有120株左右,长序榆母树基本上都生长在坡度高达80°的陡峭山坡上,地势十分险要,是目前所知的长序榆最大的种群分布地。江西武宁群落以长序榆+杉木为主,最大的母树胸径高达71.34 cm,受开矿修筑公路的影响,幼树被滑落的碎石包围。浙江松阳长序榆的伴生树种有杉木和香榧,唯一的一株长序榆母树生长在70°的陡峭山坡上,DBH为36 cm。浙江遂昌的长序榆群落由长序榆+青冈栎+红楠+朴树组成,土壤是腐殖质较为丰富的黑壤,岩石裸露度较大。福建南平主要以长序榆+毛竹为主,群落表现出明显的次生性质,地势较为平缓,土壤是含有有机质较多的黄壤,林窗下有长序榆幼树更新。



图1 A) 浙江临安清凉峰旅游开发和林间道路;B) 江西武宁尧山村钨矿区修筑公路;C) 福建南平来舟的长序榆伐桩;D) 5—7年生长序榆幼树枝丫;E) 2年生长序榆幼苗枝叶^①

Fig. 1 A) A road for tourism and forestry in Qingliangfeng, Lin'an, Zhejiang; B) A road for tungsten mining in Yao village, Wuning, Jiangxi; C) A *U. elongata* stake in Nanping, Fujian; D) The branches of a 5—7 year growth *U. elongata* seedling; E) The leaves and branches of a 2-year seedling

1.6 各环境因子的相关性分析

对长序榆分布区的18项指标的Sparman相关分析可以看出MAT与BRR($r=-0.764$, $P<0.05$)和TNS($r=-0.703$)以及STN($r=-0.739$)和LTC($r=-0.721$)相关性较大,与SLA正相关($r=0.523$),这与棉花叶片SLA随温度的升高而增大是相同的^[21]。ASD与SCN和LCN有显著的正相关关系,而SLA、STC和SCN随着ELE的升高而降低,LTC与LCN随着ELE的上升而升高,这与长序榆投入更多的叶片建成消耗以抵御不良环境有关^[22]。而ASP通过影响长序榆群落接受光照的多少对STC有显著作用,ASP越阴暗,长序榆群落落叶量也越少,导致STC降低。BRR与土壤肥力有一定的正相关关系,说明BRR越高,土壤有机质含量越大^[23]。

① 图1由高建国拍摄

SPH 和 SEC 与其它环境因子相关性不大,说明二者受其它环境因子影响较小。

1.7 环境因子的主成分分析

主成分分析(PCA)是一种简化信息的降维手段,已经广泛应用于植物生理生态研究中。由表 3 以看出,前 4 个主成分贡献率分别是 28.408%、27.031%、19.063% 和 12.221%,累积贡献率达到了 86.723% >85%,说明前 4 个主成分能够很好地反映出长序榆的生境信息。

表 2 各生物和环境因子的相关性矩阵

Table 2 Correlation matrix of biological and environmental factors

	MAT	APR	ASD	ELE	SLO	ASP	TLC	BRR	TNS
MAT	1								
APR	-0.667	1							
ASD	0.396	-0.071	1						
ELE	-0.18	-0.036	-0.25	1					
SLO	-0.27	0.571	-0.607	0.107	1				
ASP	0.444	-.0786 *	-0.468	0.187	-0.168	1			
TLC	-0.126	0.286	0.179	-0.286	0.214	-0.543	1		
BRR	-.0764 *	0.414	0.144	0.342	-0.234	-0.519	-0.036	1	
TNS	-0.703	0.429	-0.107	-0.5	0	-0.468	0.464	0.45	1
SPH	-0.324	-0.214	0.071	0.607	-0.571	0.112	-0.143	0.631	0.036
SEC	-0.126	0.179	0.143	-0.179	-0.286	-0.112	0.25	0.018	0.286
STC	-0.162	0.393	0.786 *	-0.321	-0.286	-.0861 *	0.429	0.505	0.393
STN	-0.739	0.536	0.107	0.286	-0.107	-0.524	-0.25	0.937 **	0.357
SCN	0.018	0.286	0.857 *	-0.464	-0.357	-.0786 *	0.5	0.306	0.357
SLA	0.523	-0.429	0.464	-0.464	-0.571	0.243	-0.571	-0.198	-0.214
LTC	-0.721	0.321	-0.536	0.429	0.107	0.037	0	0.45	0.357
LTN	-0.342	0.036	0.536	-0.214	-0.75	-0.374	0	0.703	0.536
LCN	0.306	-0.143	-0.571	0.321	0.679	0.43	0.107	-0.649	-0.5

	SEC	STC	STN	SCN	SLA	LTC	LTN	LCN
MAT								
APR								
ASD								
ELE								
SLO								
ASP								
TLC								
BRR								
TNS								
SPH								
SEC	1							
STC	0.036	1						
STN	-0.071	0.464	1					
SCN	0.179	0.964 **	0.25	1				
SLA	-0.143	0.143	-0.036	0.214	1			
LTC	0.536	-0.321	0.357	-0.393	-0.607	1		
LTN	0.321	0.643	0.607	0.607	0.321	0.143	1	
LCN	-0.286	-0.679	-0.643	-0.643	-0.464	-0.036	-.0964 **	1

* : $P < 0.05$, * * : $P < 0.01$

这 4 个主成分的线性组合分别为:

$$PC1 = 0.686MAT - 0.505APR + 0.915ASD - 0.157ELE - 0.786SLO + 0.01ASP - 0.192TLC - 0.052BRR - 0.712TNS + 0.191SPH + 0.267SEC + 0.402STC - 0.03STN + 0.606SCN + 0.927SLA - 0.518LTC + 0.485LTN - 0.601LCN;$$

$$PC2 = -0.591MAT + 0.478APR + 0.11ASD + 0.464ELE - 0.301SLO - 0.58ASP + 0.201TLC + 0.892BRR + 0.191TNS + 0.66SPH + 0.523SEC + 0.541STC + 0.789STN - 0.135SCN - 0.126SLA + 0.604LTC + 0.59LTN - 0.625LCN;$$

$$PC3 = 0.373MAT + 0.478APR + 0.196ASD - 0.211ELE + 0.295SLO - 0.776ASP + 0.565TLC + 0.171BRR + 0.162TNS - 0.529SPH - 0.233SEC + 0.708STC + 0.369STN + 0.618SCN - 0.173SLA - 0.536LTC - 0.429LTN + 0.248LCN;$$

$$PC4 = -0.025MAT - 0.257APR + 0.333ASD + 0.747ELE + 0.42SLO + 0.087ASP - 0.315TLC + 0.264BRR - 0.649TNS + 0.107SPH - 0.304SEC + 0.172STC + 0.419STN - 0.308SCN + 0.05SLA - 0.119LTC - 0.376LTN + 0.358LCN。$$

其中在第一个主成分中, MAT、ASD、和长序榆的 SLA 负荷值较大, 这些指标反映出了影响长序榆对光和温度的需求和利用情况, 命名为“光能因子”。第二个主成分中 BRR、SPH、SEC、STC 以及 STN 含量负荷较大, 反映出了长序榆生长的土壤状况, 即“土壤因子”。第三个主成分中载荷最大的是 ASP(-0.776), 反映了能够接受光照的情况, 定义为“光照因子”。ELE 是第四个主成分载荷最大的环境因子(0.747), 定义为“海拔因子”。

表 3 18 个生物和环境因子的主成分分析结果

Table 3 The PCA results of 18 biological and environmental factors

因子 Factors	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4
MAT/℃	0.686	-0.591	0.373	-0.025
APR/mm	-0.505	0.478	0.478	-0.257
ASD/h	0.915	0.11	0.196	0.333
ELE/m	-0.157	0.464	-0.211	0.747
SLO/(°)	-0.786	-0.301	0.295	0.42
ASP	0.01	-0.58	-0.776	0.087
TLC/%	-0.192	0.201	0.565	-0.315
BRR/%	-0.052	0.892	0.171	0.264
TNS	-0.712	0.191	0.162	-0.649
SPH	0.191	0.66	-0.529	0.107
SEC/(μS/cm)	0.267	0.523	-0.233	-0.304
STC/(mg/g)	0.402	0.541	0.708	0.172
STN/(mg/g)	-0.03	0.789	0.369	0.419
SCN	0.606	-0.135	0.618	-0.308
SLA/(lg)	0.927	-0.126	-0.173	0.05
LTC/(mg/g)	-0.518	0.604	-0.536	-0.119
LTN/(mg/g)	0.485	0.59	-0.429	-0.376
LCN	-0.601	-0.625	0.248	0.358
特征值 Eigenvalue	5.113	4.866	3.431	2.2
贡献率 Contribution/%	28.408	27.031	19.063	12.221
累计贡献率 Cumulative contribution/%	28.408	55.439	74.502	86.723

3 讨论

3.1 长序榆濒危原因分析

有研究表明生境丧失^[24]、气候变化^[25]和外来物种入侵^[26]是导致物种灭绝的主要原因,而这些因素的协同作用更会加速灭绝步伐^[27]。城市化和人口膨胀导致物种栖息地破碎是生物多样性锐减的第一位原因^[28]。由于森林砍伐、旅游和矿产开发,长序榆的生境已经严重片段化,部分地区的长序榆母树只有一株或两株(表1),种群数量极少,而过小的种群对逆境的抵抗较差,更容易走向衰落^[29]。长序榆多分布在 600—900 m 陡峭的山坡山,较高的海拔不仅可以在一定程度上避免人为破坏,还有相对较适宜的温度进行新陈代谢。Scherrer 等^[30]对瑞士中部阿尔皮斯山脉植被分布的研究发现,高海拔山坡有较低的温度和丰富的温度带为植物物种应对气候变化提供了避难所。本研究 ELE 是影响长序榆种群的第四个主成分,说明了 ELE 对长序榆种群发展的重要作用。

对长序榆不同分布区环境因子的主成分分析结果表明(表3),光能和光照是影响其种群发展的主要因素,这与长序榆是一阳生树种,需光量大有关。有研究表明长序榆的光补偿点较低,光饱和点较高,对光的适应幅度较大,长序榆不存在自身光合能力不足而导致濒危的原因^[31]。然而长序榆的种子是翅果,主要靠风力传播,在郁闭度大、复杂的地形里传播距离有限^[9]。由种子发育的幼苗仅能在盖度较大的母树下方生长,长期会导致光合不足而死亡,这是在福建南平“只见幼苗,不见幼树”主要原因。野生状态下,有近 80% 的长序榆分布在阳坡或半阳坡,主成分 3“光照因子”单独解释长序榆生境信息的 19.063%,ASP 负荷值的绝对值高达 0.776。ASP 主要影响接受太阳辐射的多少,不同坡向存在显著的水热差异,就热量而言,阳坡接受的太阳辐射要多,温度也相对较高^[32]。由此我们认为光热条件是影响长序榆分布的重要限制因素。土壤对植物的生长和分布具有重要的作用,有研究表明某些濒危植物仅能生长在特定的土壤里^[33],长序榆生长的土壤均是 pH 较低的酸性土壤,或许说明长序榆对土壤的酸碱度有一定的偏好。本研究中 SCN 与各环境因子的相关性不大(表3),这与长序榆的生境片段化^[34]和不同地区的长序榆群落处在不同的演替阶段有关^[35]。

N 是参与植物光合作用和维持植物生命的重要元素,叶片的 N 有 1/2 以上用来构建植物的光合酶系统^[36]。越来越多的研究表明 N 含量与植物的光合作用呈正相关^[37-38],长序榆的 LTN 高达 33.30 mg/g,高于全球陆生植物的 20.6 mg/g 和 20.1 mg/g^[39-40]和中国陆生植物的 20.2 mg/g^[41]。说明了 N 不是限制长序榆生长和分布的营养元素。长序榆 LTN 与 STN 含量呈现正相关($r=0.607$),长序榆叶片 N 的吸收受到 STN 的影响。Batjes 等^[42]在对全球土壤 C、N 与 SCN 的研究发现随着土壤有机质含量的降低,SCN 降低。长序榆各分布地 STN 含量除了福建南平的均较高,平均 SCN 为 9.87,低于全球 SCN 的 13.33^[43]和中国的 10.1—12.1^[44],造成这种现象的原因需要进一步研究,人为干扰造成的氮沉降或许是一重要因素。

3.2 长序榆濒危等级的商榷

浙江开化古田山和遂昌九龙山是长序榆最大种群所在地,是长序榆的进化历史中最大的避难所,这与其山高地险有一定的关系。然而其它地方的长序榆数量极少,如果一旦毁灭,种质基因资源就会消失,如长序榆在陕西镇坪县和浙江庆元百山祖灭绝就是例子。提高长序榆的保护级别,不仅有利于提高人们对濒危物种的重视程度,更为其保护生物学研究提供更多的支持。根据近几年的调查,野外存活的长序榆母树仅为 54 株,DBH>1 cm 的小树算在内也不超过 350 株。长序榆种群数量较少,群落结构单一,生境的地理环境较复杂,生存适应能力强,但容易受到人为干扰。如 20 世纪 90 年代分布在福建南平的长序榆母树有 12 株,而笔者 2010 年的调查发现仅存 4 株。根据 IUCN 对濒危物种等级的划分^[45-46]和我国相关学者对长序榆^[47-48]和其它濒危植物保护等级划分的实践^[49-50],建议提升长序榆的保护级别,列其为国家一级重点保护植物。

3.3 长序榆的保护策略

生物多样性保护的目的是在不减少遗传多样性、保持原始生境前提下,使各物种和谐相处从而有利于生态系统的可持续运转。由于长序榆是 1979 年发现的植物新种,所以在开展长序榆生物学研究之时应该加强宣传,普及长序榆的科学知识^[51]。从目前濒危植物保护的方法来看,主要是以就地保护为主^[52]。就地保护不仅可以维持群落的原生境,而且还可以使群落自然演替。针对目前长序榆分布的情况,安徽歙县、浙江临

安、开化和遂昌等地,应以就地保护为主,同时还应该扩大保护区的核心区面积,避免由于保护面积过小而产生的灭绝事件^[53]。如果确定林内无其它受保护的物种,可以适当砍伐地段内高大的乔木,增大群落的透光量,改善长序榆的生存条件^[8]。

对于浙江松阳、江西武宁和福建南平长序榆母树极少的地区,为了保护长序榆的遗传多样性,需优先以迁地保护为主,并坚决禁止对长序榆的砍伐和对生境的进一步破坏^[54]。在选择长序榆生境时,应充分考虑长序榆的生存能力,选择长序榆能得到充分发展的优越生境^[55],如根据我们的观察,土壤有机质含量较高的向阳山坡就比较有利于长序榆的生长。在迁地保护时,除了采用扦插繁殖扩大种群外,还应该积极探索组培、分子育种等新技术手段培养优质种质资源^[56-57]。物种遗传单一往往是其对环境适应能力变弱和濒危的一个原因。Gil 等^[58]对英国榆(*Ulmus procera*)的研究表明,其基因多样性单一是导致易感荷兰榆病的根本原因。姚小洪等^[59]认为濒危植物长果秤锤树(*Changiostyrax dolichocarpa*)虽然种间基因多样性较为丰富,但处在严重生境片段化的条件下也是极易走向灭绝的。然而,像长序榆这样的大型乔木是不是一定会由于生境片段化导致遗传漂变和自交衰退^[60]、以及遗传多样性的变化对生境破碎的响应是否比其它不濒危的榆属植物更敏感值得进一步研究^[61]。另外,长序榆在榆属、榆科的系统进化地位和如何确定优先保护种群也是下一步研究的重点^[62]。

致谢:本研究采样工作得到安徽歙县清凉峰自然保护站的王山青、浙江临安清凉峰自然保护区、浙江遂昌九龙山自然保护区的工作人员和护林员的帮助,浙江师范大学生化学院教授陈建华、研究生卢品协助野外调查,特此致谢。

References:

- [1] Cardinale B J, Matulich K L, Hooper D U, Byrnes J E, Duffy E, Gamfeldt L, Balvanera P, O'Connor M I, Gonzalez A. The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 2011, 98(3): 572-592.
- [2] Keesing F, Belden L K, Daszak P, Dobson A, Harvell C D, Holt R D, Hudson P, Jolles A, Jones K E, Mitchell C E, Myers S S, Bogich T, Ostfeld R S. Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. *Nature*, 2010, 468(7324): 647-652.
- [3] Barnosky A D, Matzke N, Tomiya S, Wogan G O U, Swartz B, Quental T B, Marshall C, McGuire J L, Lindsey E L, Maguire K C, Mersey B, Ferrer E A. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 2011, 471(7336): 51-57.
- [4] Fu L G, Chen J R, Tang Y C. *Materiae ad floram Ulmacearum sinensium*. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1979, 17(1): 45-47.
- [5] Fu L G. *Notulae de Ulmus sinensibus*. *Journal of Northeast Forestry University*, 1980, (3): 1-40.
- [6] State Forestry Administration and the Ministry of Agriculture, P. R. C. List of Wild Plants Under State Protection (First Batch). Decree No. 4, 1999. [2011-04-13]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2000/content_60072.htm.
- [7] Tian Y, Dong T M, Lai W S, Kong W H, Wu X D, Nie P W. The studies on reproductive characteristics of *Ulmus elongata*. *Journal of Hebei Forestry University*, 1996, 11(S1): 25-29.
- [8] Zou G S. The natural regeneration and reproduction of *Ulmus elongata* populations in Fujian province. *China Forestry Science and Technology*, 1995, (1): 2-4.
- [9] Jiang Y S. The study on natural regeneration of *Ulmus elongata*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2003, 30(4): 55-58.
- [10] Liu P, Kang H J, Liao C C, Pan C C, Wang Z F, Chen W X, Li C H. Structure features of *Ulmus elongata* community in Jiulongshan national natural reserved area. *Journal of Zhejiang Normal University: Natural Science Edition*, 2007, 30(4): 435-439.
- [11] Lai W S. The study on cuttings propagation of *Ulmus elongata*. *China Forestry Science and Technology*, 2000, 14(6): 32-33.
- [12] Zhang J M, Chen Q N, Lai W S. A preliminary report of the experiment on raising seedlings of *Ulmus elongata* by cutting. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 1993, 20(4): 18-23.
- [13] Tian Y, Zhu Y L, Kong L S, Zhang J M, Chen Q N. An experiment on management techniques for the scion-plucking nursery of *Ulmus elongata*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 1997, 24(1): 80-82.
- [14] Zhang J M, Chen Q N, Lai W S. Study on growth dynamics of *Ulmus elongata* seedlings. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 1993, 20(3): 8-13.
- [15] Lai W S. Study on annual growth dynamics of one-year-old seedlings for *Ulmus elongata*. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2001, 25(4): 57-60.

- [16] Lai W S. The height growth of *Ulmus elongata* seedlings and its correlations with climatic factors. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2001, 21(2): 157-160.
- [17] Wang X M, Wang K, Ao W J, Deng J S, Han N, Zhu X Y. Habitat factor analysis for *Torreya grandis* cv. *Merrillii* based on spatial information technology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2550-2554.
- [18] Ma C L, Moseley R K, Chen W Y, Zhou Z K. Plant diversity and priority conservation areas of Northwestern Yunnan, China. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16(3): 757-774.
- [19] Gao J F, Ma K M, Qi J, Feng Y, Feng Z W. Effects of anthropogenic disturbance and environmental pattern on plant diversity in Dongling Mountain, Beijing, China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(12): 2506-2513.
- [20] Zhang Z X, Liu P, Qiu Z J, Liu C S, Chen W X, Li C H, Liao J P, Li H J. Factors influencing ice and snow damage to *Pinus taiwanensis* in Jiulongshan Nature Reserve, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 223-232.
- [21] Akram-Ghaderi F, Soltani A. Leaf area relationships to plant vegetative characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) grown in a temperate sub-humid environment. *International Journal of Plant Production*, 2007, 1(1): 63-71.
- [22] Zhang L, Luo T X. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(6): 844-852.
- [23] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Zhang J G, Hou Y. Effects of planting pattern and bare rock ratio on spatial distribution of soil nutrients in Karst depression area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1459-1463.
- [24] Ewers R M, Didham R K. Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2006, 81(11): 117-142.
- [25] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F, De Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [26] Sax D F, Gaines S D. Species diversity: from global decreases to local increases. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(11): 561-566.
- [27] Brook B W, Sodhi N S, Bradshaw C J A. Synergies among extinction drivers under global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 2008, 23(8): 453-460.
- [28] Jiang Z G, Ma K P. Status quo, challenges and strategy in conservation biology. *Biodiversity Science*, 2009, 17(2): 107-116.
- [29] Karban R, Shiojiri K. Self-recognition affects plant communication and defense. *Ecology Letters*, 2009, 12(6): 502-506.
- [30] Scherrer D, Körner C. Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *Journal of Biogeography*, 2011, 38(2): 406-416.
- [31] Gao J G, Xu G D, Li W Q, Qiu Z J, Liu P. Preliminary studies on photosynthetic characteristics of endangered plant *Ulmus elongata* seedlings. *Ecology and Environment Sciences*, 2011, 20(1): 66-71.
- [32] Fang J Y, Shen Z H, Cui H T. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 10-19.
- [33] Mattner J, Zawko G, Rossetto M, Krauss S L, Dixon K W, Sivasithamparam K. Conservation genetics and implications for restoration of *Hemigenia exilis* (Lamiaceae), a serpentine endemic from Western Australia. *Biological Conservation*, 2002, 107(1): 37-45.
- [34] Tsaliki M, Diekmann M. Effects of habitat fragmentation and soil quality on reproduction in two heathland *Genista* species. *Plant Biology*, 2010, 12(4): 622-629.
- [35] Kulmatiski A, Beard K H, Stevens J R, Cobbold S M. Plant-soil feedbacks: a meta-analytical review. *Ecology Letters*, 2008, 11(9): 980-992.
- [36] Evans J R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C_3 plants. *Oecologia*, 1989, 78(1): 9-19.
- [37] Reich P B, Kloeppel B D, Ellsworth D S, Walters M B. Different photosynthesis-nitrogen relations in deciduous hardwood and evergreen coniferous tree species. *Oecologia*, 1995, 104(1): 24-30.
- [38] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets U, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [39] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [40] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [41] He J S, Wang Z, Wang X, Schmid B, Zuo W, Zhou M, Zheng C, Wang M, Fang J. A test of the generality of leaf trait relationships on the

- Tibetan Plateau. *New Phytologist*, 2006, 170(4): 835-848.
- [42] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 153-161.
- [43] Post W M, Pastor J, Zinke P J, Stangenberger A G. Global patterns of soil nitrogen storage. *Nature*, 1985, 317(6038): 613-616.
- [44] Huang C Y. *Pedology*. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [45] Colvyn M, Burgman M A, Todd C R, Akcakaya H R, Boek C. The treatment of uncertainty and the structure of the IUCN threatened species categories. *Biological Conservation*, 1999, 89(3): 245-249.
- [46] Vié, J C, Hilton-Taylor C, Pollock C, Ragle J, Smart J, Stuart S, Tong R. *The IUCN Red List: a key conservation tool. The 2008 Review of the IUCN Red List of Threatened Species*. Switzerland: IUCN Gland, 2008.
- [47] He P, Xiao Y A, Li X H. Quantitative study of conservation priority of the rare and threatened plants in Jiangxi province. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2003, 21(5): 423-428.
- [48] Fu Z J. The conservation of the rare and endangered plant resources in Hualong Mountain range. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(5): 627-631.
- [49] Wang L, You Z P, Xu Y, Zhang D T. Research status and endangered causes of *Diplopanax stachyanthus*. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 30(3): 344-348.
- [50] Wang Z, Jiang M K, Qin W H. Establishment of priority protection criteria of genetic resource in China. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(5): 49-53.
- [51] Shangguan T L, Zhang F. The endangered causes of *Elaeagnus mollis*, an endemic to China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 502-505.
- [52] Zhang W H, Zu Y G, Liu G B. Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1512-1520.
- [53] Krauss J, Bommarco R, Guardiola M, Heikkinen R K, Helm A, Kuussaari M, Lindborg R, Öckinger E, Pärtel M, Pino J, Pöyry J, Raatikainen K M, Sang A, Stefanescu C, Teder T, Zobel M, Steffan-Dewenter I. Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. *Ecology Letters*, 2010, 13(5): 597-605.
- [54] Wu G, Xiao H, Li J, Ma K M. Relationship between human activities and survival of rare and endangered species *Davidia involucreata*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 493-496.
- [55] Liu P, Hao C Y, Chen Z L, Zhang Z X, Wei F M, Xu S Z. Nutrient element distribution in organs of *Heptacodium miconioides* in different communities and its relationship with soil nutrients. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 304-312.
- [56] Trusty J L, Miller I, Boyd R S, Goertzen L R, Pence V C, Blair B L. Ex situ conservation of the federally endangered plant species *Clematis socialis* Kral (Ranunculaceae). *Natural Areas Journal*, 2009, 29(4): 376-384.
- [57] Fay M F. Conservation of rare and endangered plants using in vitro methods. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 1992, 28(1): 1-4.
- [58] Gil L, Fuentes-Utrilla P, Soto Á, Cervera M T, Collada C. Phylogeography: English elm is a 2,000-year-old Roman clone. *Nature*, 2004, 431(7012): 1053.
- [59] Yao X, Ye Q, Kang M, Huang H. Microsatellite analysis reveals interpopulation differentiation and gene flow in the endangered tree *Changiosyrax dolichocarpa* (Styracaceae) with fragmented distribution in central China. *New Phytologist*, 2007, 176(2): 472-480.
- [60] Kramer A T, Ison J L, Ashley M V, Howe H F. The paradox of forest fragmentation genetics. *Conservation Biology*, 2008, 22(4): 878-885.
- [61] Honnay O, Jacquemyn H. Susceptibility of common and rare plant species to the genetic consequences of habitat fragmentation. *Conservation Biology*, 2007, 21(3): 823-831.
- [62] Morlon H, Schwilk D W, Bryant J A, Marquet P A, Rebelo A G, Tauss C, Bohannan B J, Green J L. Spatial patterns of phylogenetic diversity. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 141-149.

参考文献:

- [4] 傅立国, 陈家瑞, 汤彦承. 中国榆科植物志资料. *植物分类学报*, 1979, 17(1): 45-47.
- [5] 傅立国. 中国榆属的研究. *东北林业大学学报*, 1980, (3): 1-40.
- [6] 国家林业局和农业部. 国家重点保护野生植物名录(第一批). 第四号令, 1999. [2011-04-13]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2000/content_60072.htm.
- [7] 田野, 董铁民, 赖文胜, 孔维鹤, 吴向东, 聂鹏武. 长序榆繁殖特性的研究. *河北林学院学报*, 1996, 11(增刊): 25-29.
- [8] 邹高顺. 长序榆福建种群的天然更新与繁殖. *林业科技开发*, 1995, (1): 2-4.
- [9] 蒋延生. 长序榆天然更新调查研究. *福建林业科技*, 2003, 30(4): 55-58.
- [10] 刘鹏, 康华靖, 廖承川, 潘成椿, 王樟富, 陈卫新, 李成惠. 浙江九龙山自然保护区长序榆群落结构特征研究. *浙江师范大学学报: 自然*

- 科学版, 2007, 30(4): 435-439.
- [11] 赖文胜. 长序榆扦插繁殖技术研究. 林业科技开发, 2000, 14(6): 32-33.
- [12] 张纪卯, 陈巧女, 赖文胜. 长序榆扦插育苗试验初报. 福建林业科技, 1993, 20(4): 18-23.
- [13] 田野, 朱延林, 孔令省, 张纪卯, 陈巧女. 长序榆采穗圃经营技术试验. 福建林业科技, 1997, 24(1): 80-82.
- [14] 张纪卯, 陈巧女, 赖文胜. 长序榆苗木生长规律的研究. 福建林业科技, 1993, 20(3): 8-13.
- [15] 赖文胜. 长序榆一年生播种苗的年生长规律. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 57-60.
- [16] 赖文胜. 长序榆苗木的高生长及与气象因子的关联分析. 福建林学院学报, 2001, 21(2): 157-160.
- [17] 王小明, 王珂, 敖为赳, 邓劲松, 韩凝, 朱晓芸. 基于空间信息技术的香榧适生环境因子分析. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2550-2554.
- [19] 高俊峰, 马克明, 祁建, 冯云, 冯宗炜. 北京东灵山地区农耕干扰和环境梯度对植物多样性的影响. 西北植物学报, 2008, 28(12): 2506-2513.
- [20] 张志祥, 刘鹏, 邱志军, 刘春生, 陈卫新, 李成惠, 廖进平, 李洪军. 浙江九龙山自然保护区黄山松种群冰雪灾害干扰及其受灾影响因子分析. 植物生态学报, 2010, 34(2): 223-232.
- [22] 张林, 罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展. 植物生态学报, 2004, 28(6): 844-852.
- [23] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1459-1463.
- [28] 蒋志刚, 马克平. 保护生物学的现状、挑战和对策. 生物多样性, 2009, 17(2): 107-116.
- [31] 高建国, 徐根娣, 李文巧, 邱志军, 刘鹏. 濒危植物长序榆 (*Ulmus elongata*) 幼苗光合特性的初步研究. 生态环境学报, 2011, 20(1): 66-71.
- [32] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. 生物多样性, 2004, 12(1): 10-19.
- [44] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [47] 何平, 肖宜安, 李晓红. 江西珍稀濒危植物优先保护定量研究. 武汉植物学研究, 2003, 21(5): 423-428.
- [48] 傅志军. 陕西省化龙山珍稀濒危植物资源及其保护. 山地学报, 2008, 26(5): 627-631.
- [49] 王丽, 游章平, 徐翊, 张定亨. 濒危植物马蹄参的研究现状和濒危原因分析. 植物研究, 2010, 30(3): 344-348.
- [50] 王智, 蒋明康, 秦卫华. 中国遗传资源优先保护等级评价标准的构建. 环境科学与技术, 2008, 31(5): 49-53.
- [51] 上官铁梁, 张峰. 我国特有珍稀植物翅果油树濒危原因分析. 生态学报, 2001, 21(3): 502-505.
- [52] 张文辉, 祖元刚, 刘国彬. 十种濒危植物的种群生态学特征及致危因素分析. 生态学报, 2002, 22(9): 1512-1520.
- [54] 吴刚, 肖寒, 李静, 马克明. 珍稀濒危植物珙桐的生存与人为活动的关系. 应用生态学报, 2000, 11(4): 493-496.
- [55] 刘鹏, 郝朝运, 陈子林, 张志祥, 韦福民, 许士珍. 不同群落类型中七子花器官营养元素分布及其与土壤养分的关系. 土壤学报, 2008, 45(2): 304-312.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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

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 32 卷 第 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 2012)

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:1000717	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