

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

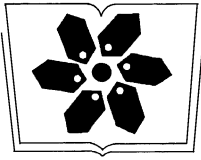
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第9期 Vol.32 No.9 **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 9 期 2012 年 5 月 (半月刊)

目 次

不同土地覆被格局情景下多种生态系统服务的响应与权衡——以雅砻江二滩水利枢纽为例.....	葛 菁, 吴 楠, 高吉喜, 等 (2629)
放牧对小嵩草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响.....	董全民, 赵新全, 马玉寿, 等 (2640)
象山港日本对虾增殖放流的效果评价.....	姜亚洲, 凌建忠, 林 楠, 等 (2651)
城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例.....	仇江啸, 王效科, 逯 非, 等 (2659)
江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑”连通效应的元胞自动机模拟.....	李学玲, 林慧龙 (2670)
铁西区城市改造过程中建筑景观的演变规律.....	张培峰, 胡远满, 熊在平, 等 (2681)
商洛低山丘陵区农林复合生态系统光能竞争与生产力.....	彭晓邦, 张硕新 (2692)
基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估.....	刘 勇, 李晋昌, 杨永刚 (2699)
不同沙源供给条件下柽柳灌丛与沙堆形态的互馈关系——以策勒绿洲沙漠过渡带为例.....	杨 帆, 王雪芹, 杨东亮, 等 (2707)
桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落叶降解和养分释放.....	曾昭霞, 王克林, 曾馥平, 等 (2720)
江西九连山亚热带常绿阔叶林优势种空间分布格局.....	范 娟, 赵秀海, 汪金松, 等 (2729)
秦岭山地锐齿栎次生林幼苗更新特征.....	康 冰, 王得祥, 李 刚, 等 (2738)
极端干旱环境下的胡杨木质部水力特征.....	木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 等 (2748)
红池坝草地常见物种叶片性状沿海拔梯度的响应特征.....	宋璐璐, 樊江文, 吴绍洪, 等 (2759)
改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响.....	汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等 (2768)
啮齿动物捕食压力下生境类型和覆盖处理对辽东栎种子命运的影响.....	闫兴富, 周立彪, 刘建利 (2778)
上海闵行区园林鸟类群落嵌套结构.....	王本耀, 王小明, 王天厚, 等 (2788)
胜利河连续系统中蜉蝣优势种的生产量动态和营养基础.....	邓 山, 叶才伟, 王利肖, 等 (2796)
虾池清塘排出物沉积厚度对老鼠筋幼苗的影响.....	李 婷, 叶 勇 (2810)
澳大利亚亚热带不同森林土壤微生物群落对碳源的利用.....	鲁顺保, 郭晓敏, 芮亦超, 等 (2819)
镜泊湖岩溶台地不同植被类型土壤微生物群落特征.....	黄元元, 曲来叶, 曲秀春, 等 (2827)
浮床空心菜对氮循环细菌数量与分布和氮素净化效果的影响.....	唐莹莹, 李秀珍, 周元清, 等 (2837)
促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响.....	李培培, 张冬冬, 王小娟, 等 (2847)
秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响.....	吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 等 (2855)
赣江流域底泥中有机氯农药残留特征及空间分布.....	刘小真, 赵 慈, 梁 越, 等 (2863)
2009 年徽州稻区白背飞虱种群消长及虫源性质.....	刁永刚, 杨海博, 瞿钰锋, 等 (2872)
木鳖子提取物对朱砂叶螨的触杀活性.....	郭辉力, 师光禄, 贾良曦, 等 (2883)
冬小麦气孔臭氧通量拟合及通量产量关系的比较.....	佟 磊, 冯宗炜, 苏德·毕力格, 等 (2890)
专论与综述	
基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法.....	方 恺, 董德明, 林 卓, 等 (2900)
灵长类社会玩耍的行为模式、影响因素及其功能风险.....	王晓卫, 赵海涛, 齐晓光, 等 (2910)
问题讨论	
中国伐木制品碳储量时空差异分析.....	伦 飞, 李文华, 王 震, 等 (2918)
研究简报	
森林自然更新过程中地上氮贮量与生物量异速生长的关系.....	程栋梁, 钟全林, 林茂兹, 等 (2929)
连作对芝麻根际土壤微生物群落的影响.....	华菊玲, 刘光荣, 黄劲松 (2936)
刈割对外来入侵植物黄顶菊的生长、气体交换和荧光的影响.....	王楠楠, 皇甫超河, 陈冬青, 等 (2943)
不同蔬菜种植方式对土壤固碳速率的影响.....	刘 杨, 于东升, 史学正, 等 (2953)
巢湖崩岸湖滨基质-水文-生物一体化修复.....	陈云峰, 张彦辉, 郑西强 (2960)



封面图说: 在交配的雨蛙——雨蛙为两栖动物, 世界上种类达 250 种之多, 分布极广。中国的雨蛙仅有 9 种, 除西部一些省份外, 其他各省(区)均有分布。雨蛙体形较小背面皮肤光滑, 往往雄性绿色, 雌性褐色, 其指、趾末端多膨大成吸盘, 便于吸附攀爬。多生活在灌丛、芦苇、高秆作物上, 或塘边、稻田及其附近的杂草上。白天匍匐在叶片上, 黄昏或黎明频繁活动, 捕食能力极强, 主要以昆虫为食。特别是在下雨以后, 常常 1 只雨蛙先叫几声, 然后众蛙齐鸣, 声音响亮, 每年在四、五月份夜间发情交配。

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

DOI: 10.5846/stxb201103300416

宋璐璐,樊江文,吴绍洪,钟华平,王宁. 红池坝草地常见物种叶片性状沿海拔梯度的响应特征. 生态学报, 2012, 32(9): 2759-2767.

Song L L, Fan J W, Wu S H, Zhong H P, Wang N. Response characteristics of leaf traits of common species along an altitudinal gradient in Hongchiba Grassland, Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2759-2767.

红池坝草地常见物种叶片性状沿海拔梯度的响应特征

宋璐璐^{1,2}, 樊江文^{1,*}, 吴绍洪¹, 钟华平¹, 王 宁^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 叶片性状是决定植物光合能力和羧化能力的关键因素, 研究叶片性状在海拔梯度上的变化特征是解释植物对于环境变化的适应策略的重要手段。以分布于红池坝(109°58'E, 31°30'N)草地的 5 个常见物种红三叶(*Trifolium pratense*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)、紫菀(*Aster tataricus*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)和绣线菊(*Spiraea prunifolia*)为研究对象, 分析了所有物种($n=56$)和不同物种的叶片比叶重(LMA)、叶氮含量(单位面积氮含量 N_{area} 、单位重量氮含量 N_{mass})以及叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量沿海拔梯度(815—2545m)的变化趋势及叶片性状之间的关系。研究表明: 所有物种样品($n=56$)的比叶重(LMA)、 N_{area} 和 $\delta^{13}\text{C}$ 含量沿海拔梯度的增加呈显著增加趋势; N_{mass} 沿海拔梯度的变化趋势不明显; $\delta^{13}\text{C}$ 含量与 LMA、 N_{area} 呈现极显著正相关关系; 不同物种的叶片性状沿着海拔梯度的响应特征有所不同, 绣线菊(*S. prunifolia*)和老鹳草(*G. wilfordii*)的叶片性状沿海拔梯度的分布规律与所有物种($n=56$)样品分布规律一致, 红三叶(*T. pratense*)、紫菀(*A. tataricus*)、火绒草(*L. leontopodioides*)的各叶片性状沿海拔梯度的分布特征有所不同。

关键词: 海拔梯度; 比叶重; 单位面积叶氮含量; 单位重量叶氮含量; 叶片 $\delta^{13}\text{C}$

Response characteristics of leaf traits of common species along an altitudinal gradient in Hongchiba Grassland, Chongqing

SONG Lulu^{1,2}, FAN Jiangwen^{1,*}, WU Shaohong¹, ZHONG Huaping¹, WANG Ning^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

Abstract: Leaf Mass per Area (LMA), mass- and area-based nitrogen content (leaf N per unit area, N_{area} ; leaf N per unit mass, N_{mass}) and foliar $\delta^{13}\text{C}$ are fundamental leaf traits, describe dry mass in leaves and the return on investments of nutrients, and operates largely independently of growth form, plant functional type or biome. As a reflection of the per-area cost of producing new leaves, LMA significantly correlates with leaf N. Leaf N is strongly correlated with photosynthetic capacity, as N is essential for the synthesis of Rubisco, the key enzyme of photosynthesis. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ is associated with the $p(\text{CO}_2)_i/p(\text{CO}_2)_a$ (intercellular/ambient partial pressure) ratios of CO_2 that are also highly correlated with photosynthesis. These correlations provide a useful link between processes on short-term leaf-level scales and on long-term plant- and community-level scales. Understanding the patterns of these fundamental traits is essential for predicting ecosystem functioning in response to environmental change. To date, the most representative research about leaf traits and foliar $\delta^{13}\text{C}$ has been carried out by Körner et al and Wright et al at the global scale and their findings have been confirmed in other studies. Nevertheless, there remains the opportunity for further studies on the adaptive significance and function of leaf traits in different environments and for different species. And changes of leaf traits along an altitudinal gradient are of

基金项目: 国家自然科学基金(31070427); 国家 973 项目课题(2010CB950902)

收稿日期: 2011-03-30; 修订日期: 2011-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjw@igsnr.ac.cn

particular use in the study of the adaptive characters of plants under the influences of environmental changes. In this study, five common species of the grassland, *Trifolium pratense*, *Geranium wilfordii*, *Aster tataricus*, *Leontopodium leontopodioides* and *Spiraea prunifolia*, were particularly studied on the altitudinal transect (815—2545 m) in Hongchiba (109°58' E, 31°30' N), Chongqing. To measure LMA, mature, fully expanded and healthy leaves were harvested from the middle of plants of each of the five species in plots along the altitudinal gradient (not all species occurred in all plots). We avoided aging, discolored, and damaged leaves. The leaves were placed on A4 paper (21 cm×29.7 cm) with a background of a black cloth sized 1 m², and then photographed using a camera on a tripod. The leaves were then dried in an oven at 85 °C for 24 hours and weighed to 0.01 g. ENVI software was used to calculate the leaf area/A4 paper area ratio, and together with leaf weight to calculate LMA. Leaf samples were crushed by a mortar and then measured for N and ¹³C on a Finnigan MAT253 isotope ratio mass spectrometer to a precision of ±0.1‰. The patterns of leaf traits (including leaf mass per area (LMA), leaf nitrogen content, and foliar δ¹³C) were analyzed both for all data pooled (*n* = 56) and specific species. The results showed that in all data pooled, LMA, N_{area} and foliar δ¹³C had positive correlations with altitude; the pattern of N_{mass} was not significantly; LMA and N_{area} showed significantly positive relationships with foliar δ¹³C; the adaptive features of leaf traits among different species were not consistent. Leaf traits of *S. prunifolia* and *G. wilfordii* showed the same trends as all data pooled along the altitudinal gradient, whereas, *T. pratense*, *A. tataricus* and *L. leontopodioides* showed different patterns with increasing altitude.

Key Words: altitudinal gradient, LMA, N_{area}, N_{mass}, foliar δ¹³C

植物叶片的比叶重(Leaf mass per area, LMA)、叶氮含量(单位面积的氮含量, N_{area}; 单位重量的氮含量, N_{mass})和叶片 δ¹³C 是植物最基本的叶片性状, 是决定植物的光合能力和羧化能力的关键因素, 也是认识植物在不同环境下适应策略的重要参数^[1-2]。其中, LMA 反映了植物单位面积上的干物质重量水平, 体现了植物快速生长和养分维护之间的权衡^[3]。氮是植物生长的主要限制因子之一, 它在叶片中的含量远比其它器官高得多, 氮素的多寡直接决定了叶片光合能力的高低^[4]。叶片 δ¹³C 含量与胞间 CO₂ 分压与大气 CO₂ 分压的比值($p(\text{CO}_2)_i/p(\text{CO}_2)_a$)成反比, 因此也与植物的光合能力密切相关^[5], 此外, δ¹³C 也是评估植物水分利用效率的可靠途径^[6]。以海拔梯度为背景研究叶片性状的响应特征, 有助于理解全球气候变化背景下物种的生理适应特征和生态系统碳循环过程。此外, 叶片性状与相应的冠层性状之间存在显著相关性, 因此在研究生物群落性状的尺度扩展中起着重要的桥梁作用^[2,7-8]。同时, 叶片性状是许多生态系统过程模型(例如, LPJ 模型)的重要输入参数, 研究叶片性状特征有助于改进模型以及提高模拟精度^[9-10]。

长期以来, 生态学家们对于叶片性状沿海拔梯度的响应特征开展过大量试验, 并取得了一系列的重要结论。例如, LMA 随着海拔梯度的增加呈现增加趋势^[4,8,11-13], N_{area} 与海拔梯度之间呈现正相关关系, 而且还会使得供应羧化作用的 CO₂ 含量增加^[8,11,14-15], 而 N_{mass} 的响应趋势与 N_{area} 相反^[14,16-18]。虽然叶片 δ¹³C 含量沿海拔梯度的变化趋势因物种及其生存的环境有所差异^[16,19], 但多数研究表明 δ¹³C 在海拔梯度上有加重的趋势^[1,4,11,20-21], 此外也有少量研究表明, 有些物种的 δ¹³C 会呈现降低的趋势^[19]。叶片 δ¹³C 含量除了受到各种环境因子的影响外^[19,21], 叶片自身的生物因子, 例如 LMA 和 N_{area} 也会对其产生影响, 它们之间的相关关系表现在, 随着叶片 δ¹³C 的加重, 植物叶片厚度和叶肉细胞增加(高 LMA), 叶片羧化能力增加同时单位面积氮含量也表现为增加的趋势^[4,11,22]。

以往的研究大都关注于大尺度研究区域的叶片性状响应特征^[2,4,13,22-25], 对于小区域范围内叶片性状的响应趋势如何, 各叶片性状之间的相关关系是否与大尺度上的结论一致等问题尚需进一步明确。另外, 以往的研究侧重于所有生活型的叶片性状的普遍规律, 而忽略了不同物种间的差异, 对于叶片性状之间的关系在不同物种间是否存在显著差异也需要进一步探讨^[26]。本研究以我国重庆红池坝亚热带草地常见物种为研究

对象,通过分析小区域范围内主要植物叶片性状沿海拔梯度的变异特征,旨在回答:(1)研究区内所有物种的叶片性状沿海拔梯度的响应特征如何?叶片性状间的关系如何?(2)不同物种的叶片性状响应特征是否相同?

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红池坝位于重庆巫溪县西北部(109°58'E,31°30'N)(图1),地处大巴山川东边缘。全区东西长约40 km,宽约6.5 km,面积24400 hm²,草地13400 hm²,是我国南方最大的高山草场之一。该地区属北亚热带温凉、多雨、寡照的气候区,年平均气温7.2℃。全年≥0℃积温2278℃;≥5℃积温1984℃;≥10℃积温为1701℃,最低温度为-19.3℃(1月)。年降水量2000 mm左右,年相对湿度84%,年日照时数月1200 h,日照百分率仅28%。土壤为山地黄棕壤,土壤有机质含量3.11%,总N含量0.164%,总P含量0.077%,K含量1.99%,pH值5.56,土壤和水的悬浮体)。

1.2 野外采样

于2008—2009年7—8月从红池坝的黑草坝(800 m)起至天子城(2545 m)沿海拔梯度大致每100 m设置一个具有代表性的样地,共设置19个(表1),由于研究区域地势陡峭,一些样地难以获取,因此样地的海拔间隔一般要大于100 m。样地一般选在受到放牧以及刈割等的干扰较小且位于阳坡的天然草地中,样地面积为10 m×10 m。用GPS测量样地的经纬度以及海拔高度,同时记录样地群落盖度以及群落平均高。

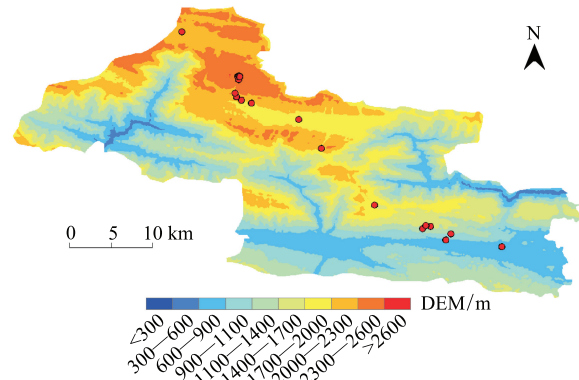


图1 红池坝19个采样点沿海拔梯度空间分布示意图

Fig. 1 Distribution of the altitudinal transect at Hongchiba, Chongqing, China, showing the 19 sample plots (DEM comes from 30m ASTER GDEM product, <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>).

表1 采样点基本情况

Table 1 Characteristics of sampling plots

样地号 Plot No.	海拔/m Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude	植被盖度/% Vegetation coverage	群落平均高/cm Vegetation height
1	815	109°17.35'	31°24.23'	100	75.4
2	900	109°13.72'	31°24.68'	100	76.0
3	1108	109°14.04'	31°25.09'	100	62.3
4	1236	109°12.20'	31°25.42'	100	65.2
5	1306	109°12.73'	31°25.56'	100	56.4
6	1484	109°12.42'	31°25.61'	100	66.7
7	1657	109°09.08'	31°26.95'	100	45.8
8	1759	109°04.15'	31°32.50'	100	37.5
9	1890	109°01.08'	31°33.56'	100	60.0
10	1965	109°05.63'	31°30.63'	100	80.0
11	2054	108°56.56'	31°38.20'	100	53.3
12	2078	109°00.43'	31°33.75'	100	47.3
13	2200	109°00.11'	31°33.98'	100	50.2
14	2300	109°00.01'	31°34.21'	100	30.0
15	2340	109°00.25'	31°35.08'	100	42.7
16	2400	109°00.20'	31°35.30'	100	31.6
17	2483	109°00.26'	31°35.34'	100	25.0
18	2503	109°00.31'	31°35.32'	100	28.3
19	2545	109°00.33'	31°35.29'	100	35.0

在各样地内选取常见种红三叶 (*Trifolium pratense*)、老鹳草 (*Geranium wilfordii*)、紫菀 (*Aster tataricus*)、绣线菊 (*Spiraea prunifolia*) 和火绒草 (*Leontopodium leontopodioides*) 作为研究对象, 选取这 5 个物种的原因在于: 首先, 它们沿海拔梯度的分布范围较大, 其次, 它们分别隶属豆科、牻牛儿苗科、菊科、蔷薇科和菊科, 对不同生活型的植物进行研究能在一定程度上增加本研究的代表性。

选样地内 5 个物种的正常生长并且受光条件好、无病虫害的成熟叶片 (取自同一样地内 5—10 株植物) 各 10—20 枚 (位于植物体中部), 将采回的鲜叶片带回, 均匀的平铺在 A4 的白纸上, 并将白纸铺在 1 m×1 m 的黑布上, 用三脚架协助并垂直于叶片拍照, 而后将叶片装回信封中, 在 85 °C 下烘干至恒重, 用 0.01 g 天平称重, 得到叶片重量。将测重之后的叶片样品经研钵粉碎之后装入离心管, 用同位素质谱仪 (MAT253) 测定土样的全 N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 含量。经采样共计获红三叶样本量 13 个, 老鹳草样本量 10 个, 紫菀 8 个, 火绒草 14 个, 绣线菊 11 个。

在每个海拔梯度的样地内用土钻法取三钻土样放入自封袋中, 每钻深 10 cm, 将三钻土混合后带回室内, 阴干, 过 60 目筛, 用同位素质谱仪 (MAT253) 测定土样的全 N 含量。

1.3 数据分析

在室内利用 ENVI 软件计算所拍得照片的叶片面积与 A4 纸面积的比例, 然后结合叶片重量, 可以得到叶片的比叶重:

$$\text{LMA} = \text{叶片重量}(\text{g}) / \text{叶片面积}(\text{m}^2)$$

用同位素质谱仪 (MAT253) 测定叶片的全 N, N_{area} 由 N_{mass} 和 LMA 计算所得:

$$N_{\text{area}} = N_{\text{mass}}(\text{mg/g}) \times \text{LMA}(\text{g/m}^2)$$

通过方差分析 (ANOVA) 和多重比较 (Tukey) 方法, 分析不同植物叶片性状的差异, 利用线性回归分析研究海拔梯度与叶片性状各指标之间的相关性, 利用 SPSS14.0 软件包进行数据的统计处理, 利用 Origin 8.0 软件包绘图。

2 结果

2.1 比叶重 (LMA) 沿海拔梯度的变化

研究区所有物种样品 ($n=56$) 的 LMA 变化范围为 43.8—149.5 g/m^2 , 且随海拔梯度的增加呈现极显著增加的趋势, 但各物种的 LMA 增加趋势不尽相同 (图 2)。其中, 绣线菊、老鹳草 LMA 与海拔梯度之间正相关关系最为显著 (表 2); 紫菀、红三叶、火绒草的 LMA 与海拔梯度之间的正相关关系不显著。

2.2 叶氮含量 (N_{area} 、 N_{mass}) 及土壤全 N 沿海拔梯度的变化

整个研究区域所采集的 56 个物种样品的 N_{area} 含量沿海拔梯度呈现显著上升趋势。其中, 绣线菊、老鹳草、红三叶的 N_{area} 与海拔梯度之间均达到了显著正相关关系 (表 2); 紫菀、火绒草的 N_{area} 与海拔梯度的相关性均不显著。本研究中, 叶片 N_{area} 的取值范围为 1.4 g/m^2 到 4.4 g/m^2 之间, 其中红三叶的 N_{area} 值在 5 个物种中为最高 (图 3)。

所有样品 ($n=56$) 的 N_{mass} 数据和各物种 N_{mass} 均沿着海拔梯度的升高无明显的分布趋势, N_{mass} 的变化范围为 15.4—62.3 mg/g , 其中红三叶的 N_{mass} 值最大 (图 3)。

土壤全 N 含量沿海拔梯度的升高呈现极显著下降趋势 (图 3)。

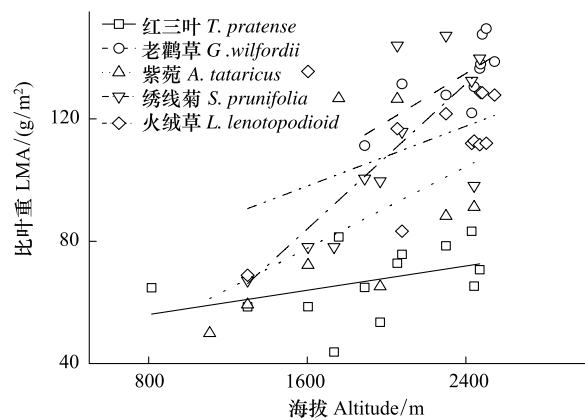


图 2 不同物种比叶重沿海拔梯度的变化

Fig. 2 Changes of LMA of different species along the altitudinal gradient

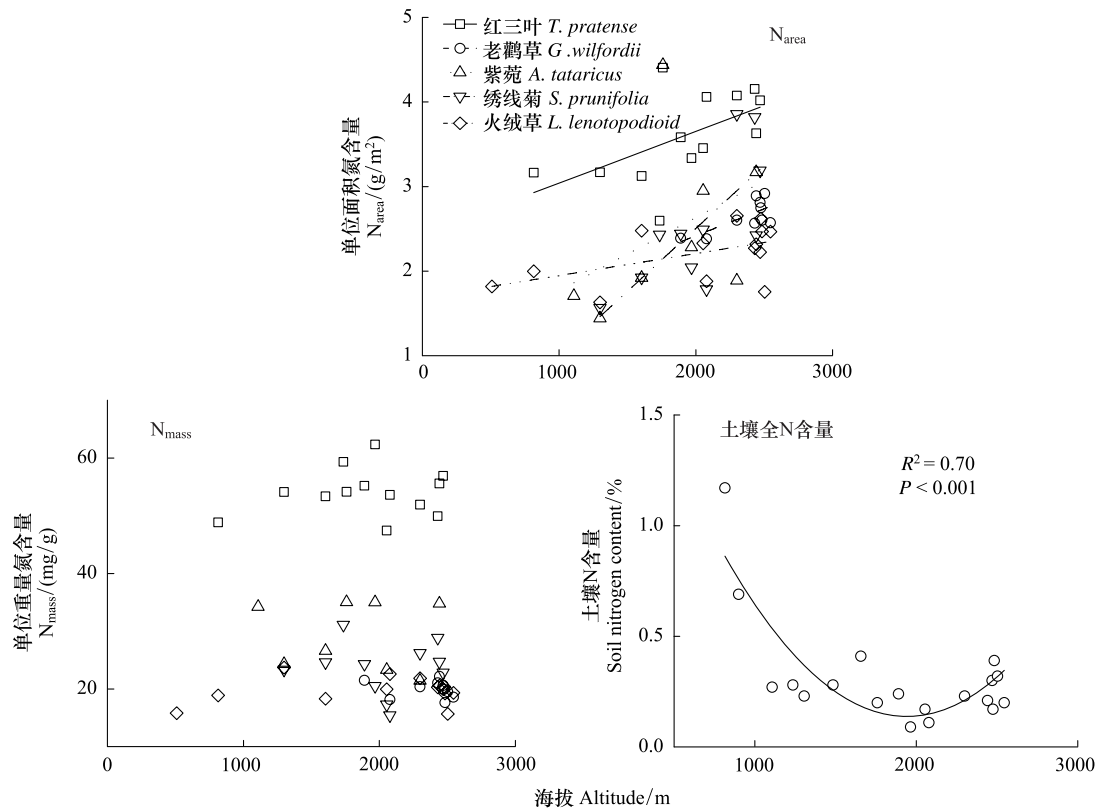


图 3 各物种 N_{area} 、 N_{mass} 及土壤全 N 含量沿海拔梯度的变化

Fig. 3 Changes of N_{area} and N_{mass} of the five species and of soil N along the altitudinal gradient

2.3 叶片 $\delta^{13}C$ 沿海拔梯度的变化

56 个物种样品的叶片 $\delta^{13}C$ 含量随着海拔梯度的增加呈现极显著增加的趋势(图 4)。其中,绣线菊、老鹳草、火绒草叶片 $\delta^{13}C$ 值与海拔之间均达到显著水平(表 2);红三叶、紫菀的叶片 $\delta^{13}C$ 与海拔之间的正相关关系不显著。本研究中,物种叶片 $\delta^{13}C$ 值的变化范围为 -34.3‰ — 29.9‰ 。

2.5 叶片性状之间的相关关系

所有物种样品的叶片 $\delta^{13}C$ 含量与 N_{area} 则呈极显著正相关关系,即 $\delta^{13}C$ 含量随着 N_{area} 的增加而增加($n = 56, R^2 = 0.18, P < 0.001$)。其中,火绒草($n = 14, R^2 = 0.32, P < 0.05$)和绣线菊($n = 11, R^2 = 0.65, P < 0.01$)的叶片 $\delta^{13}C$ 含量与 N_{area} 均呈显著正相关关系;红三叶、老鹳草、紫菀的叶片 $\delta^{13}C$ 与 N_{area} 的相关关系不显著(图 5)。

此外,所有物种样品的叶片 $\delta^{13}C$ 含量与 LMA 呈极显著正相关关系,即 $\delta^{13}C$ 随着 LMA 的增加而增加($n = 56, R^2 = 0.32, P < 0.001$)。其中,绣线菊叶片 $\delta^{13}C$ 含量与 LMA 呈极显著正相关($n = 11, R^2 = 0.86, P < 0.001$);老鹳草($n = 10, R^2 = 0.48, P < 0.05$)、火绒草($n = 14, R^2 = 0.63, P < 0.01$)的叶片 $\delta^{13}C$ 含量与 LMA 呈显著正相关;而红三叶、紫菀叶片 $\delta^{13}C$ 含量与 LMA 之间的相关关系不显著(图 5)。

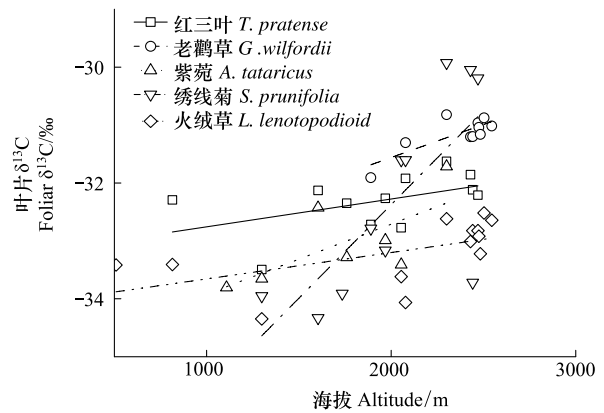


图 4 各物种叶片 $\delta^{13}C$ 沿海拔梯度的变化

Fig. 4 Changes of leaf $\delta^{13}C$ of different species along the altitudinal gradient

表 2 各物种叶片性状结果比较

Table 2 Compare of leaf traits between different species

	样本量 <i>n</i>	斜率 Slope	截距 Intercept	<i>R</i> ²	均值±方差 Mean±SD
比叶重 LMA	56	0.044	9.208	0.38 ***	100.82±31.04b
红三叶 <i>T. pratense</i>	13				67.06±11.56a
老鹳草 <i>G. wilfordii</i>	10	0.039	40.375	0.54 **	133.31±11.47bc
紫菀 <i>A. tataricus</i>	8				84.90±29.17ab
火绒草 <i>L. leontopodioides</i>	14				113.27±0.12bc
绣线菊 <i>S. prunifolia</i>	11	0.059	-10.894	0.61 **	109.18±28.56bc
单位面积叶氮含量 <i>N</i> _{area}	56	0.00044	1.831	0.08 *	2.71±0.77a
红三叶 <i>T. pratense</i>	13	0.00061	2.428	0.32 *	3.60±0.52b
老鹳草 <i>G. wilfordii</i>	10	0.00064	1.140	0.52 *	2.65±0.19a
紫菀 <i>A. tataricus</i>	8				2.48±0.99a
火绒草 <i>L. leontopodioides</i>	14				2.54±0.77a
绣线菊 <i>S. prunifolia</i>	11	0.0015	-0.471	0.53 *	2.25±0.36a
单位重量叶氮含量 (<i>N</i> _{mass})	56				29.9±14.28a
红三叶 <i>T. pratense</i>	13				54.04±4.10b
老鹳草 <i>G. wilfordii</i>	10				19.94±1.48a
紫菀 <i>A. tataricus</i>	8				29.34±5.97a
火绒草 <i>L. leontopodioides</i>	14				23.54±4.59a
绣线菊 <i>S. prunifolia</i>	11				20.03±2.44a
叶片 δ ¹³ C (Foliar δ ¹³ C)	56	0.0012	-34.788	0.28 ***	-32.4±1.12a
红三叶 <i>T. pratense</i>	13				-32.3±0.49ab
老鹳草 <i>G. wilfordii</i>	10	0.0011	-33.840	0.63 **	-31.2±0.31b
紫菀 <i>A. tataricus</i>	8				-33.0±0.74a
火绒草 <i>L. leontopodioides</i>	14	0.00046	-34.111	0.31 *	-32.3±1.69a
绣线菊 <i>S. prunifolia</i>	11	0.0032	-38.837	0.52 *	-33.1±0.65ab

* *P*<0.05, ** *P*<0.01, *** *P*<0.001, 不同字母表示 0.05 水平差异显著

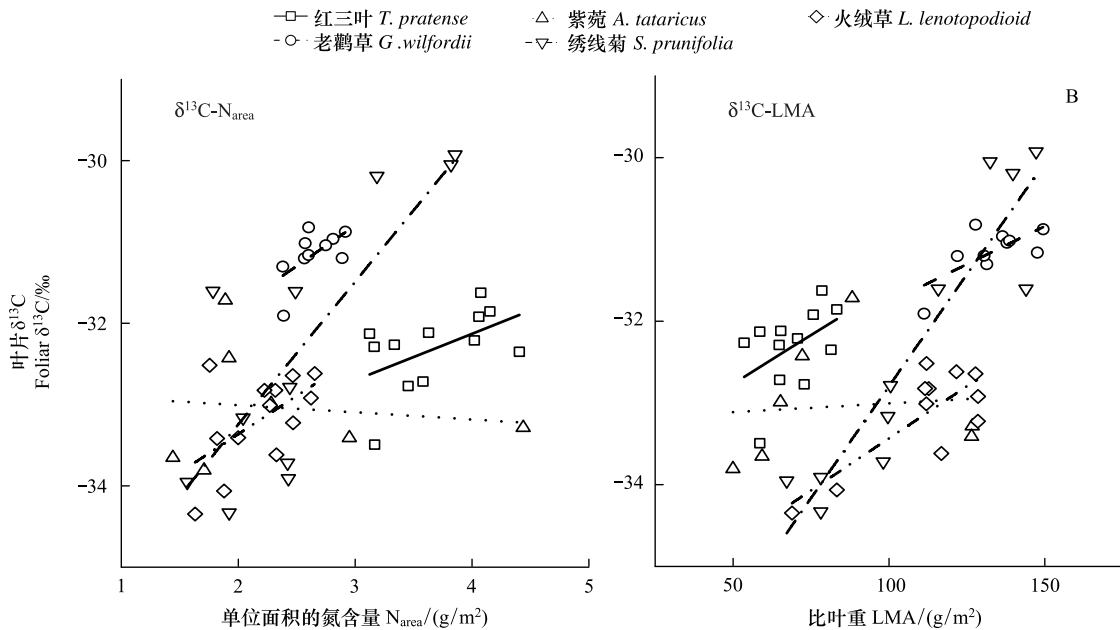


图 5 各物种叶片 δ¹³C 与 *N*_{area}、LMA 之间的相关关系

Fig. 5 Relationships of foliar δ¹³C with LMA and *N*_{area} of different species along the altitudinal gradient

3 讨论

本研究与以往研究不同的是,在分析研究区域内所有物种样品($n=56$)的叶片性状沿海拔梯度的响应特征的同时,也分析了不同物种的叶片性状变化特征。而研究结果显示,重庆红池坝地区的常见物种沿海拔梯度的叶片适应特征有与以往研究结果相似的特征,也存在本研究区的特有属性。

LMA 能较好的反映植物的叶片厚度随环境的变化趋势,与以往的研究结论相同^[4,8,11-13,26-28],本研究区域内所有物种样品($n=56$)的 LMA 沿海拔梯度的增加而显著增加(图 2)。一般而言,低海拔处植物较低的 LMA,叶片较薄,有利于光的透过和吸收较多的光能,光合能力较高^[4,26];而高海拔地区高 LMA 的植物,叶片较厚,且多以蜡质层为主,因为较厚的蜡质层可以保护叶片免受草食动物或其他有害生物的危害,同时,海绵组织较厚,光合能力较低;此外,高 LMA 有利于植物叶片减少水分的散失、保持植物温度,也是一种对高海拔地区水分含量较低、生长条件寒冷的一种遗传学适应^[4,13,26]。

与 LMA 的响应趋势相同,研究区域内所有物种样品($n=56$)的叶片 N_{area} 随海拔梯度的增加而增加(图 3),而 N_{mass} 沿着海拔梯度没有明显的变化趋势(图 3)。关于 N_{area} 与 LMA 之间相同的响应趋势,生态学家给出了明确的解释,即从植物生理学角度来说,高海拔环境下,植物将根系从土壤中吸收的矿质养分储存在叶片中,其中很大一部分养分用于构建保卫组织,如分配较多的氮于非溶性蛋白纤维中,这样可以增强叶片细胞壁韧性或者增加叶肉细胞密度,同时防止过高的太阳辐射或失水过多^[7],同时植物体内积累的脯氨酸或蔗糖等可溶性化合物可以降低植物的水势,其结果使得单位叶面积的干物质增加^[29]。同时,由高 LMA 所导致的叶片厚度的增加,单位面积上叶肉细胞会随之增加,从而最终也会导致单位面积内的叶氮含量随之增加^[2,25]。

此外,沿着海拔梯度的增加土壤全氮含量在不断减小(图 3),与 N_{area} 之间呈现显著的负相关性($r=-0.55$, $P<0.05$),该现象说明土壤 N 含量的降低并不会导致叶片 N 含量的减少。相关研究表明,这一现象是植物为了适应贫瘠的土壤而建立的一种“奢侈消费”系统,即在减小叶片大小的同时增加 N 含量,用以保持其光合生产能力^[16,30-31],这种消费系统在一定程度上减少了营养的“流失”,也在一定程度上说明某些土壤营养元素的缺乏并不会限制物种在高海拔地区的生长。

虽然叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量对海拔梯度的响应会因生活型以及研究区域的不同而有不同程度的变化,但已有的研究表明,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值会随着海拔梯度的增加而持续增加^[1,4,11,19-21],本文的研究结果也表现为增加趋势(图 4)。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔响应受到多种环境因素和生物因素的限制^[11,19-21],环境因子中温度和降水的综合作用对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化有重要影响。在本研究区域中,海拔每升高 100 m 温度降低 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[32],高海拔处的低温会导致 CO_2 扩散能力降低,进而导致叶片气孔 CO_2 导度的降低,最终使得叶片 ^{13}C 分馏能力降低, $\delta^{13}\text{C}$ 值增加^[33];一般认为降雨与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量之间存在负相关关系,即水分胁迫会导致叶片气孔关闭,从而引起叶片内 CO_2 浓度下降,光合产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增大^[25]。在本研究区内,降水量会随着海拔梯度的增加而增加(海拔每升高 100 m,降雨增加 40—50 mm)^[34],而叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量增加的原因可能存在于低的土壤温度会造成水分有效性的降低,导致高海拔植物不定期的生活在相对干旱的条件下,从而降低了其叶片的气孔导度,增加了叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

除了环境要素以外,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量的海拔响应受到许多生物因子的影响,特别是气孔导度、叶氮含量、羧化效率和比叶重等等。本文重点探讨了 LMA 和 N_{area} 与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量的关系(图 5)。 N_{area} 是通过影响叶片吸收和固定 CO_2 的能力,进而影响 $p(\text{CO}_2)_i/p(\text{CO}_2)_a$,最终对 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响。对 C_3 植物而言,一般情况下叶片中的大多数氮存在于 Rubisco、叶绿体以及其它与碳同化有关的生物化学结构中^[4,6],因此,叶片的氮含量与羧化效率、光合能力和叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在正相关关系。关于 LMA 与 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的相关性,Vitousek 等^[11]解释了其中可能存在的原因:第一,厚的叶片(高 LMA)包含较多的光合酶,因此单位面积所需 CO_2 就会增加,由此引起的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加;第二,厚的叶片(高 LMA)会使 CO_2 从气孔到达叶绿体的路径增长,由此会减少羧化作用的 CO_2 提供量,造成细胞内部的 CO_2 分压减小,结果造成 p_i/p_a 减小,最终导致叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增加。因此,叶片 LMA、 N_{area} 和叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量之间存在紧密联系。

本文对红池坝草地群落物种的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量与 Körner 等^[33] 基于全球尺度下得出的物种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量进行了比较。首先从叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的线性拟合方程来看 ($Y=a+bX, Y=\delta^{13}\text{C}, X=\text{海拔梯度}, a=-34.79, b=1.177$), 本研究地区内物种的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量的变化速率比 Körner 等的拟合结果 ($a=-28.95, b=0.702$) 快, 造成该差异的原因在于, 草本植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量沿海拔梯度的变化速率比乔木树种快^[33], 而本研究未涉及乔木树种; 其次, 本研究所得的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量平均值为 $(-32.39 \pm 1.10)\text{‰}$, 草本植物的平均值为 $(-32.43 \pm 0.95)\text{‰}$, 而 Körner 等基于全球尺度得出的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值在 -28.80‰ — -26.15‰ 之间, 草本植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值在 -28.74‰ — -25.65‰ 之间, 可以发现本研究所得到的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于全球尺度的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

造成该差异的原因是多方面的: 首先, 物种不同以及海拔梯度不同叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的取值也会有所不同^[16]; 其次, 自 1980 (Körner 等采样时间) 年以来, 影响叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的许多环境因素均发生了变化, 例如温度的升高和大气 CO_2 浓度的增加^[35] 均能导致叶片气孔 CO_2 导度的增加, 进而使叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏能力降低, 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的降低; 大气湿度增加或土壤水分含量高也会使气孔导度增加从而使得 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低^[11]; 此外, 随着工业发展和大量燃料的使用, 重庆地区酸雨 ($\text{pH}<4.5$, 酸雨频率 50%) 比较严重, 由此引起的土壤酸化和土壤氮含量的改变, 均会影响叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 含量^[36]。

从不同物种的叶片性状海拔响应趋势来看, 绣线菊和老鹳草的叶片性状沿着海拔梯度的增加呈现的分布规律与所有物种样品分布规律一致, 这与物种的生长环境有密不可分的关系。首先, 南方亚热带低海拔地区以灌草丛草地类型为主同时还伴生有许多高大乔木, 而绣线菊属于较矮小的植物种, 处于生态系统垂直结构中的最低层, 具有较低的 LMA 有利于光的透过和吸收进而增加光合能力; 随着海拔梯度的增加, 山地草甸逐渐成为主要的生态系统, 而老鹳草也有广泛分布, 此时绣线菊和老鹳草的高 LMA 和较厚的叶片, 既可以保证植物本身对光能的利用率, 同时也增强了叶片对强光的保护作用。此外, 红三叶的叶氮含量 ($N_{\text{area}}, N_{\text{mass}}$) 比其它物种要高 (表 2), 可能的原因在于红三叶属于豆科物种, 其固氮能力使得叶片氮含量比其它物种明显不同。

4 结论

本文针对重庆红池坝地区 5 个常见物种的叶片性状沿海拔梯度的响应特征进行了研究, 结果表明: 首先, 所有物种样品的 LMA、 N_{area} 和叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 沿海拔梯度呈增加趋势, N_{mass} 的分布特征并不显著, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 LMA 和 N_{area} 之间存在正相关关系; 其次, 从不同物种的角度来看, 叶片性状沿海拔梯度的响应特征和变化速率有所不同, 叶片性状之间的相关关系也不尽相同。本文的研究结果说明虽然从整个生态系统而言其叶片性状的变化特征是有规律可循的, 但是不同物种对于高海拔地区生境的适应特征存在差别, 在一定程度上, 也预示着在全球气候变化背景下, 不同植物种的生理特征会发生变化。

References:

- [1] Körner Ch, Farquhar G D, Wong S C. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends. *Oecologia*, 1991, 88(1): 30-40.
- [2] 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, Gamier 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.
- [3] 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.
- [4] Körner Ch. The nutritional status of plants from high altitudes. *Oecologia*, 1989, 81(3): 379-391.
- [5] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1989, 40: 503-537.
- [6] Woodward F I. Ecophysiological studies on the shrub *Vaccinium myrtillus* L. taken from a wide altitudinal range. *Oecologia*, 1986, 70(4): 580-586.
- [7] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, Vose J M, Volin J C, Gresham C, Bowman W D. Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups. *Oecologia*, 1998, 114(4): 471-482.
- [8] Luo T X, Luo J, Pan Y D. Leaf traits and associated ecosystem characteristics across subtropical and timberline forests in the Gongga Mountains,

- Eastern Tibetan Plateau. *Oecologia*, 2005, 142(2): 261-273.
- [9] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S, Uhl C. Photosynthesis-nitrogen relations in Amazonian tree species I. Patterns among species and communities. *Oecologia*, 1994, 97(1): 62-72.
- [10] Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world. *New Phytologist*, 2004, 162(2): 281-293.
- [11] Vitousek P M, Field C B, Matson P A. Variation in foliar $\delta^{13}\text{C}$ in Hawaiian *Metrosideros polymorpha*: a case of internal resistance? *Oecologia*, 1990, 84(3): 362-370.
- [12] Luo T X, Zhang L, Zhu H Z, Daly C, Li M C, Luo J. Correlations between net primary productivity and foliar carbon isotope across a Tivetan ecosystem transect. *Ecography*, 2009, 32(3): 526-538.
- [13] Milla R, Giménez-Benavides L, Escudero A, Reich P B. Intra-and interspecific performance in growth and reproduction increase with altitude: a case study with two *Saxifraga* species from northern Spain. *Functional Ecology*, 2009, 23(1): 111-118.
- [14] Reich P B, Uhl C, Walters M B, Ellsworth D S. Leaf lifespan as a determinant of leaf structure and function among 23 amazonian tree species. *Oecologia*, 1991, 86(1): 16-24.
- [15] Poorter L, Bongers F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species. *Ecology*, 2006, 87(7): 1733-1743.
- [16] Körner C, Bannister P, Mark A F. Altitudinal variation in stomatal conductance, nitrogen content and leaf anatomy in different plant life forms in New Zealand. *Oecologia*, 1986, 69(4): 577-588.
- [17] Hu Q W, Song M H, Ouyang H, Liu X D. Variations in leaf N, P of *Picea crassifolia* along the altitude gradient in Qilian Mountains. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(10): 2072-2079.
- [18] Qi J, Ma K M, Zhang Y X. The altitudinal variation of leaf traits of *Quercus liaotungensis* and associated environmental explanations. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 930-937.
- [19] Song M H, Duan D Y, Chen H, Hu Q W, Zhang F, Xu X L, Tian Y Q, Ouyang H, Peng C H. Leaf $\delta^{13}\text{C}$ reflects ecosystems patterns and responses of alpine plants to the environments on the Tibetan Plateau. *Ecography*, 2008, 31(4): 499-508.
- [20] Morecroft M D, Woodward F I, Marrs R H. Altitudinal trends in leaf nutrient contents, leaf size and $\delta^{13}\text{C}$ of *Alchemilla alpina*. *Functional Ecology*, 1992, 6(6): 730-740.
- [21] Zhang P, Wang G, Zhang T, Chen N L. Responses of foliar $\delta^{13}\text{C}$ in *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to altitude and its mechanism in the Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 125-133.
- [22] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S. Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems. *Ecological Monographs*, 1992, 62(3): 365-392.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Hultine K R, Marshall J D. Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition. *Oecologia*, 2000, 123(1): 32-40.
- [27] Luo T X, Zhang L, Zhu H Z, Daly C, Li M C, Luo J. Correlations between net primary productivity and foliar carbon isotope ratio across a Tibetan ecosystem transect. *Ecography*, 2009, 32(3): 526-538.
- [28] Kogami H, Hanba Y T, Kibe T, Terashima I, Masuzawa T. CO₂ transfer conductance, leaf structure and carbon isotope composition of *Polygonum cuspidatum* leaves from low and high altitudes. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24(5): 529-538.
- [29] Wright I J, Reich P B, Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats. *Functional Ecology*, 2001, 15(4): 423-434.
- [30] Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1980, 11(1): 233-260.
- [31] Cordell S, Goldstein G, Mueller-Dombois D, Webb D, Vitousek P M. Physiological and morphological variation in *Metrosideros polymorpha*, a dominant Hawaiian tree species, along an altitudinal gradient; the role of phenotypic plasticity. *Oecologia*, 1998, 113(2): 188-196.
- [32] Chen Z J, Zha S P, Gao Y H, Qiu X F. Research of spatial distribution of air temperature based on GIS in Chongqing. *Areal Research and Development*, 2008, 27(3): 125-128.
- [33] Körner C, Farquhar G D, Roksandic Z. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude. *Oecologia*, 1988, 74(4): 623-632.
- [34] Lu Z Y, Ma L, Miao Q L, Dai Q, Wang Y F. Fine spatial distribution of precipitation on Chongqing rugged terrain. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(3): 408-412.
- [35] IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis. 2007. <http://www.ipcc.ch>.
- [36] Gao S D, Sakamoto K, Zhao D W, Zhang D B, Dong X H, Hatakeyama S. Studies on atmospheric pollution, acid rain and emission control for their precursors in Chongqing, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 130(1/4): 247-252.

参考文献:

- [17] 胡启武, 宋明华, 欧阳华, 刘贤德. 祁连山青海云杉叶片氮、磷含量随海拔变化特征. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2072-2079.
- [18] 祁建, 马克明, 张育新. 辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶特性沿海拔梯度的变化及其环境解释. *生态学报*, 2007, 27(3): 930-937.
- [21] 张鹏, 王刚, 张涛, 陈年来. 祁连山两种优势乔木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔响应及其机理. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 125-133.
- [32] 陈志军, 查书平, 高阳华, 邱新法. 基于 GIS 的重庆地区气温空间分布研究. *地域研究与开发*, 2008, 27(3): 125-128.
- [34] 陆忠艳, 马力, 缪启龙, 代强, 王扬锋. 起伏地形下重庆降水精细的空间分布. *南京气象学院学报*, 2006, 29(3): 408-412.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 9 May, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

- Responses and weigh of multi-ecosystem services and its economic value under different land cover scenarios: a case study from Ertan water control pivot in Yalong River GE Jing, WU Nan, GAO Jixi, et al (2629)
- Influence of grazing on biomass, growth ratio and compensatory effect of different plant groups in *Kobresia parva* meadow DONG Quanmin, ZHAO Xinquan, MA Yushou, et al (2640)
- Stocking effectiveness of hatchery-released kuruma prawn *Penaeus japonicus* in the Xiangshan Bay, China JIANG Yazhou, LING Jianzhong, LIN Nan, et al (2651)
- The spatial pattern of landscape fragmentation and its relations with urbanization and socio-economic developments: a case study of Beijing QIU Jiangxiao, WANG Xiaoke, LU Fei, et al (2659)
- Cellular automata simulation of barren patch connectivity effect in degradation sequence on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow rivers, Qinghai-Tibetan Plateau, China LI Xueling, LIN Huilong (2670)
- Evolution law of architectural landscape during the urban renewal process in Tiexi District ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (2681)
- Competition for light and crop productivity in an agro-forestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (2692)
- Evaluation of forest ecosystem services based on biomass in Shanxi Province LIU Yong, LI Jinchang, YANG Yonggang (2699)
- Research on the morphological interactions between *Tamarix ramosissima* thickets and Nebkhas under different sand supply conditions; a case study in Cele oasis-desert ecotone YANG Fan, WANG Xueqin, YANG Dongliang, et al (2707)
- Litter decomposition and nutrient release in typical secondary and primary forests in karst region, Northwest of Guangxi ZENG Zhaoxia, WANG Kelin, ZENG Fuping, et al (2720)
- Spatial patterns of dominant species in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Julian Mountain Jiangxi Province, China FAN Juan, ZHAO Xiuhai, WANG Jinsong, et al (2729)
- Characteristics of seedlings regeneration in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* secondary forests in Qinling Mountains KANG Bing, WANG Dexiang, LI Gang, et al (2738)
- Xylem hydraulic traits of *Populus euphratica* Oliv. in extremely drought environment AYOUPU Mubareke, CHEN Yaning, HAO Xingming, et al (2748)
- Response characteristics of leaf traits of common species along an altitudinal gradient in Hongchiba Grassland, Chongqing SONG Lulu, FAN Jiangwen, WU Shaohong, et al (2759)
- Changes of carbon input influence soil respiration in a *Pinus tabulaeformis* plantation WANG Jinsong, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu, et al (2768)
- Effects of different habitats and coverage treatments on the fates of *Quercus wutaishanica* seeds under the predation pressure of rodents YAN Xingfu, ZHOU Libiao, LIU Jianli (2778)
- Nested analysis of urban woodlot bird communities in Minhang District of Shanghai WANG Benyao, WANG Xiaoming, WANG Tianhou, et al (2788)
- Production dynamics and trophic basis of three dominant mayflies in the continuum of Shenglihe Stream in the Bahe River Basin DENG Shan, YE Caiwei, WANG Lixiao, et al (2796)
- Effects of sedimentation thickness of shrimp pond cleaning discharges on *Acanthus ilicifolius* seedlings LI Ting, YE Yong (2810)
- Utilization of carbon sources by the soil microbial communities of different forest types in subtropical Australia LU Shunbao, GUO Xiaomin, RUI Yichao, et al (2819)
- Soil microbial community characteristics under different vegetation types at the Holocene-basalt Platform, Jingpo Lake area, Northeast China HUANG Yuanyuan, QU Laiye, QU Xiuchun, et al (2827)
- Effect of *Ipomoea aquatica* Floating-bed on the quantity and distribution of nitrogen cycling bacteria and nitrogen removal TANG Yingying, LI Xiuzhen, ZHOU Yuanqing, et al (2837)
- Effects of microbial inoculants on soil microbial diversity and degrading process of corn straw returned to field LI Peipei, ZHANG Dongdong, WANG Xiaojuan, et al (2847)

Effects of coupling film-mulched furrow-ridge cropping with maize straw soil-incorporation on maize yields and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China	WU Rongmei, WANG Yongpeng, LI Fengmin, et al (2855)
Residues and spatial distribution of OCPs in the sediments of Gan River Basin ...	LIU Xiaozhen, ZHAO Ci, LIANG Yu, et al (2863)
Analysis on population fluctuation and properties of the white-backed planthopper in Huizhou in 2009 .....	..... DIAO Yonggang, YANG Haibo, QU Yufeng, et al (2872)
Evaluation acaricidal activities of <i>Momordica cochinchinensis</i> extracts against <i>Tetranychus cinnabarinus</i> .....	..... GUO Huili, SHI Guanglu, JIA Liangxi, et al (2883)
Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of winter wheat .....	..... TONG Lei, FENG Zongwei, Sudebilige, et al (2890)

Review and Monograph

Calculation method of energy ecological footprint based on global net primary productivity .....	..... FANG Kai, DONG Deming, LIN Zhuo, et al (2900)
Behavioral patterns, influencing factors, functions and risks of social play in primates .....	..... WANG Xiaowei, ZHAO Haitao, QI Xiaoguang, et al (2910)

Discussion

Spatio-Temporal changing analysis on carbon storage of harvested wood products in China LUN Fei, LI Wenhua, WANG Zhen, et al (2918)
---	---

Scientific Note

Variations in allometrical relationship between stand nitrogen storage and biomass as stand development .....	..... CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2929)
Effect of continuous cropping of sesame on rhizospheric microbial communities .....	..... HUA Juling, LIU Guangrong, HUANG Jinsong (2936)
Effects of clipping on the growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence of invasive plant, <i>Flaveria bidentis</i> .....	..... WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, CHEN Dongqing, et al (2943)
Influence of vegetable cultivation methods on soil organic carbon sequestration rate .....	..... LIU Yang, YU Dongsheng, SHI Xuezheng, et al (2953)
Integrated matrix-hydrology-biological remediation technology for bank collapse lakeside zone of Chaohu Lake .....	..... CHEN Yunfeng, ZHANG Yanhui, ZHENG Xiqiang (2960)

《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 9 期 (2012 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 9 (May, 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 100071, 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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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