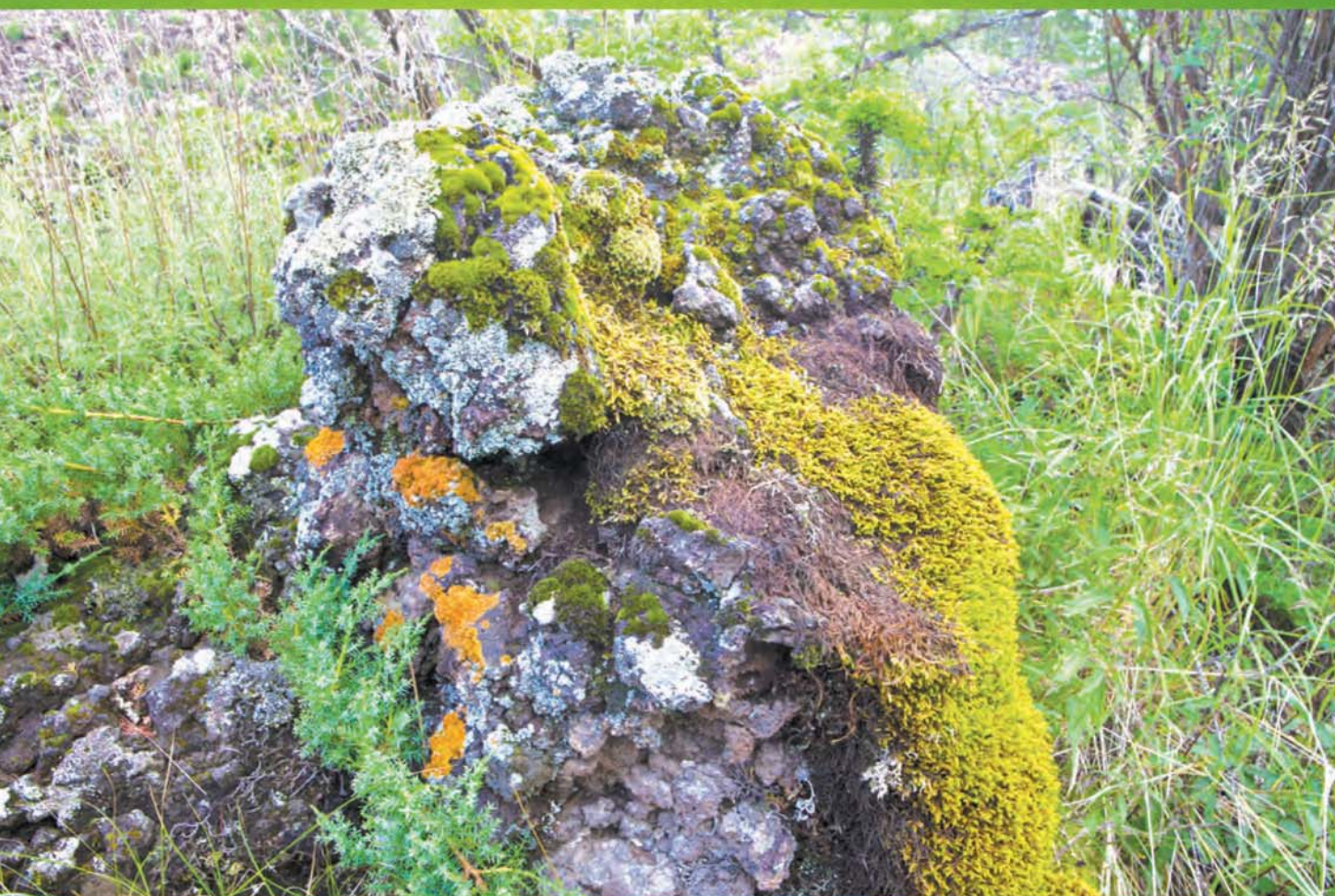


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第6期 Vol.32 No.6 **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 6 期

2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

高原草被退化程度的遥感定量监测——以甘肃省玛曲县为例·····	周坚华,魏怀东,陈芳,等 (1663)
基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价·····	殷旭旺,渠晓东,李庆南,等 (1677)
哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用·····	杞金华,章永江,张一平,等 (1692)
青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系·····	杨金鹏,姜勇,胡晓钟 (1703)
增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究·····	亓伟伟,牛海山,汪诗平,等 (1713)
三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征·····	揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等 (1723)
三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学·····	任玉芹,陈大庆,刘绍平,等 (1734)
强壮前沟藻化感物质分析·····	冀晓青,韩笑天,杨佰娟,等 (1745)
饥饿对中间球海胆 MYP 基因转录表达的影响·····	秦艳杰,孙博林,李霞,等 (1755)
贺兰山牦牛冬春季的生境选择·····	赵宪南,苏云,刘振生,等 (1762)
利用元胞自动机研究一类捕食食饵模型中的斑块扩散现象·····	杨立,李维德 (1773)
转 <i>Cry1Ab</i> 和 <i>Cry1Ac</i> 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响·····	李志毅,隋贺,徐艳博,等 (1783)
光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响·····	范凡,任红敏,吕利华,等 (1790)
荧光素对舞毒蛾核型多角体病毒不同地理品系的增效与光保护作用·····	王树娟,段立清,李海平,等 (1796)
不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征·····	李海峰,曾凡江,桂东伟,等 (1803)
稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析·····	秦晓波,李玉娥,石生伟,等 (1811)
黄土高原典型区域土壤腐殖酸组剖面分布特征·····	党亚爱,李世清,王国栋 (1820)
紫色土菜地生态系统土壤 N_2O 排放及其主要影响因素·····	于亚军,王小国,朱波 (1830)
中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素·····	王芸,欧阳志云,郑华,等 (1839)
基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图·····	刘鹏飞,宋轩,刘晓冰,等 (1846)
淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征·····	杨志敏,陈玉成,张赞,等 (1854)
推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响·····	王红光,于振文,张永丽,等 (1861)
江苏省冬小麦渍害的风险区划·····	吴洪颜,高苹,徐为根,等 (1871)
草原植物根系起始吸水层深度测定方法及其在不同群落状态下的表现·····	郭宇然,王炜,梁存柱,等 (1880)
亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征·····	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (1888)
高寒草原植物群落种间关系的数量分析·····	房飞,胡玉昆,张伟,等 (1898)
菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定·····	孙艳,高海顺,管志勇,等 (1908)
南方菟丝子寄生对喜旱莲子草生长及群落多样性的影响·····	王如魁,管铭,李永慧,等 (1917)
基于 cDNA 克隆的亚热带阔叶林和针叶林生态系统担子菌漆酶基因多样性及其群落结构研究·····	陈香碧,苏以荣,何寻阳,等 (1924)
细柄阿丁枫和米槠细根寿命影响因素·····	黄锦学,凌华,杨智杰,等 (1932)
基于 TM 遥感影像的森林资源线性规划与优化配置研究·····	董斌,陈立平,王萍,等 (1943)
基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析·····	刘艳红,郭晋平,魏清顺 (1951)
专论与综述	
生态补偿效率研究综述·····	赵雪雁 (1960)
研究简报	
黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响·····	陈凯,肖能文,王备新,等 (1970)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 34 * 2012-03	

封面图说: 植物生命演进石——这不是一块普通的火山岩,而是一块集中展示植物“原生演替”过程最有价值的石头。火山熔岩冷却后的玄武岩是无生命无土壤的真正“裸石”,风力使地衣的孢子传入,在一定温湿度环境下,开始出现了壳状地衣,壳状地衣尸体混合了自然风化的岩石碎屑提供的条件使叶状、枝状地衣能够侵入,接着苔藓侵入,是它们启动了土壤的形成,保持了土壤的湿度,并使营养物质反复循环。于是蕨类定居,草丛长了起来,小灌木出现,直到树木生长,最终形成森林。

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

DOI: 10.5846/stxb201102270229

揭胜麟, 樊大勇, 谢宗强, 张想英, 熊高明. 三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征. 生态学报, 2012, 32(6): 1723-1733.

Jie S L, Fan D Y, Xie Z Q, Zhang X Y, Xiong G M. Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1723-1733.

三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征

揭胜麟^{1,2}, 樊大勇¹, 谢宗强^{1,*}, 张想英^{1,2}, 熊高明¹

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:自 2007 年三峡大坝试运行以来, 其独特的人工水位调度节律给当地的水库消落带生态系统带来了巨大的负面影响。植物功能性状可以反映某一特殊生境植物的生理生态过程特殊性, 是指示生态系统结构与功能的有效指标。因此, 在三峡水库消落带形成 2a 后, 于 2009 年调查了消落带的 42 种适生植物以及对照带 33 种植物的 6 个叶片功能性状: 最大净光合速率($A_{\max}$)、叶片气孔导度(G_s)、比叶重(LMA)、叶片全氮含量(N_{mass})、全磷含量(P_{mass})和全钾含量(K_{mass})。运用标准化主轴回归分析对消落带植物叶片各功能性状之间关系进行分析, 并对照全球尺度叶片功能性状数据库, 旨在说明反季节淹水对消落带植物叶片功能性状之间关系与全球尺度对比发生了哪些变化。同时, 运用成对方差 t 检验的分析方法, 对比了在消落带和对照带都存在的 33 个种的叶片光合与营养性状之间的差异, 以阐明消落带植物对消落带特殊生境的生理响应。结果表明: (1) 消落带植物叶片各性状关系呈现出与全球尺度基本一致的格局, 表现出植物叶性状之间关系的趋同性; (2) 消落带植物 A_{mass} 、 N_{mass} 、 P_{mass} 和 K_{mass} 显著高于全球尺度, 而 LMA 则显著低于全球尺度。处于驯化阶段的消落带植物各叶片性状处在全球叶片经济型谱“低投入-快速回收”的一端。 (3) 消落带植物叶片 A_{mass} 与对照带相比, 有显著提高。表明三峡水库消落带植物叶片光合能力得到显著提高, 这可能是其适应消落带特殊生境的关键生理生态对策之一。

关键词: 三峡消落带 叶片性状特征; 趋同性; 标准化主轴回归分析

Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China

JIE Shenglin^{1,2}, FAN Dayong¹, XIE Zongqiang^{1,*}, ZHANG Xiangying^{1,2}, XIONG Gaoming¹

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Since 2007, the unique anthropogenic hydrological regime of the Three Gorges Dam has had significant negative impacts on the reservoir riparian ecosystem. These include changes in the local climate pattern, habitat fragmentation, generation of methane gas, loss of biodiversity, and inundation of cities and highly productive agricultural land. The functional traits of plants in a particular area can reflect the eco-physiological processes that are specific to that environment, and can serve as crucial indicators of the structure and function of the local ecosystem. These functional traits play a key role in adaptation to anti-seasonal flooding, and might reveal clues about the adaptation mechanisms of plants in this area. Therefore, two years after the formation of the reservoir riparian region in the Three Gorges Area, we investigated six leaf functional traits of 42 species growing in the the reservoir riparian region in 2009. As a reference, we also investigated these functional traits in 33 species in an upland non-flooding belt, to determine variations in physiological processes associated with anti-seasonal flooding. The six leaf functional traits were leaf mass per area (LMA), maximum

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2007CB108900); 国家水专项课题 (2009ZX07104-003-05); 中国科学院西部行动计划 (KZCX2-XB2-07)

收稿日期: 2011-02-27; **修订日期:** 2011-05-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xie@ibcas.ac.cn

net photosynthesis rate ($A_{\max}$), leaf stomata conductance (G_s), leaf nitrogen content per mass (N_{mass}), leaf phosphorus content per mass (P_{mass}) and leaf potassium content per mass (K_{mass}). A standardized major axis analysis method was used to determine the relationships among these traits. We compared these results with data in the global plant trait network to determine how the leaf traits relationships for plants in the the reservoir riparian region compare with those in the worldwide leaf spectrum. For species that coexist in the reservoir riparian region and non-flooding belt, we used paired-sample T-tests to compare differences in leaf functional traits between the two areas, to determine which physiological processes are important for growth in the the reservoir riparian region environment. The results showed that: 1) although there were slight differences in the standardized major axis slopes/elevation of some paired traits, there were similar patterns of leaf functional trait relationships between the reservoir riparian region and the global plant trait network, indicating convergence of leaf traits in the the reservoir riparian region ecosystem. 2) $A_{\max}$, N_{mass} , P_{mass} , and K_{mass} of the reservoir riparian region species were significantly higher than their corresponding values in the global plant trait network, but the LMAs of the reservoir riparian region species were statistically lower than LMA values in the global plant trait network. The traits of the reservoir riparian region species were constrained to the lower-investment and faster-return end of the global leaf spectrum, and were consistent with typical fast-growing species. 3) When the 33 species common to both the reservoir riparian region and non-flooding belt were compared, we found that those in the the reservoir riparian region showed significantly higher $A_{\max}$. The results of the present study suggest that enhanced photosynthetic capacity is one of the key physiological strategies for growth in the the reservoir riparian region environment. However, there are many uncertainties that remain after this study, because the the reservoir riparian region area is only two years old and plants are likely to be in the response or acclimation stages rather than the adaptation stage. Therefore, long-term investigations and observations should be continued in this area to identify and monitor adaptive changes in plant species.

Key Words: Reservoir riparian region; leaf functional traits; convergence of leaf trait relationships; standardized major axis analysis method

三峡水库建成后,采取“蓄清排浑”的运行方式^[1],这种水库调水节律给库岸生态系统带来了巨大的负面影响^[2-3],部分原生长在水库消落带内的植物因不能适应其特殊生境而消亡,这是导致三峡水库消落带存在诸多潜在生态环境问题的重要原因之一^[4]。探讨水库消落带适生植物的生理生态适应机制是水库消落带植被恢复的重要基础,也是解决水库消落带生态环境问题的前提。

目前针对水库消落带适生植物的生理生态适应机制的研究,已有许多成果^[5-9]。但仍存在以下问题:(1)已有研究成果仅仅是针对水库消落带水淹逆境进行的模拟淹水实验结果^[10-11],而水库消落带植物不仅需要应对每年3—8个月的淹水胁迫,夏季伏旱以及水淹导致的土壤养分流失也会引起适宜植物的生理生态过程发生变化;(2)已有研究成果仅针对个别种的某一些生理生态过程,没有深入探究这些种的生理生态过程是否有趋同性,单个种对特殊生境的适应机理并不能代表所有适宜植物的适应机制。某一区域的植物功能性状谱可以反映该区域植物的生理生态过程特殊性,具有灵敏和快速响应环境的特点,是指示生态系统结构与功能的有效指标^[12]。植物功能性状的变异性则可以作为监测环境质量的有效生物学工具,应用于生态保护与恢复^[13-15]。一项对于英国低地野生种的研究表明,植物的功能性状可以在恢复生态学中用于预测该物种在植被恢复过程中的表现及恢复效果^[16]。研究和构建水库消落带适宜植物的功能性状谱是对目前相关研究的重要补充。植物叶片经济型谱是植物功能性状谱的重要组成部分,研究水库消落带特殊生境下植物叶片性状的特点,可进一步揭示植物适应水库消落带特殊生境的生理生态机制,为水库消落带环境问题治理提供理论参考。

通常认为植物叶片寿命(leaf lifespan, LL)、单位面积叶片的干物质重(leaf mass per area, LMA)、最大净光合速率(maximum net photosynthesis rate, $A_{\max}$)、暗呼吸速率(dark respiration, R_d)、单位质量叶片含氮量

(leaf nitrogen per mass, N_{mass})、单位质量叶片含磷量(leaf phosphorus per mass, P_{mass})是组成全球“叶片经济型谱(leaf economics spectrum)”的六大核心性状^[17]。并且在全球尺度上不同的生长型、功能型、生物群落植物叶片的性状之间的关系相似^[18]。一般来说,植物投入的“构造费用”少的叶片 LMA 低、 A_{max} 高、LL 低^[19],且叶片功能性状与植物生长速率以及存活率紧密相关^[20]。然而,这并不代表在特定区域内叶片经济型谱内某个性状关系必须与全球尺度保持一致^[21],贺金生等对青藏高原植物叶片功能性状关系研究发现,高寒低温生境下植物叶片的光合与氮素关系(反映了光合氮素利用效率)与全球尺度不同^[22],这种叶片经济型谱的偏差反映了该区域植物对高寒低温生境适应的特殊生理生态机制。

基于以上考虑,本研究在三峡库区消落带形成 2 a 后,选取生长在三峡水库消落带的 42 种植物,测定了其六大叶片功能性状指标,分析了它们之间的关系。同时,对比研究了三峡水库消落带植物叶片功能性状与全球植物叶片性状网络库(global plant trait network)之间的差异。此外,对三峡水库消落带和对照带(海拔 175—180 m,未经历淹水)共有的 33 种植物的叶片功能性状进行了成对方差检验。目的在于:(1)初步绘制三峡水库消落带植物叶片经济型谱,阐明水库消落带植物叶片功能性状的特征;(2)探究在三峡大坝反季节淹水条件下,库区消落带植物叶片功能性状间的关系与全球尺度下叶片功能性状之间关系是否以及产生何种差异;(3)经过 2a 反季节淹水,消落带植物叶片功能性状特征与未淹水的对照带发生了哪些变化?

1 材料和方法

1.1 实验样地自然概况

实验样地位于重庆忠县石宝镇共和村。忠县地处三峡库区,位于 $107^{\circ}32'42''$ — $108^{\circ}14'00''$ E, $30^{\circ}03'03''$ — $30^{\circ}35'35''$ N^[23],属暖湿亚热带东南季风区,是亚热带东南季风区山地气候。全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 5787°C ,年均温 18.2°C ,无霜期 341 d,日照时数 1327.5 h,日照率 29%,太阳总辐射能 $83.7 \times 4.18 \text{ kJ}/\text{cm}^2$,年降雨量 1200 mm,相对湿度 80%。样地由废弃的梯田组成,总面积达 4.5 hm^2 (长 450 m,宽 100 m)。消落带即由这些弃耕地组成,从上至下高差 30 m。

1.2 实验物种选择及生活型划分

由于在实验样地内不同海拔生长的植物,1a 内遭受水淹的时间不同(155—165 m 大约为 200 d;175—180 m 为对照,无遭受水淹),将样地植物生长区域划分为消落带(reservoir riparian region,海拔 155—165 m)和对照带(non-flooding belt,海拔 175—180 m),分别进行各叶片功能性状指标的测定。物种的选择则是根据样地内植物群落组成特征,在海拔为 155—165 m 的消落带和海拔为 175—180 m 的对照带分别选取。其中消落带植物 42 种,对照带植物 33 种,共有种 33 种,隶属于 22 科。分为 4 种生活型:乔木 5 种、灌木 7 种、1 年生草本 14 种和多年生草本 16 种,所测物种名录见表 1。

1.3 单位叶面积最大净光合速率(A_{max})以及叶片气孔导度(G_s)的测定

由于 2009 年长江忠县段水位至 5 月下旬才退至 155 m 以下,故选择 2009 年 8 月—9 月对实验样地里植物进行光合速率的测定。使用 LI-6400 便携式光合作用系统(LI-COR, Inc, USA)测定叶片的最大净光合速率(A_{max})。测定时,消落带区域分为 155 m 和 165 m 两个海拔,对照带区域分为 175 m 和 180 m 两个海拔,每个海拔每个物种选择 3 株长势相近的植株,每株选取 3 片完全舒展并且成熟的未受损的叶片作为测定对象。测得光合值后将 155、165 m 数据平均值记录为消落带,175、180 m 数据平均值记录为对照带(即每个位点每个植物种至少 6 个重复)。测定时使用开放气路,各参数分别控制如下:空气流速为 $0.5 \text{ L}/\text{min}$,叶温控制在 28°C 左右,空气相对湿度控制在 50%—70%, CO_2 浓度 380 — $390 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。为了测定值的准确,测定时间都选在天气晴朗的 8:30—11:30 进行,为避免早晨测定时同一物种的光合值差异过大,测定过程中使用红蓝光源,光强控制为 $1200 \mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。测定时,先对叶片进行光合诱导,待叶片光合值稳定后每隔 1 min 记录 1 个值,连续记录 3 次;测定 A_{max} 的同时, G_s 数据也同时测得。

1.4 比叶重(LMA)的测定

从每株测定最大净光合速率的植物上采集 10—15 片完全展开的健康叶片,装入自封袋。带回室内,用

CanonD500 扫描仪扫成电子图片格式,运用叶面积分析软件(WinRHIZO, 叶/根系分析系统)计算所采叶片叶面积。最后将所扫描的叶片放入烘箱,在 65 ℃ 条件下,烘 48 h 至恒重,记录干重^[24]。比叶重(LMA)定义为叶片干重与叶面积之比(g/m^{-2})。

表 1 实验所测物种名录

Table 1 The experimental species list

物种 Species	科名 Family name	生活型 Growth form	生长区域 Growth area
八角枫 <i>Alangium chinensis</i>	Alangiaceae	乔木	对照带 消落带
白苏 <i>Perilla frutescens</i>	Lamiaceae	一年生草本	对照带 消落带
白英 <i>Solanum lyratum</i>	Solanaceae	多年生草本	对照带 消落带
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	Asteraceae	一年生草本	对照带 消落带
插田泡 <i>Rubus coreanus</i>	Rosaceae	灌木	对照带 消落带
车前 <i>Plantago psyllium</i>	Plantaginaceae	多年生草本	对照带 消落带
地枇杷 <i>Ficus tikoua</i>	Moraceae	多年生草本	对照带 消落带
枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	Juglandaceae	乔木	对照带 消落带
杠板归 <i>Polygonum perfoliatum</i>	Polygonaceae	一年生草本	消落带
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	Poaceae	一年生草本	对照带 消落带
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	Poaceae	多年生草本	对照带 消落带
枸树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	Moraceae	乔木	对照带 消落带
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	Verbenaceae	灌木	对照带 消落带
接骨木 <i>Sambucus williamsii</i>	Caprifoliaceae	灌木	对照带 消落带
筋骨草 <i>Ajuga ciliata</i>	Lamiaceae	多年生草本	消落带
苎草 <i>Arthraxon hispidus</i>	Poaceae	一年生草本	对照带 消落带
爵床 <i>Rostellularia procumbens</i>	Acanthaceae	多年生草本	对照带 消落带
苦楝 <i>Melia azedarach</i>	Meliaceae	乔木	对照带 消落带
柳树 <i>Salix matsudana</i>	Salicaceae	乔木	对照带 消落带
龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	Solanaceae	一年生草本	消落带
牛鞭草 <i>Hemarthria altissima</i>	Poaceae	多年生草本	对照带 消落带
牛膝 <i>Achyranthes aspera</i>	Amaranthaceae	多年生草本	对照带 消落带
蛇葡萄 <i>Ampelopsis delavayana</i>	Vitaceae	灌木	对照带 消落带
鬼针草 <i>Bidens bipinnata</i>	Faraceae	一年生草本	对照带 消落带
桑 <i>Morus alba</i>	Moraceae	灌木	对照带 消落带
商陆 <i>Phytolacca acinosa</i>	Phytolaccaceae	多年生草本	消落带
水花生 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	Amaranthaceae	一年生草本	对照带 消落带
酸浆 <i>Physalis alkekengi</i>	Solanaceae	多年生草本	消落带
铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>	Euphorbiaceae	一年生草本	对照带 消落带
土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i>	Chenopodiaceae	多年生草本	消落带
乌敛梅 <i>Cayratia japonica</i>	Vitaceae	多年生草本	对照带 消落带
夏至草 <i>Lagopsis marrubiastrum</i>	Lamiaceae	多年生草本	消落带
小飞蓬 <i>Erigeron acris</i>	Asteraceae	多年生草本	对照带 消落带
烟草 <i>Nicotiana glauca</i>	Solanaceae	一年生草本	对照带 消落带
烟管头草 <i>Carpesium cernuum</i>	Asteraceae	多年生草本	对照带 消落带
野菊 <i>Dendranthema indicum</i>	Asteraceae	多年生草本	对照带 消落带
野苋 <i>Amaranthus lividus</i>	Amaranthaceae	一年生草本	对照带 消落带
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	Asteraceae	一年生草本	对照带 消落带
益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	Lamiaceae	一年生草本	消落带
莠竹 <i>Microstegium vimineum var. imberbe</i>	Poaceae	一年生草本	对照带 消落带
苎麻 <i>Boehmeria nivea</i>	Urticaceae	灌木	对照带 消落带
紫藤 <i>Wisteria sinensis</i>	Faraceae	灌木	消落带

1.5 叶片全氮(N_{mass})、全磷(P_{mass})、全钾(K_{mass})含量的测定

烘干的叶片样品自野外带回,在实验室进行叶片营养元素的测定。叶片全氮含量采用凯式定氮法测定,全磷含量采用钼锑比色法测定,全钾含量采用原子光度吸收法测定。 N_{mass} 、 P_{mass} 、 K_{mass} 定义为单位重量叶片的全氮、全磷、全钾含量;PNUE (Photosynthesis nitrogen utilization efficiency) 定义为 $A_{\text{mass}}/N_{\text{mass}}$,即光合氮素利用效率;PPUE (Photosynthesis phosphorus utilization efficiency) 定义为 $A_{\text{mass}}/P_{\text{mass}}$,即光合磷素利用效率。

1.6 数据分析与处理

首先对每个测得的功能性状数据计算个体内算术平均值和种内算术平均值,然后以物种平均值进行以 10 为底的对数转换,以更明显地体现出各叶片性状之间的关系^[17, 25-27]。叶性状相互关系的参数估计采用标准化主轴估计 (Standardized Major Axis Estimation, SMA) 方法,由软件 (S) MATR Version 2.0 来完成计算^[28] (<http://www.bio.mq.edu.au/ecology/SMATR>)^[29]。此外,我们还引用了 GLOPNET^[17] 中叶性状数据,与我们在样地里取得的数据进行对比,评价实验获得的数据是否与全球尺度中叶性状关系具有相似的格局(数据来源于 Wright 等在 2004 年发表在 nature 上的文章《The worldwide leaf economic spectrum》的附加信息,<http://www.nature.com/nature/journal/v428/n6985/supinfo/nature02403.html>)。

各叶性状在消落带、对照带以及全球尺度 3 个点上的均值差异性分析运用 SPSS13.0 统计软件包 (SPSS 13.0 for Windows) 中的单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 来完成。消落带和对照带之间 33 个相同物种各叶性状之间均值差异性运用成对 T 检验来完成。

2 实验结果

2.1 消落带与全球尺度叶片性状值的比较

均值统计表明,消落带各叶片性状值分别为:LMA 44.51 g/m², A_{mass} 0.41 nmol g⁻¹ s⁻¹, N_{mass} 3.31%, P_{mass} 0.30%, 与此相对应的全球尺度的值分别为:127.70 g/m², 0.13 nmol g⁻¹ s⁻¹, 1.94% 和 0.11% (表 2)。消落带的 A_{mass} 显著高于全球尺度的平均水平 ($P<0.05$), 而 LMA 显著低于与全球尺度的平均水平 ($P<0.05$)。对于 N_{mass} 、 P_{mass} PNUE 与 PPUE,消落带植物叶片都显著高于全球尺度 ($P<0.05$) (表 3)。

表 2 消落带与全球尺度下^[17]叶性状均值比较

Table 2 Leaf traits in the reservoir riparian region in comparison with the global plant trait network^[17]

叶性状 Leaf trait	生长型 Growth Form	消落带 the reservoir riparian region			全球尺度 the global plant trait network		
		物种数 <i>n</i>	平均值 Mean	标准误 SE	物种数 <i>n</i>	平均值 Mean	标准误 SE
比叶重 (g/m ²)	全部	42	44.51a	1.77	2371	127.70b	2.43
LMA	草本	30	42.25a	0.75	633	69.81b	0.01
最大净光合速率/($\mu\text{mol g}^{-1} \text{s}^{-1}$)	全部	42	0.41a	0.03	770	0.13b	0.00
A_{mass}	草本	30	0.43a	0.03	178	0.24b	0.03
单位叶质量氮含量/(mg/g)	全部	42	3.31a	0.13	2061	1.94b	0.02
N_{mass}	草本	30	3.31a	0.12	474	2.64b	0.01
光合氮素利用效率/($\mu\text{mol g}^{-1} \text{s}^{-1}$)	全部	42	0.13a	0.01	712	0.06b	0.00
$A_{\text{mass}}/N_{\text{mass}}$	草本	30	0.13a	0.01	176	0.73b	0.04
单位叶质量磷含量/(mg/g)	全部	42	0.30a	0.01	752	0.11b	0.00
P_{mass}	草本	30	0.32a	0.09	16	0.08b	0.02
光合磷素利用效率/($\mu\text{mol g}^{-1} \text{s}^{-1}$)	全部	42	1.44a	0.10	204	1.06b	0.05
$A_{\text{mass}}/P_{\text{mass}}$	草本	30	1.41a	0.09	7	0.78b	0.14
光合水分利用效率/% A_{area}/G_s	全部	42	0.05a	0.01	498	0.05a	0.00

a, b 表示均值出现显著性差异 ($P<0.05$)

2.2 消落带与对照带共有种叶片性状值的比较

将消落带与对照带的 33 个共有种进行比较时,发现某些叶片性状值出现微小的差异。消落带植物叶片

的 A_{mass} , N_{mass} , P_{mass} 和 K_{mass} 都高于对照带植物,且表现出极显著的差异性, (P 值分别为: $P=0.029$, $P=0.015$, $P<0.0001$, $P=0.018$) (图 1), 而 LMA、PNUE、PPUE、WUE 以及 G_s 都无显著差异 ($P>0.05$) (图 1)。

表 3 消落带与全球尺度以质量为底的叶性状关系比较

Table 3 Comparison of mass based bivariate relationships between the leaf traits between the global plant trait network and the reservoir riparian region

		logLMA	log A_{mass}	log N_{mass}	log P_{mass}	log K_{mass}
比叶重/(g/m ²)	全球尺度		-0.75	-1.28	-0.82	none
logLMA/(g/m ²)	消落带		-0.58		-0.83	
最大净光合速率	全球尺度	$R^2=0.50$ $P<0.0001$		1.72	1.03	—
log A_{mass} /($\mu\text{mol g}^{-1} \text{s}^{-1}$)	消落带	$R^2=0.35$ $P<0.0001$		1.73	1.43	
单位叶质量氮含量	全球尺度	$R^2=0.57$ $P<0.0001$	$R^2=0.53$ $P<0.0001$		0.66	—
log N_{mass} /(mg/g)	消落带		$R^2=0.21$ $P=0.003$		0.83	0.56
单位叶质量磷含量	全球尺度	$R^2=0.55$ $P<0.0001$	$R^2=0.16$ $P<0.0001$	$R^2=0.72$ $P<0.0001$		—
log P_{mass} /(mg/g)	消落带	$R^2=0.11$ $P=0.032$	$R^2=0.13$ $P=0.021$	$R^2=0.27$ $P<0.0001$		0.68
单位叶质量钾含量	全球尺度	—	—	—	—	
log K_{mass} /(mg/g)	消落带			$R^2=0.17$ $P=0.007$	$R^2=0.26$ $P=0.001$	

表格的纵列是标准化主轴分析的自变量,横列是标准化主轴分析的因变量,右上部分是标准化主轴分析的斜率,左下部分是相关系数的平方以及 P 值; $P<0.05$ 相关显著; $P<0.01$ 相关极显著

2.3 消落带与全球尺度植物叶片各性状之间关系的比较

本研究中的各叶片性状之间的关系与之前的报道相一致^[17-18, 27, 30]。消落带植物叶片的 A_{mass} , P_{mass} 与 LMA 呈显著负相关关系 (表 3, $P<0.0001$ 和 $P=0.032$), 然而, N_{mass} , K_{mass} 与 LMA 之间的负相关关系则不明显 ($P>0.05$), A_{mass} , N_{mass} 和 P_{mass} , N_{mass} , P_{mass} 和 K_{mass} 两两之间呈极显著的正相关关系 ($P<0.01$) (表 3)。将本研究中的消落带植物叶片之间的关系与全球尺度下植物叶片之间关系相比较时,二者在斜率上无明显差异,如 N_{mass} - P_{mass} (图 2), 而在 LMA- A_{mass} , A_{mass} - N_{mass} , 和 A_{mass} - P_{mass} 的斜率/位移上则出现了显著的差异 ($P<0.05$) (图 2)。从图 2 中可以看出消落带植物是处于全球叶片经济型谱的低投资-快回收的一端,具有速生种的特征。

3 讨论

对于河岸生态系统(水库消落带生态系统是河岸生态系统的一部分)的研究由来已久^[31-33],尤其是河岸植被对水淹生境的响应^[34],河岸生态系统植被的重建也越来越受关注^[35-37]。然而,目前鲜有关于河岸生态系统植物功能性状与环境之间关系的报道。如前所述,已有诸多研究表明植物叶片的 6 个“核心性状”之间的关系在全球的不同植物功能型以及功能群之间都具有相似的关系^[17]。本研究中消落带与对照带植物叶片功能性状关系结果也与前人研究相似。

3.1 水库消落带植物叶片性状关系的趋同性

对于消落带所有物种来说,各叶片性状值范围变异很大,如 LMA (3.32 倍), N_{mass} (3.57 倍), A_{mass} (10.23 倍), A_{area} (6.17 倍), P_{mass} (6.58 倍), K_{mass} (7.92 倍)。尽管各性状值的范围存在如此大的变异,标准化主轴分析结果表明消落带植物叶片各性状关系与全球尺度植物叶片各性状关系基本一致 (图 2)。所以,尽管有着高达 30 m 的水淹强度,可供植物生长的生长周期也非常短暂,消落带植物叶片性状之间的关系呈现出与全球尺度相同的格局,进一步证实了植物叶片功能性状之间具有趋同效应^[17, 25, 38]。

与全球尺度平均水平相比,消落带植物叶片的 A_{mass} , N_{mass} 和 P_{mass} 更高,而 LMA 更低 ($P<0.05$, 表 2)。造

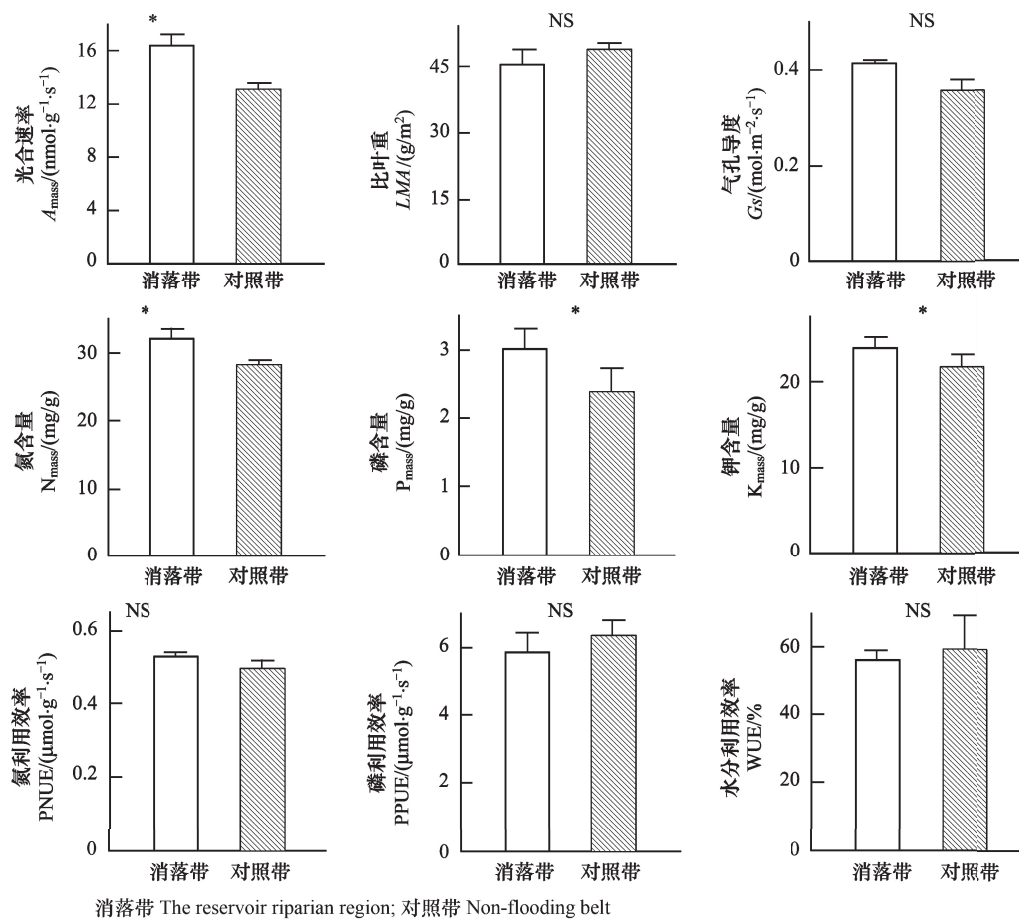


图1 消落带和对照带相同物种叶性状值比较

Fig.1 Leaf traits comparison of the same species in the reservoir riparian region and non-flooding belt

数据表示为平均值±标准误。NS:均值无显著性差异; *:均值有显著性差异($P < 0.05$)

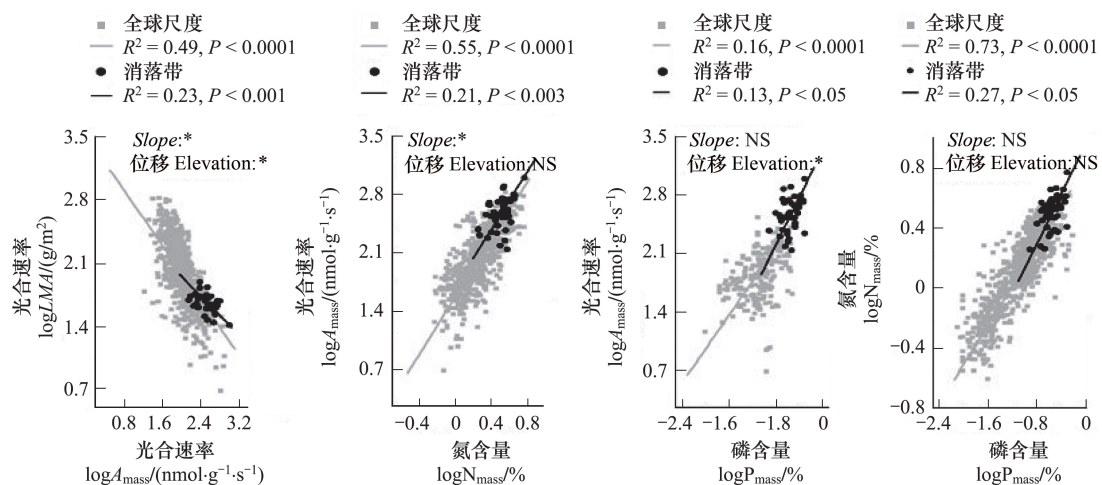
图2 消落带与全球尺度下^[17]植物叶片性状关系比较

Fig.2 Leaf traits relationships for the reservoir riparian region and the global plant trait network^[17]. 'Slope', difference in standardized major axis

Slope: 表示标准化主成分分析斜率 (* 表示斜率之间有显著性差异, 即 $P < 0.05$; NS: 表示斜率间无显著性差异, 即 $P > 0.05$); Elevation: 表示标准化主成分位移上的差异

成此种差异的原因可能是本研究中的植物生活型组成。本研究中调查的 42 个消落带植物种中,乔灌木种共 12 个,都属落叶树种,草本种占 71% (表 1)。一般说来常绿树种与草本及落叶树种对比,具有低的光合速率以及叶片营养元素含量^[30, 39]。三峡大坝消落带经过了两年水位运行,已经几乎没有常绿树种存活在消落带中,大部分植物为 1 年生或者多年生草本种^[2, 40]。所以消落带植物低 LMA、高 A_{mass} 以及高叶片营养元素很可能是由于常绿树种缺乏导致。

进一步的,将消落带以及全球尺度的草本生长型各叶片功能性状抽离出来进行均值比较时,发现消落带植物种的 A_{mass} , N_{mass} , P_{mass} , PPUE 比全球尺度的平均水平要高,而 LMA 以及 PNUE 要更低,且都呈现出显著性差异 ($P < 0.05$, 表 2)。此结果可以通过以下假说来解释:在淹水生境下维持相对高的光合速率以及叶片营养元素对于植物存活是非常关键的^[41]。高的光合速率,往往伴随着高的叶片营养元素以及低 LMA,这是快速生长物种的特征^[42],也很可能是消落带植物适应该生境的关键策略。然而,这一推论仍有很多不确定性,因为全球尺度下的草本生活型叶性状是在各种生境下的多个样点的均值,不能成为消落带植物最严格的对照带。

3.2 水库消落带植物净光合作用速率显著提高

将海拔 175—180 m 作为消落带植物的对照带,是因为在 2007 年形成消落带之前,二者在植物群落的组成以及环境因子上基本相同(未发表数据)。经过 2a 水位运行,二者之间仍然存在着 33 个共有种(表 1)。成对 T -检验结果表明,在消落带与对照带的共有种中,消落带植物的净光合速率要显著高于对照带 ($P < 0.05$, 图 1)。通过对比发现消落带植物的叶片的 N_{mass} , P_{mass} 和 K_{mass} 也显著高于对照带植物 ($P < 0.05$, 图 1)。植物叶片的营养元素与植物的光合作用有着密切关系,尤其是植物叶片的氮含量与磷含量,在一定范围内叶片氮磷含量越高,净光合速率越高^[43-45]。并且, LMA 低(图 1)的植物叶片能更有效的利用光能,减少了二氧化碳在叶片重的扩散路径,提高净光合速率^[46-47]。

水库消落带植物表现出增强光合能力响应可能存在多种解释机制。一种解释是:消落带多年生植物在露出水面的短暂的生长时间内提高了自身对二氧化碳的同化能力,同时将更多的碳水化合物储存起来以抵御生长期过后的深度水淹。已经有很多报道证实植物根部储存碳水化合物是其抵御水淹的一项重要策略^[48-49],更多的碳水化合物有助于植物在水淹时维持正常的生理代谢^[11, 50]。对于 1 年生草本而言,提高光合能力降低 LMA 可以加快其生长速率,有利于其在淹水前完成生活史,以逃避反季节水淹胁迫。然而这种解释还需要进一步实验加以证明。

3.3 结论

三峡水库消落带形成两年后消落带植物的叶功能性状特征,研究表明消落带植物具有高 A_{mass} 、高 N_{mass} , 高 P_{mass} , 高 K_{mass} , 以及较高的 G_s 和较低的 LMA 的特征,处于全球尺度下叶片经济型谱“快速投入-快速回报”的一端(图 2),具有典型的速生种特征。很明显,三峡水库消落带植物的叶功能性状特征反映了其对环境的独特响应,也就是这些植物利用短暂的露出水面的生长期,提高了光合作用能力,相应提高了与光合能力相关的叶营养水平,以期快速完成生活史,积累相对较多的碳水化合物以适应反季节淹水胁迫的生境。当然应该强调的是,目前的研究结论是基于三峡水库消落带形成两年后的结果,植物还处于初期的响应阶段,未达到适应阶段^[51]。因此,长期对三峡水库消落带植物叶功能性状进行监测是必要的,只有通过长期对比研究植物叶功能性状特征的演变,才能了解三峡水库消落带生态系统格局和过程的动态变化规律,为其生态治理和管理提供重要的理论基础。

References:

- [1] Ren X M, Yang D Y, Xu Y H, Zhou B. Eco-vegetation Project on Water-level-fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(1).
- [2] New T, Xie Z Q. Impacts of large dams on riparian vegetation: applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17: 3149-3163.

- [3] Wang Y, Wu J Q, Huang H W, Liu S B. Quantitative Analysis of Plant Communities in Water-level-fluctuation Zone within Three Gorges Reservoir Area of Changjiang River. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, 22(4): 307-314.
- [4] Cui P, Wang D, Fan J, Wang Y, He X, Zhu B, Wei F, Wang G. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for the upper Yangtze and other rivers in the Southwestern China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 43-50.
- [5] Li C X, Zhong Z C. Nutrient dynamics in soils of *Taxodium distichum* seedlings under simulated soil water changes in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Region. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(7).
- [6] Li C X, Zhong Z C. Comparative studies on photosynthetic characteristics of *Taxodium distichum* and *Taxodium ascendens* seedlings under simulated soil water change in the Hydro-Fluctuation Belt of Three Gorges Reservoir Area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(6).
- [7] Luo F L, Zeng B, Chen T, Ye X Q, Liu D. Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant *salix variegata* in the Three Gorges Reservoir region of China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2007, 31(5): 910-918.
- [8] Chen F Q, Xie Z Q. Physiological and biochemical characteristics of *Myricaria laxiflora*, an endangered species in the Three Gorges Reservoir area. *Guihaia*, 2008, 28(3): 367-372.
- [9] Mommer L, J. W. Visser E. Underwater photosynthesis in flooded terrestrial plants: a matter of leaf plasticity. *Annals of Botany*, 2005, 96: 581-589.
- [10] Li Y, Zeng B, Ye X Q, Qiao P, Wang H F, Luo F L. The effects of flooding on survival and recovery growth of riparian plant *Salix variegata* Franch. in Three Gorges Reservoir region. *Acta ecologica sinica/Shengtai Xuebao*, 2008, 28(5): 1923-1930.
- [11] Wang H F, Zeng B, Qiao P, Li Y, Luo F L, Ye X Q. Survival and growth response of *Vetiveria zizanioides*, *Acorus calamus* and *Alternanthera philoxeroides* to long-term submergence. *Acta ecologica sinica/Shengtai Xuebao*, 2008, 28(6): 2571-2580.
- [12] Feng Q H, Shi Z M, Dong L L. Response of Plant Functional Traits to Environment and Its Application. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(4).
- [13] Meng T T, Ni J, Wang G H. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2007, 31(1): 150-165.
- [14] Jauffret S, Visser M. Assigning life-history traits to plant species to better qualify and land degradation in Presaharian Tunisia. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55(1): 1-28.
- [15] Sinclair C, Hoffmann A A. Monitoring salt stress in grapevines: are measures of plant traits variability useful? *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40: 928-937.
- [16] Pywell R F, Bullock J M, Roy D B, Warman L I Z, Walker K J, Rothery P. Plant traits as predictors of performance in ecological restoration. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(1): 65-77.
- [17] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, 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.
- [18] Wright I J, Groom P K, Lamont B B, Poot P, Prior L D, Reich P B, Schulze E D, Veneklaas E J, Westoby M. Leaf trait relationships in Australian plant species. *Functional Plant Biology*, 2004, 31(5): 551-558.
- [19] Wright I J, Cannon K. Relationships between leaf lifespan and structural defences in a low-nutrient, sclerophyll flora. *Functional Ecology*, 2001, 15(3): 351-359.
- [20] Poorter L, Bongers F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species. *Ecology*, 2006, 87(7): 1733-1743.
- [21] Santiago L S, Wright S J. Leaf functional traits of tropical forest plants in relation to growth form. *Functional Ecology*, 2007, 21(1): 19-27.
- [22] He J S, Wang Z H, Wang X P, Schmid B, Zuo W Y, Zhou M, Zheng C Y, Wang M F, Fang J Y. A test of the generality of leaf trait relationships on the Tibetan Plateau. *New Phytologist*, 2006, 170(4): 835-848.
- [23] Qin J C, Gao M. Ecosystem safety assessment of low hills in Three Gorges Reservoir area — a case study of Zhong Town in Chongqing. *Journal of mountain science*, 2007, 22(1): 73-78.
- [24] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Diaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, Steege H t, Morgan H D, Heijden M G A v d, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for Standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51: 335-380.
- [25] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S. From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(25): 13730-13734.
- [26] Niinemets U. Global-scale climatic controls of leaf dry mass per area, density, and thickness in trees and shrubs. *Ecology*, 2001, 82(2): 453-469.
- [27] 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.
- [28] Warton D I, Wright I J, Falster D S, Westoby M. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews*, 2006, 81(2): 259-291.
- [29] Falster D, Warton D, Wright I. SMATR: Standardised Major Axis Tests & Routines, 2006.
- [30] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, Falster D S, Garnier E, Hikosaka K, Lamont B B, Lee W, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Villar R, Warton D I, Westoby M. Assessing the generality of global leaf trait relationships. *New Phytologist*, 2005, 166(2): 485-496.
- [31] Elmore A J, Mustard J F, Manning S J. Regional patterns of plant community response to changes in water: Owens valley, California. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 443-460.
- [32] Futoshi N, Hiroyuki Y. Effects of pasture development on the ecological functions of riparian forests in Hokkaido in northern Japan. *Ecological Engineering*, 2005, 24(539-550).
- [33] Holmes P M, Esler K J, Richardson D M, Witkowski E T F. Guidelines for improved management of riparian zones invaded by alien plants in south Africa. *South African Journal of Botany*, 2008, 74: 538-552.
- [34] Wintle B C, Kirkpatrick J B. The response of riparian vegetation to flood-maintained habitat heterogeneity. *Austral Ecology*, 2007, 32(5): 592-599.
- [35] Lieffers V J. Emergent plant communities of oxbow lakes in northeastern Alberta: Salinity, water-level fluctuation, and succession. *Canadian Journal of Botany*, 1984, 62(2): 310-316.
- [36] Nilsson C, Ekblad A, Gardfjell M, Carlberg B. Long-term effects of river regulation on river margin vegetation. *Journal of Applied Ecology*, 1991, 28: 963-987.
- [37] Gregory S V, Swanson F J, McKee W A, Cummins K W. An ecosystem perspective of Riparian zones. *Bioscience and Microflora*, 1991, 41(8): 540-551.
- [38] Reich P B, Ellsworth D S, Walters M B, Vose J M, Gresham C, Volin J C, Bowman W D. Generality of leaf trait relationships: A test across six biomes. *Ecology*, 1999, 80(6): 1955-1969.
- [39] Westoby M, Falster D S, Moles A T, A. Vesk P, Wright I J. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 125-159.
- [40] Bai B W, Wang H Y, Li X Y, Feng Y L, Zhi L. A comparative study of the plant community of the future water-level-fluctuating zone and the natural water-level-fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 27(5).
- [41] Domingues T F, Meir P, Feldpausch T R, Saiz G, Veenendaal E M, Schrod F, Bird M, Djagbletey G, Hien F, Compaore H, Diallo A, Grace J, Lloyd J. Co-limitation of photosynthetic capacity by nitrogen and phosphorus in West Africa woodlands. *Plant, Cell and Environment*, 2010, 33: 959-980.
- [42] Poorter H, Evans J R. Photosynthetic nitrogen-use efficiency of species that differ inherently in specific leaf area *Oecologia* 1998, 116: 26-37.
- [43] Brooks A, Woo K C, Wong S C. Effects of phosphorus nutrition on the response of photosynthesis to CO₂ and O₂, activation of ribulose biphosphate carboxylase and amounts of ribulose biphosphate and 3-phosphoglycerate in spinach leaves. *Photosynthesis Research*, 1988, 15: 133-141.
- [44] Caemmerer S, Farquhar G D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta*, 1981, 153: 376-387.
- [45] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1982, 9: 121-137.
- [46] Takashima T, Hikosaka K, Hirose T. Photosynthesis or persistence: nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species. *Plant, Cell and Environment*, 2004, 27: 1047-1054.
- [47] Zheng S X, Shangguan Z P. Photosynthetic characteristics and their relationships with leaf nitrogen content and leaf mass per area in different plant functional types. *Acta ecologica sinica*, 2007, 27(1): 0171-0181.
- [48] Chen H J, Qualls R G, Blank R R. Effect of soil flooding on photosynthesis, carbohydrate partitioning and nutrient uptake in the invasive exotic *Lepidium latifolium*. *Aquatic Botany*, 2005, 82: 250-268.
- [49] Tan S D, Zhu Y M, Zhang K R, Dang H S, Zhang Q F. Response and adaptation of plants to submergence stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9): 1871-1877.
- [50] Zhang Y H, Zeng B, Fu T F, Ye X Q. Impact of long-term submergence on the non-structural carbon-hydrates content in roots of *Salix variegata* Franch. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2006, 31(3).
- [51] Lambers H, III F S C, Pons T L, *Plant Physiological Ecology*. 2008.

参考文献:

- [1] 任雪梅, 杨达源, 徐永辉, 周彬. 三峡库区消落带的植被生态工程. *水土保持通报*, 2006, 26(1): 42-43, 49-49.

- [3] 王勇, 吴金清, 黄宏文, 刘松柏. 三峡库区消涨带植物群落的数量分析. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 307-314.
- [4] 崔鹏, 王道杰, 范建容, 王玉宽, 贺秀斌, 朱波, 韦方强, 王根绪. 长江上游及西南诸河区水土流失现状与综合治理对策. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 43-50.
- [5] 李昌晓, 钟章成. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下落羽杉幼苗实生土壤营养元素含量的变化. 林业科学, 2008, 44(7): 124-129.
- [6] 李昌晓, 钟章成. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下落羽杉与池杉幼苗的光和特性比较. 林业科学, 2005, 41(6): 28-34.
- [7] 罗芳丽, 曾波, 陈婷, 叶小齐, 刘巖. 三峡库区岸生植物秋华柳对水淹的光合和生长响应. 植物生态学报, 2007, 31(5): 910-918.
- [8] 陈芳清, 谢宗强. 三峡库区濒危植物疏花水柏枝的生理生化特性研究. 广西植物, 2008, 28(3): 367-372.
- [10] 李娅, 曾波, 叶小齐, 乔普, 王海锋, 罗芳丽. 水淹对三峡库区岸生植物秋华柳 (*Salix variegata* Franch.) 存活和恢复生长的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 1923-1930.
- [11] 王海锋, 曾波, 李娅, 乔普, 叶小齐, 罗芳丽. 长期完全水淹对 4 种三峡库区岸生植物存活及恢复生长的影响. 植物生态学报, 2008, 32(5): 977-984.
- [12] 冯秋红, 史作民, 董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用. 林业科学, 2008, 44(4): 125-131.
- [13] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境和生态系统功能. 植物生态学报, 2007, 31(1): 150-165.
- [23] 秦建成, 高明. 三峡低山丘陵区生态系统安全评价——以重庆忠县为例. 山地学报, 2007, 22(1): 73-78.
- [40] 白宝伟, 王海洋, 李先源, 冯义龙, 智丽. 三峡库区淹没区与自然消落区现存植被的比较. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 27(5): 684-688.
- [47] 郑淑霞, 上官周平. 不同功能型植物光合特性及其与叶氮含量、比叶重的关系. 生态学报, 2007, 27(1): 171-181.
- [49] 谭淑端, 朱明勇, 张克荣, 党海山, 张全发. 植物对水淹胁迫的响应与适应. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1871-1877.
- [50] 张艳红, 曾波, 付天飞, 叶小齐. 长期水淹对秋华柳 (*Salix variegata* Franch.) 根部非结构性碳水化合物含量的影响. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2006, 31(3): 153-156.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 6 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Quantitatively monitoring undergoing degradation of plateau grassland by remote sensing data; a case study in Maqu County, Gansu Province, China	ZHOU Jianhua, WEI Huaidong, CHEN Fang, et al (1663)
Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China	YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al (1677)
Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (1692)
The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao	YANG Jinpeng, JIANG Yong, HU Xiaozhong (1703)
Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau	QI Weiwei, NIU Haishan, WANG Shiping, et al (1713)
Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China	JIE Shenglin, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al (1723)
Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges reservoir	REN Yuqin, CHEN Daqing, LIU Shaoping, et al (1734)
Analysis on allelochemicals in the cell-free Filtrates of <i>Amphidinium carterae</i>	JI Xiaoqing, HAN Xiaotian, YANG Baijuan, et al (1745)
Effect of starvation on expression patterns of the MYP gene in <i>Strongylocentrotus intermedius</i>	QIN Yanjie, SUN Bolin, LI Xia, et al (1755)
Habitat selection of feral yak in winter and spring in the Helan Mountains, China	ZHAO Chongnan, SU Yun, LIU Zhensheng, et al (1762)
Using cellular automata to study patchy spread in a predator-prey system	YANG Li, LI Weide (1773)
Effects of insect-resistant transgenic <i>Bt</i> rice with a fused <i>Cry1Ab+Cry1Ac</i> gene on population dynamics of the stem borers, <i>Chilo suppressalis</i> and <i>Sesamia inferens</i> , occurring in paddyfield	LI Zhiyi, SUI He, XU Yanbo, et al (1783)
Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of <i>Frankliniella Occidentalis</i> (Pergande)	FAN Fan, REN Hongmin, LU Lihua, et al (1790)
The synergistic action and UV protection of optical brightener on three different geographic isolates of Asian Gypsy Moth Nucleopolyhedrovirus (LdMNPV)	WANG Shujuan, DUAN Liqing, LI Haiping, et al (1796)
The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China	LI Haifeng, ZENG Fanjiang, GUI Dongwei, et al (1803)
Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil	QIN Xiaobo, LI Yu'e, SHI Shengwei, et al (1811)
Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau	DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong (1820)
N ₂ O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions	YU Yajun, WANG Xiaoguo, ZHU Bo (1830)
Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China	WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1839)
Numerical soil classification using fuzzy K-means algorithm and predictive soil mapping at regional scale	LIU Pengfei, SONG Xuan, LIU Xiaobing, et al (1846)
Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition	YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al (1854)
Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO ₃ -N migration in wheat	WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (1861)
Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province	WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al (1871)
Determination of the initial depth of water uptake by roots of steppe plants in restored and overgrazed communities, Inner Mongolia, China	GUO Yuran, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1880)
Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (1888)
Numerical analysis of inter-specific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak	FANG Fei, HU Yukun, ZHANG Wei, et al (1898)
Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of <i>Chrysanthemum grandiflorum</i> and its closely related genera	SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, et al (1908)
Effect of the parasitic <i>Cuscuta australis</i> on the community diversity and the growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i>	WANG Rukui, GUAN Ming, LI Yonghui, et al (1917)
Diversity and community structure of basidiomycete laccase gene from subtropical broad-leaved and coniferous forest ecosystems based on cDNA cloning	CHEN Xiangbi, SU Yirong, HE Xunyang, et al (1924)
Fine root longevity and controlling factors in subtropical <i>Alingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (1932)
Linear programming and optimal distribution of the forest resources based on TM remote sensing images	DONG Bin, CHEN Liping, WANG Ping, et al (1943)
Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics	LIU Yanhong, GUO Jinping, WEI Qingshun (1951)
Review and Monograph	
Review of the ecological compensation efficiency	ZHAO Xueyan (1960)
Scientific Note	
The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying	CHEN Kai, XIAO Nengwen, WANG Beixin, et al (1970)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 6 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 6 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:100071	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