•研究报告•

五大连池火山色木槭叶功能性状特征

谢立红^{1,2} 黄庆阳^{1,2} 曹宏杰^{1,2} 杨帆^{1,2} 王继丰^{1,2} 倪红伟^{1,2*}

1 (黑龙江省科学院自然与生态研究所, 哈尔滨 150040)

2 (湿地与生态保育国家地方联合工程实验室, 哈尔滨 150040)

摘要: 植物功能性状反映了植物对生长环境的响应和适应, 是连接植物与环境的桥梁, 研究植物功能性状特征及其随坡向的变化规律, 对认识不同微地形生境下植物群落空间格局形成及适应机制具有重要意义。本文以五大连池不同历史年代的8座火山共有树种色木槭(*Acer mono*)为研究对象, 测定了9类叶功能性状, 研究了植物叶功能性状在火山间及火山坡向间(阴坡–阳坡)的变化规律, 以期揭示生境对火山植物主要叶功能性状的影响, 以及阴阳坡植物生存策略的变化, 初步探讨了植物对环境的适应机制。结果表明: (1)坡向的变化是造成色木槭叶功能性状差异的重要原因; (2)火山间叶功能性状的差异反映了它们具有不同的资源环境, 色木槭生长主要受氮元素的限制; (3)南北坡向及火山间叶片厚度与叶面积均呈极显著的正相关关系, 叶片厚度与比叶面积在不同火山间均呈显著的正相关关系, 这与色木槭在火山土壤条件下的自我保护密切相关, 色木槭通过这些指标间的功能调节来适应环境的变化, 并形成最佳功能组合。五大连池不同历史年代火山的色木槭采用增加植物叶片干物质浓度、叶面积、叶片厚度、叶氮和叶磷浓度提高固碳能力, 通过降低比叶面积和氮磷比来适应干旱、土壤养分贫瘠的环境。

关键词: 五大连池火山; 坡向; 色木槭; 叶功能性状; 生存策略

Leaf functional traits of *Acer mono* in Wudalianchi Volcano, ChinaLihong Xie^{1,2}, Qingyang Huang^{1,2}, Hongjie Cao^{1,2}, Fan Yang^{1,2}, Jifeng Wang^{1,2}, Hongwei Ni^{1,2*}

1 Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040

2 National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Harbin 150040

Abstract: Functional traits reflecting responses and adaptations of plants to their environment can be used as a bridge between plants and the changes occurring in their environment. The analysis of the relationship between plant functional traits and environmental gradients present on hill slopes can improve our understanding of adaptation mechanisms of plant communities under different microtopographic habitats. In this paper, nine leaf functional traits of *Acer mono* individuals were studied on eight volcanoes in different historical years in Wudalianchi, China. The main leaf functional traits of volcanic plants on shady and sunny slopes were determined. A change in survival strategy and adaptation mechanisms of shady and sunny slope plants was found. The results were as follows: (1) The change of slope direction is an important reason for the difference of leaf functional characteristics of *Acer mono*. (2) The difference of leaf functional characteristics in volcanoes reflects their different resource environments. At the same time, the growth of *Acer mono* is mainly limited by nitrogen. (3) Leaf thickness had a significant positive correlation with leaf area between the north-south slopes and between volcanoes. There was a significant positive correlation between leaf thickness and specific leaf area between volcanoes, which is related to the self-protection of *Acer mono* under volcanic soil conditions. These results suggest that *Acer mono* can respond to its environment and adapt to express the best combination of functional traits. *Acer mono* individuals from volcanoes of different ages have increased carbon sequestration capacity, leaf dry matter content, leaf area, leaf thickness, nitrogen and phosphorus content, while also having reduced specific leaf area and nitrogen to phosphorus ratio as an adaptation to abundant light, low water content and poor soil nutrients.

Key words: Wudalianchi volcano; slope; *Acer mono*; leaf functional traits; survival strategy

收稿日期: 2018-11-10; 接受日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(31770497)和黑龙江省财政基本科研业务费专项(ZNBZ2018ZR05)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: nihongwei2000@163.com

植物在漫长的进化和发展过程中与环境相互作用, 逐渐形成能够适应外部环境的形态和生理结构, 植物这种能响应环境变化的性状被称为植物功能性状(Cornelissen et al, 2003)。研究表明, 植物的生存策略及其对资源的利用能力与叶功能性状具有紧密的联系, 同时植物适应环境变化形成的生存对策也可以通过叶功能性状反映(Westoby, 1998; 张曦等, 2016)。

在进化过程中, 植物叶片对环境变化相对敏感、可塑性较大, 其结构特征最能体现植物对环境的适应(Diemer, 1998)。在生境条件相对恶劣的情况下, 植物体呈现相对较小的叶面积(leaf size, LS), 在相同的物候条件下, 植物的适应能力、水分吸收运输能力、营养吸收能力等都与叶片大小有着密切关系, 影响其总体变化(Dramini et al, 2002)。比叶面积(specific leaf area, SLA)是反映植物对光照、水分、养分等资源的利用程度和利用能力大小的功能性状, 主要揭示植物对相关环境因子的利用和适应, 一般情况下, 干旱贫瘠的环境条件下生长的植物比叶面积相对较小, 因此, 比叶面积在一定程度上反映了植物生长的环境条件(Garnier et al, 2001)。叶干物质浓度(leaf dry matter content, LDMC)是植物获取资源多少的预测指标(周欣等, 2016), 反映叶片对于干旱气候的适应能力, 是资源获取轴上最稳定的变量。叶片厚度(leaf thickness, LT)与叶片的资源获取、水分保存和同化功能等密切相关, 在养分贫瘠环境中植物叶片较厚。Reich和Oleksyn (2004)的研究结果表明比叶面积较小的植物叶常常面积小、厚度大。刘金环和曾德慧(2006)研究发现, 叶干物质浓度与叶片厚度呈负相关。Wright等(2004)的研究表明, 植物的比叶面积与叶氮浓度(leaf nitrogen content, LNC)及植物的最大净光合速率均呈显著的正相关关系, 这一现象也同时说明了植物通过增加或者减少养分循环的方式不断地适应环境变化。任书杰等(2007)通过对中国东部南北样带654种植物叶功能性状的系统研究发现, 除裸子植物和蕨类植物外, 绝大多数植物的叶氮浓度与叶磷浓度(leaf phosphorus content, LPC)显著相关。阴坡和阳坡是最常见的两种生境, 往往营造出局部的微气候生境(党晶晶等, 2015), 影响着生长环境的非生物资源分配(如温湿度、光辐射度和土壤养分再分配), 植物功能性状反映了植物对生长环境的响应和适应, 研

究植物功能性状特征及其随坡向变化规律, 对认识不同微地形生境下植物群落空间格局形成及适应机制具有重要意义(刘旻霞和马建祖, 2013)。

五大连池位于大小兴安岭和松嫩平原的交错地带, 至今历经了7次火山喷发, 时间跨200万年~290年, 形成了14座火山, 拥有大陆上保存完整、分布集中、形态典型、种类最齐全的新老期火山地质地貌(黄庆阳等, 2014)。五大连池火山每次喷发后, 原生演替从裸岩上重新开始, 经过地衣苔藓、草本、灌木、先锋森林、过渡森林, 最后形成稳定森林群落, 完整地保存了代表性的火山生态系统演替过程, 是反映陆地生态系统和动植物群落进化和发展进程中正在进行的生态和生物演化过程的典型范例(周志强等, 2011)。位于黑龙江省的五大连池火山是世界范围内适宜研究物种适应过程和生态过渡区生物群落演替过程的为数不多的几个地区之一(Leith, 1975)。但是有关火山植物功能性状的研究起步较晚, 研究资料较少。仅谢立红等(2018)研究了五大连池新时期火山熔岩台地3种植物叶功能性状及其相互关系, 然而从不同火山及南北坡向环境梯度角度探讨火山植物叶功能性状的研究尚未有报道。

本文以五大连池不同历史年代的8座火山为研究对象, 探讨它们的共有树种色木槭(*Acer mono*)植物叶功能性状如叶干物质浓度、叶面积、比叶面积、叶片厚度、叶碳浓度(leaf carbon content, LCC)、叶钾浓度(leaf kalium content, LKC)、叶氮浓度、叶磷浓度、叶氮磷比(ratio of nitrogen and phosphorus, N/P)在不同火山间及火山坡向间(阴坡-阳坡)的变化规律, 希望可以揭示生境对火山植物叶功能性状的影响, 以及阴阳坡植物生存策略的变化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

五大连池火山群(126°00'~126°45' E, 48°30'~48°50' N)中心区由新时期火山活动形成的巨大熔岩流——石龙、两座年轻火山和巨大的熔岩形成的石龙台地和火山堰湖群构成。四周由老期火山活动形成的玄武岩台地构成, 其上环布12座老期火山和众多熔岩流(赵文峰, 1987)。

五大连池年平均气温为-0.5℃, 年平均降水量476.33 mm, 多年平均相对湿度69.2%, 年均无霜期121 d。本区位于长白山植物区系和大兴安岭植物区

系交汇地带,既有源自寒温带大兴安岭的落叶松(*Larix gemelinii*)、兴安桧(*Sabina davurica*),同时还生长着源自中温带小兴安岭的红松(*Pinus koraiensis*)、兴安鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)、色木槭和紫椴(*Tilia amurensis*)。

1.2 研究方法

1.2.1 野外样品采集

于2016年7月中旬至8月中旬植物生长旺盛期,在东焦得布山、小孤山、笔架山、西焦得布山、尾山、卧虎山、北格拉球山和南格拉球山8座火山(图1)的南坡和北坡的中上部随机选取5株色木槭,每棵树选取生长成熟、未遮阴、完全展开、没有病虫害的叶片30片,用枝剪剪下(均带叶柄),共采集80个个体的2,400片叶片,放入自封袋内带回实验室,随机选取20片用于叶功能性状的测定。

1.2.2 叶功能性状测定

将叶片浸入水中置于5℃的黑暗环境中12 h,取出后迅速用滤纸吸干叶片表面的水分,在1/10000的电子天平上称饱和鲜重(leaf fresh weight, FW)。然后将叶片平铺在扫描仪(LA-S, 杭州万深)上扫描得到叶面积;选取测量完叶面积后的10片叶子用电子数显卡尺(精度为 0.01 mm)分别测量叶片前、中、末端(避开叶片主脉)厚度,取三者的平均值作为所

测叶片的厚度值。最后将叶片放于80℃烘箱内烘干24 h后取出称干重(leaf dry weight, DW), $LDMC = DW/FW$, $SLA = LS/DW$ 。叶碳浓度和叶氮浓度的测定采用元素分析仪(EA3000, 意大利欧维特);叶磷浓度的测定采用钼锑抗比色法、叶钾浓度的测定采用火焰光度法(鲍士旦, 2010); $N/P = LNC/LPC$ 。

1.2.3 数据处理

采用Excel 2010和SPSS 20.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和Duncan法进行叶功能性状方差分析和多重比较($\alpha = 0.05$),用Pearson法对叶功能性状各指标间的相关性进行分析,用主成分分析法筛选叶功能形状的主要指标。

2 结果

2.1 南北坡向叶功能性状的变化

总体上,叶干物质浓度、叶面积、叶片厚度南坡大于北坡(图2),叶碳浓度、叶钾浓度、叶氮浓度和叶磷浓度的最大值都出现在山体的南坡,叶氮磷比的最大值出现在山体的北坡(图2)。叶干物质浓度只有东焦得布山和小孤山是南坡小于北坡,其他都是南坡大于北坡;西焦得布山为南坡最大(337.69 ± 7.77 mg/g),卧虎山为北坡最小(266.55 ± 16.14 mg/g)。叶面积只有南格拉球山是南坡小于北坡,卧虎山为南坡最大($4,859.69 \pm 596.45$ mm²),东焦得布山为北坡最小($3,143.20 \pm 650.34$ mm²)。比叶面积在笔架山、西焦得布山、卧虎山和南格拉球山是南坡小于北坡;卧虎山的北坡最大(24.93 ± 2.18 mm²/mg),南格拉球山的南坡最小(16.08 ± 2.76 mm²/mg)。叶片厚度只有南格拉球山是南坡小于北坡;卧虎山南坡最大(0.126 ± 0.022 mm),东焦得布山北坡最小(0.063 ± 0.024 mm)。叶碳浓度在东焦得布山、西焦得布山、尾山和南格拉球山是南坡小于北坡;笔架山南坡最大(509.54 ± 5.38 mg/g),卧虎山北坡最小(462.72 ± 21.40 mg/g)。叶钾浓度在东焦得布山、笔架山、西焦得布山、尾山和卧虎山是南坡小于北坡;小孤山南坡最大(13.66 ± 2.82 mg/g),卧虎山南坡最小(7.13 ± 2.98 mg/g)。叶氮浓度在西焦得布山、尾山、卧虎山和南格拉球山是南坡小于北坡;笔架山南坡最大(23.66 ± 1.68 mg/g),尾山南坡最小(15.34 ± 2.21 mg/g)。叶磷浓度在小孤山、西焦得布山、卧虎山是南坡小于北坡;北格拉球山南

图1 五大连池火山研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of research area in Wudalianchi volcanoes. WS, Weishan; BGLQS, Beigelaqiushan; NGLQS, Nange-laqiushan; BJS, Bijiaoshan; WHS, Wohushan; XGS, Xiaogushan; DJDBS, Dongjiaodebushan; XJDBS, Xijiaodebushan.

图2 五大连池8座火山色木槭叶功能性状。不同大写字母表示不同火山间叶功能性状差异显著, 不同小写字母表示每座火山南北坡间叶功能性状差异显著($P < 0.05$)。DJDBS、XGS、BJS、XJDBS、WS、WHS、BGLQS和NGLQS的含义见图1。

Fig. 2 Leaf functional traits of *Acer mono* on eight volcanoes in Wudalianchi. The different capital letter shows that there is significant difference in leaf functional traits between volcanoes, the different small letter shows that there is significant difference in leaf functional traits between north and south slopes. DJDBS, XGS, BJS, XJDBS, WS, WHS, BGLQS and NGLQS are the same as in Fig. 1.

表1 五大连池8座火山及其南北坡向间色木槭叶功能性状变异系数

Table 1 Variation coefficient of leaf functional traits of *Acer mono* on eight volcanoes and its north-south slope in Wudalianchi

	叶干物质浓度 Leaf dry matter content	叶面积 Leaf size	比叶面积 Specific leaf area	叶片厚度 Leaf thickness	叶碳浓度 Leaf carbon content	叶钾浓度 Leaf kalium content	叶氮浓度 Leaf nitrogen content	叶磷浓度 Leaf phosphorus content	叶氮磷比 Ratio of nitrogen and phosphorus
东焦得布山 Dongjiaodebushan (DJDBS)	0.06	0.25	0.10	0.40	0.01	0.03	0.06	0.15	0.10
小孤山 Xiaogushan (XGS)	0.03	0.06	0.09	0.11	0.01	0.13	0.13	0.02	0.12
笔架山 Bijiaoshan (BJS)	0.04	0.03	0.16	0.05	0.02	0.05	0.07	0.08	0.00
西焦得布山 Xijiaodebushan (XJDBS)	0.12	0.01	0.05	0.01	0.02	0.22	0.09	0.02	0.07
尾山 Weishan (WS)	0.04	0.10	0.01	0.14	0.03	0.20	0.07	0.09	0.16
卧虎山 Wohushan (WHS)	0.03	0.05	0.15	0.07	0.06	0.21	0.05	0.02	0.08
北格拉球山 Beigelaqiushan (BGLQS)	0.00	0.10	0.07	0.18	0.01	0.11	0.06	0.01	0.12
南格拉球山 Nangelaqiushan (NGLQS)	0.08	0.09	0.12	0.15	0.02	0.01	0.07	0.08	0.15
南坡 South slope	0.08	0.10	0.12	0.15	0.03	0.27	0.12	0.07	0.15
北坡 North slope	0.05	0.10	0.11	0.16	0.03	0.18	0.11	0.12	0.18
南北坡向间 South /North	0.06	0.08	0.08	0.12	0.02	0.14	0.08	0.06	0.10
火山间 Between volcanoes	0.05	0.08	0.09	0.12	0.02	0.20	0.10	0.09	0.15

坡最大(8.91 ± 1.13 mg/g), 南格拉球山北坡最小(6.29 ± 0.44 mg/g)。叶氮磷比在东焦得布山、西焦得布山、尾山、卧虎山、南格拉球山是南坡小于北坡; 南格拉球山北坡最大(3.43 ± 0.49), 北格拉球山北坡最小(1.98 ± 0.42)。

南坡叶功能性状的变异系数为0.03–0.27, 北坡叶功能性状的变异系数为0.03–0.18, 南北坡向间叶功能性状的变异系数为0.02–0.14 (表1)。南北坡向间植物叶功能性状没有显著差异(表2)。除南坡间叶钾浓度变异系数为0.27外, 南坡、北坡及南北坡向间植物叶功能性状变异系数都小于0.20。

表2 五大连池8座火山色木槭叶功能性状方差分析结果

Table 2 One-way ANOVA for leaf functional traits of *Acer mono* on eight volcanoes in Wudalianchi

变量 Variable	火山间 Between volcanoes		坡向间 Between slopes	
	F	P	F	P
叶干物质浓度 Leaf dry matter content	1.280	0.366	1.558	0.232
叶面积 Leaf size	1.207	0.395	2.983	0.106
比叶面积 Specific leaf area	1.333	0.346	0.339	0.570
叶片厚度 Leaf thickness	1.140	0.425	4.302	0.057
叶碳浓度 Leaf carbon content	0.996	0.496	0.149	0.705
叶钾浓度 Leaf kalium content	4.482	0.026 [*]	0.341	0.569
叶氮浓度 Leaf nitrogen content	3.285	0.059	0.010	0.922
叶磷浓度 Leaf phosphorus content	2.835	0.084	1.397	0.257
叶氮磷比 Ratio of nitrogen and phosphorus	4.065	0.034 [*]	0.464	0.507

2.2 火山间的叶功能性状变化

由图2可知, 叶干物质浓度在尾山最大(320.51 ± 13.76 mg/g), 卧虎山最小(272.53 ± 8.45 mg/g)。叶面积在卧虎山最大($4,700.31 \pm 225.39$ mm²), 南格拉球山最小($3,714.48 \pm 339.00$ mm²)。比叶面积在卧虎山最大(22.61 ± 3.28 mm²/mg), 南格拉球山最小(17.51 ± 2.03 mm²/mg)。叶片厚度在卧虎山最大(0.120 ± 0.008 mm), 南格拉球山最小(0.084 ± 0.012 mm)。叶碳浓度在笔架山最大(502.20 ± 10.39 mg/g), 南格拉球山最小(477.43 ± 10.63 mg/g)。叶钾浓度在笔架山最大(12.85 ± 0.58 mg/g), 东焦得布山最小(7.42 ± 0.22 mg/g)。叶氮浓度在笔架山最大(22.57 ± 1.54 mg/g), 尾山最小(16.18 ± 1.19 mg/g)。叶磷浓度在北格拉球山最大(8.87 ± 0.06 mg/g), 南格拉球山最小(6.69 ± 0.57 mg/g)。叶氮磷比在笔架山最大(3.26 ± 0.02), 北格拉球山最小(2.17 ± 0.26)。

山体间叶功能性状的变异系数为0.02–0.20 (表1)。总体上, 卧虎山的叶面积、比叶面积、叶厚度最大, 尾山的叶干物质浓度最大, 笔架山的叶碳浓度、叶钾浓度、叶氮浓度和叶氮磷比最大, 北格拉球山的叶磷浓度最大; 南格拉球山的叶面积、比叶面积、叶片厚度、叶碳浓度、叶磷浓度和叶氮磷比最小, 卧虎山的叶干物质浓度最小, 东焦得布山的叶钾浓度最小, 北格拉球山的叶氮磷比最小(图2), 山体的叶功能性状的变异性都小(变异系数 ≤ 0.2)

(表1)。

火山间的叶干物质浓度、叶面积、比叶面积、叶片厚度、叶碳浓度和叶磷浓度无显著差异; 叶钾浓度和叶氮磷比有显著差异(表2)。进一步对火山间的钾、氮磷比进行多重比较(表3), 结果表明, 叶钾浓度在东焦得布山与小孤山、笔架山和南格拉球山之间, 小孤山与尾山、卧虎山和北格拉球山之间, 笔架山与西焦得布山、尾山、卧虎山和北格拉球山之间, 卧虎山与南格拉球山之间均差异显著($P < 0.05$)。叶氮磷比在小孤山与笔架山和南格拉球山之间, 笔架山与尾山、卧虎山和北格拉球山之间, 尾山与南格拉球山之间, 卧虎山和南格拉球山之间, 在北格拉球山和南格拉球山之间均差异显著($P < 0.05$)。

2.3 南北坡向和火山间植物叶功能性状的相关性

由表4可知, 北坡向色木槭比叶面积与叶干物质浓度呈显著负相关关系($P < 0.05$); 比叶面积与叶面积呈显著正相关关系($P < 0.05$); 叶片厚度与叶面积呈极显著正相关关系; 叶氮磷比与叶氮浓度呈极显著的正相关关系, 与叶磷浓度呈极显著负相关关系($P < 0.01$); 其他叶性状之间不存在显著的相关关系($P > 0.05$)。南坡向色木槭叶片厚度与叶面积、叶磷浓度与比叶面积、叶氮磷比与叶氮浓度均呈极显著的正相关关系($P < 0.01$); 其他叶性状之间不存在显著相关关系。色木槭叶氮磷比与叶氮浓度在北坡与南坡上都呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。

由表5可知, 火山间色木槭比叶面积与叶面积、叶片厚度与比叶面积、叶磷浓度与比叶面积均呈显著正相关关系($P < 0.05$); 叶片厚度与叶面积、叶氮磷比与叶氮浓度均呈极显著正相关关系($P < 0.01$);

表3 五大连池8座火山间色木槭叶钾浓度(LKC)和叶氮磷比(N/P)的多重比较($P = 0.05$)

Table 3 Multiple comparison of leaf kalium content (LKC), ratio of nitrogen and phosphorus (N/P) of *Acer mono* between eight volcanoes in Wudalianchi

变量 Variable		LKC	N/P
东焦得布山 Dongjiaodebushan (DJDBS)	小孤山 XGS	0.006*	0.425
	笔架山 BJS	0.004*	0.068
	西焦得布山 XJDBS	0.158	0.959
	尾山 WS	0.199	0.154
	卧虎山 WHS	0.492	0.300
小孤山 Xiaogushan (XGS)	北格拉球山 BGLQS	0.251	0.109
	南格拉球山 NGLQS	0.008*	0.154
	笔架山 BJS	0.808	0.018*
	西焦得布山 XJDBS	0.064	0.454
	尾山 WS	0.050*	0.485
笔架山 Bijiaoshan (BJS)	卧虎山 WHS	0.018*	0.795
	北格拉球山 BGLQS	0.039*	0.363
	南格拉球山 NGLQS	0.833	0.042*
	西焦得布山 XJDBS	0.043*	0.063
	尾山 WS	0.034*	0.006*
西焦得布山 Xijiaodebushan (XJDBS)	卧虎山 WHS	0.012*	0.012*
	北格拉球山 BGLQS	0.026*	0.004*
	南格拉球山 NGLQS	0.652	0.606
	尾山 WS	0.880	0.167
	卧虎山 WHS	0.427	0.322
尾山 Weishan (WS)	北格拉球山 BGLQS	0.757	0.118
	南格拉球山 NGLQS	0.090	0.143
	卧虎山 WHS	0.516	0.655
	北格拉球山 BGLQS	0.874	0.822
	南格拉球山 NGLQS	0.071	0.014*
卧虎山 Wohushan (WHS)	北格拉球山 BGLQS	0.620	0.506
	南格拉球山 NGLQS	0.025*	0.028*
	北格拉球山 Beigelaqiushan (BGLQS)	0.055	0.010*

* $P < 0.05$

表4 五大连池8座火山北坡(对角线下部)和南坡(对角线上部)的色木槭叶功能性状相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients among leaf functional traits of *Acer mono* on north (lower diagonal) and south (upper diagonal) slope of eight volcanoes in Wudalianchi

	LDMC	LS	SLA	LT	LCC	LKC	LNC	LPC	N/P
叶干物质浓度 Leaf dry matter content (LDMC)		-0.553	-0.623	-0.528	0.232	0.211	-0.271	-0.492	0.081
叶面积 Leaf size (LS)	-0.516		0.674	0.984**	0.410	-0.489	-0.122	0.684	-0.428
比叶面积 Specific leaf area (SLA)	-0.750*	0.709*		0.612	0.052	-0.345	-0.168	0.895**	-0.445
叶片厚度 Leaf thickness (LT)	-0.370	0.966**	0.560		0.355	-0.489	-0.200	0.666	-0.492
叶碳浓度 Leaf carbon content (LCC)	0.241	-0.262	-0.376	-0.224		0.039	0.525	0.001	0.382
叶钾浓度 Leaf kalium content (LKC)	0.018	0.448	-0.047	0.522	0.374		0.572	-0.374	0.697
叶氮浓度 Leaf nitrogen content (LNC)	-0.655	0.295	0.370	0.197	0.337	0.539		-0.203	0.929**
叶磷浓度 Leaf phosphorus content (LPC)	-0.149	0.384	0.398	0.300	-0.353	-0.403	-0.468		-0.442
叶氮磷比 Ratio of nitrogen and phosphorus (N/P)	-0.271	-0.079	-0.043	-0.101	0.404	0.543	0.853**	-0.852**	

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$.

表5 五大连池8座火山色木槭叶功能性状的相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients among leaf functional traits of *Acer mono* on eight volcanoes in Wudalianchi

	LDMC	LS	SLA	LT	LCC	LKC	LNC	LPC
叶干物质浓度 Leaf dry matter content (LDMC)								
叶面积 Leaf size (LS)	-0.371							
比叶面积 Specific leaf area (SLA)	-0.700	0.732*						
叶片厚度 Leaf thickness (LT)	-0.320	0.978**	0.734*					
叶碳浓度 Leaf carbon content (LCC)	0.104	0.203	0.128	0.196				
叶钾浓度 Leaf kalium content (LKC)	0.439	-0.194	-0.554	-0.284	0.254			
叶氮浓度 Leaf nitrogen content (LNC)	-0.230	-0.114	-0.120	-0.150	0.594	0.506		
叶磷浓度 Leaf phosphorus content (LPC)	-0.306	0.540	0.811*	0.529	-0.034	-0.477	-0.468	
叶氮磷比 Ratio of nitrogen and phosphorus (N/P)	0.069	-0.404	-0.497	-0.406	0.420	0.586	0.906**	-0.756*

** $P < 0.01$, * $P < 0.05$.

表6 五大连池8座火山色木槭叶功能性状在南北坡的主成分分析结果

Table 6 Principal component analysis of leaf functional traits in *Acer mono* on north and south slopes of eight volcanoes in Wudalianchi

指标 Index	北坡 North slope				南坡 South slope		
	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	公因方差 Communality	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	公因子方差 Communality
叶干物质浓度 Leaf dry matter content	-0.774	-0.025	0.571	0.925	-0.582	-0.520	0.609
叶面积 Leaf size	0.918	-0.209	0.324	0.990	0.887	0.310	0.883
比叶面积 Specific leaf area	0.828	-0.287	-0.329	0.876	0.835	0.167	0.726
叶片厚度 Leaf thickness	0.833	-0.180	0.485	0.961	0.885	0.235	0.839
叶碳浓度 Leaf carbon content	-0.225	0.638	0.258	0.524	0.100	0.760	0.588
叶钾浓度 Leaf kalium content	0.424	0.619	0.622	0.949	-0.673	0.375	0.594
叶氮浓度 Leaf nitrogen content	0.593	0.735	-0.280	0.971	-0.414	0.882	0.949
叶磷浓度 Leaf phosphorus content	0.206	-0.872	0.075	0.809	0.837	0.111	0.712
叶氮磷比 Ratio of nitrogen and phosphorus	0.196	0.943	-0.215	0.974	-0.704	0.677	0.953
特征值 Eigenvalue	3.483	3.140	1.357		4.437	2.415	
贡献率 Contribution rate (%)	38.695	34.886	15.083		49.302	26.832	
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	38.695	73.581	88.663		49.302	76.133	

叶氮磷比与叶磷浓度呈显著负相关关系($P < 0.05$); 其他各叶性状之间不存在显著相关关系。

2.4 南北坡向和火山间叶功能性状主成分分析

由表6可知, 南北坡向色木槭叶功能性状各指标的公因子方差均较大, 最小的公因子方差是叶碳浓度(南坡0.588、北坡0.524)。主成分分析表明, 叶干物质浓度、叶面积、比叶面积和叶片厚度在南北坡均与第1主成分呈显著相关, 为叶功能性状的主要指标。

由表7可知, 8座火山间色木槭叶功能性状各指标的公因子方差均较大, 主成分分析表明, 叶面积、比叶面积、叶片厚度和叶磷浓度与第1主成分

呈显著正相关, 为叶功能性状的主要指标。

3 讨论

3.1 色木槭叶功能性状对坡向的响应

坡向是一种重要的地形因子, 影响坡面接受的太阳光辐射和地面与风向的夹角。坡向与光照强度、光照面积及土壤含水量之间呈负相关(宝乐和刘艳红, 2009), 而地形通过光照、温度和降水等生态因子的再分配间接影响植被的生长。本研究结果显示比叶面积南坡小于北坡, 叶片厚度南坡大于北坡, 这与刘旻霞和马组建(2012, 2013)对阴阳坡植物功能性状与环境因子的变化特征和甘南高寒草甸植

表7 五大连池8座火山色木槭叶功能性状主成分分析结果
Table 7 Principal component analysis of leaf functional traits of *Acer mono* on eight volcanoes in Wudalianchi

指标 Index	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	公因子方差 Communality
叶干物质浓度 Leaf dry matter content	-0.498	-0.386	0.743	0.949
叶面积 Leaf size	0.761	0.461	0.313	0.890
比叶面积 Specific leaf area	0.893	0.359	-0.178	0.959
叶片厚度 Leaf thickness	0.772	0.425	0.318	0.878
叶碳浓度 Leaf carbon content	-0.143	0.757	0.337	0.707
叶钾浓度 Leaf kalium content	-0.669	0.283	0.421	0.705
叶氮浓度 Leaf nitrogen content	-0.523	0.810	-0.242	0.989
叶磷浓度 Leaf phosphorus content	0.855	-0.044	0.115	0.746
叶氮磷比 Ratio of nitrogen and phosphorus	-0.801	0.540	-0.188	0.969
特征值 Eigen value	4.335	2.274	1.181	
贡献率 Contribution rate (%)	48.170	25.262	13.124	
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	48.170	73.432	86.557	

物功能性状和土壤因子对坡向响应的研究结论一致。从阳坡到阴坡的生境变化过程中, 环境因子发生了显著变化, 阳坡的土壤养分含量和水分含量较低, 土壤较贫瘠, 植物平均比叶面积较小。相比之下阴坡生境资源较充足, 植物比叶面积性状显著大于阳坡(刘旻霞和马建祖, 2013)。由于比叶面积反映了植物获取和利用资源的能力, 与植物的生存对策密切相关, 通常情况下, 比叶面积较高的植物, 其叶片的光捕获面积较大, 而比叶面积较低的植物, 叶的大部分物质用于构建防御结构, 常形成厚度较大的叶片(刘旻霞和马建祖, 2012)。本研究结果叶干物质浓度南坡大于北坡, 这与党晶晶等(2015)对祁连山高寒草地甘肃臭草(*Melica przewalskyi*)叶性状与坡向间的关系研究和胡耀升等(2014)对长白山不同演替阶段森林植物功能性状及其与地形因子间的关系的研究结论一致。光照条件充足的阳坡并不需要通过叶面积的增加而增大光合速率, 反而阳坡上土壤水分最少, 水分限制增加, 植株可能会将叶生物量投资于机械支持结构与微管结构, 而且大叶的呼吸和蒸腾成本更高, 不利于其光拦截能力和光合碳获取能力最大化(党晶晶等, 2015), 叶干物质浓度的增加使叶片内部水分向叶片表面扩散的距离或阻力增大, 降低植物内部水分散失(胡耀升等, 2014), 因此阳坡植被具有较高的叶干物质浓度, 这可能提高其对环境的适合度。本研究中叶碳浓度、叶钾浓度、叶氮浓度和叶磷浓度的最大值都出现在

山体的南坡; 叶氮磷比的最大值在山体的北坡。面对资源异质性分布的生境和植物生活史中光合产物的供需矛盾, 叶片各功能性状的自我调整与适应显得至关重要(许洛山等, 2015), 叶片厚度的资源投入有利于减少水分的蒸腾散失并提高固碳能力(王先奎和王传宽, 2015), 干旱地区植物会形成较厚的叶片以提高叶氮浓度和叶磷浓度(Wright et al, 2001)。有研究发现快速生长的潜力一般与较低的氮磷比相关(Niklas et al, 2005), 因为快速生长需要磷含量丰富, 因此磷增长要比氮快, 造成了有机体快速生长时较低的叶氮磷比。可见, 坡向的变化是造成五大连池不同历史年代火山色木槭叶功能性状差异的重要原因。

由于物种分布区内不同生境间存在差异, 物种要做出适应性变化。本研究中色木槭各叶功能性状的种内变异系数为南坡间 0.07–0.27、北坡间 0.03–0.18 和南北坡向间 0.02–0.20, 功能性状的变异就是这种适应性变化的表现或反应形式之一。每个物种都有一定的适应幅度, 功能性状的变化也是有限的(苏文华等, 2015)。Hallik 等(2009)的研究表明功能性状的种间变异系数可高达 0.95, 而种内变异系数则不超过 0.30。

3.2 不同火山间色木槭叶功能性状的变化

植物功能性状反映了植物对气候和土壤等环境因子适应的重要信息(孟婷婷等, 2007)。本研究中南格拉球山的叶面积、比叶面积、叶片厚度、叶碳

浓度和叶磷浓度都最小,卧虎山有最大的叶面积、比叶面积、叶片厚度和最小的叶干物质浓度,尾山有最大的叶干物质浓度和最小的叶氮浓度,笔架山有最大的叶碳浓度、叶钾浓度和叶氮浓度,这可能是因为卧虎山和笔架山山体较小且有多处火山口,火山灰厚度大,环境资源丰富,而尾山的山体大且南坡有多处的采石塌陷坑,土壤养分贫瘠。叶片比叶面积和叶干物质浓度不仅能够反映植物获取资源的能力,而且可较好地表征植物生长和适应生存环境的重要信息(Garnier et al, 2001),比叶面积高的植物适应资源丰富环境,比叶面积低的植物适应降水少、蒸发量大、土壤贫瘠的环境(赵红洋等, 2010)。植物生长所需要的90%以上的氮元素来自于凋落物分解过程中的养分释放(Elser et al, 2007),主要的磷来源于岩石的风化(Craigne & Jackson, 2010),降水量少和相对较低的分解速度使得矿质风化速率降低和土壤存储有机物质的能力较小,会导致养分可利用性相对于其他地区明显的降低(Dijkstra et al, 2012),进一步影响植物体内的养分含量。

植物叶片或生物量中的叶氮磷比可作为判断环境对植物生长养分供应状况和植物生长速率的重要指标(吴统贵等, 2010)。研究表明,植物生长受氮和磷限制的叶氮磷比阈值为14和16 (Koerselman & Meuleman, 1996),目前,较低的N/P指示植物生长主要受氮素限制已基本得到了普遍认可(李玉霖等, 2010),本研究中火山间色木槭的叶氮磷比在3.26–2.17,说明五大连池火山色木槭的生长主要受氮限制。

本研究中色木槭各功能性状火山间的种内变异系数是0.02–0.20,且在不同山体间叶钾浓度和叶氮磷比存在显著差异(表2, 表3)。由此可见,种内变异虽然较小却也是生物对不同生境适应性变化的直接体现,因此在研究植物功能性状与环境间相关关系时,不能简单地使用物种水平的性状平均值代替个体数据而忽略种内变异。

3.3 色木槭叶功能性状的相关性及主成分分析

植物功能性状并不是孤立发挥作用的,植物在长期适应环境的过程中,会通过内部不同功能之间的平衡,形成一系列适应特定环境的功能性状组合,各功能性状间具有一定的相关性(施宇等, 2011)。本研究中,北坡向比叶面积与叶干物质浓度呈显著的负相关关系、北坡向及火山间比叶面积与叶面积呈

显著的正相关关系、南坡向叶磷浓度与比叶面积呈极显著的正相关关系、火山间叶磷浓度与比叶面积呈显著的正相关关系,这些结论与国内外许多研究结果基本一致(Garnier et al, 2001; Wright et al, 2001; 赵红洋等, 2010; 胡耀升等, 2014)。本研究中南、北坡向及火山间叶氮磷比与叶氮浓度均呈极显著的正相关关系(南坡0.929、北坡0.853、火山间0.906)、北坡向及火山间叶氮磷比与叶磷浓度呈极显著的负相关关系(北坡-0.852、火山间-0.756),但与叶氮浓度的相关性更强。由此可以推断,五大连池不同历史年代火山色木槭叶氮磷比更多地受到氮元素的限制。本研究中南北坡向及火山间叶片厚度与叶面积均呈极显著的正相关关系,火山间叶片厚度与比叶面积呈显著的正相关关系,这可能与色木槭在火山土壤条件下的自我保护密切相关,色木槭通过这些指标间的功能调节来适应环境的变化,并形成最佳功能组合。

本研究认为,在火山和南北坡向上与它们的第1主成分呈显著相关的叶功能性状如叶干物质浓度、叶面积、比叶面积、叶片厚度和叶磷浓度是影响不同历史年代火山及坡向间色木槭群落结构和性质的主要叶功能性状指标。

本文通过对五大连池不同历史年代的8座火山共有树种色木槭叶功能性状进行研究,揭示了生境对火山植物叶功能性状的影响,以及不同生境植物生存策略的变化。虽然不同火山不同坡向生境不同,但植物采取不同的生存策略来适应坡向梯度(南–北坡)的微生境。

参考文献

- Bao L, Liu YH (2009) Comparison of leaf functional traits in different forest communities in Mt. Dongling of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 3692–3703. (in Chinese with English abstract) [宝乐, 刘艳红 (2009) 东灵山地区不同森林群落叶功能性状比较. *生态学报*, 29, 3692–3703.]
- Bao SD (2000) *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*, pp. 30–84. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [鲍士旦 (2000) 土壤农化分析, 30–84页. 中国农业出版社, 北京.]
- Cornelisse JHC, Lavorel S, Garnier E (2003) A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335–380.
- Craigne JM, Jackson RD (2010) Plant nitrogen and phosphorus limitation in 98 North American grassland soils. *Plant and*

- Soil, 334, 73–84.
- Dang JJ, Zhao CZ, Li Y, Hou ZJ, Dong XG (2015) Relationship between leaf traits of *Melica przewalskyi* and slope aspects in alpine grassland of Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 23–31. (in Chinese with English abstract) [党晶晶, 赵成章, 李钰, 侯兆疆, 董小刚 (2015) 祁连山高寒草地甘肃臭草叶性状与坡向间的关系. *植物生态学报*, 39, 23–31.]
- Diemer M (1998) Leaf lifespans of high-elevation, aseasonal and Andean shrub species in relation to leaf traits and leaf habit. *Global Ecology and Biogeography*, 7, 457–465.
- Dijkstra FA, Pendall E, Morgan JA (2012) Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semi-arid grassland. *New Phytologist*, 196, 807–815.
- Dramini F, Diaz S, Gurvich DE (2002) Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species. *New Phytologist*, 154, 147–157.
- Elser JJ, Bracken MES, Cleland EE (2007) Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10, 1135–1142.
- Garnier E, Shipley B, Roumet C (2001) A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. *Functional Ecology*, 15, 688–695.
- Hallik L, Niinemets W, Wright IJ (2009) Are species shade and drought tolerance reflected in leaf-level structural and functional differentiation in Northern Hemisphere temperate woody flora. *New Phytologist*, 184, 257–274.
- Hu YS, Yao XY, Liu YH (2014) The functional traits of forests at different succession stages and their relationship to terrain factors in Changbai Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 5915–5924. (in Chinese with English abstract) [胡耀升, 么旭阳, 刘艳红 (2014) 长白山不同演替阶段森林植物功能性状及其与地形因子间的关系. *生态学报*, 34, 5915–5924.]
- Huang QY, Zhu DG, Zhong HX, Xie LH, Ni HW (2014) Floristic analysis on spermatophyte genera in Wudalianchi. *Bulletin of Botanical Research*, 34, 200–203. (in Chinese with English abstract) [黄庆阳, 朱道光, 钟海秀, 谢立红, 倪红伟 (2014) 五大连池种子植物属的区系分析. *植物研究*, 34, 200–203.]
- Koerselman W, Meuleman AF (1996) The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 33, 1441–1450.
- Leith H (1975) Primary productivity of the major vegetation units of the world. *Ecological Studies*, 14, 203–214.
- Li YL, Mao W, Zhao XY, Zhang TH (2010) Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions, North China. *Environmental Science*, 31, 1716–1725. (in Chinese with English abstract) [李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 张铜会 (2010) 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究. *环境科学*, 31, 1716–1725.]
- Liu JH, Zeng DH (2006) Leaf traits and their interrelationships of main plant species in southeast Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Ecology*, 25, 921–925. (in Chinese with English abstract) [刘金环, 曾德慧 (2006) 科尔沁沙地东南部地区主要植物叶片性状及其相互关系. *生态学杂志*, 25, 921–925.]
- Liu MX, Ma JZ (2013) Feature variations of plant functional traits and environmental factor in south- and north-facing slope. *Research of Soil and Water Conservation*, 20, 102–106. (in Chinese with English abstract) [刘旻霞, 马建祖 (2013) 阴阳坡植物功能性状与环境因子的变化特征. *水土保持研究*, 20, 102–106.]
- Liu MX, Ma JZ (2012) Responses of plant functional traits and soil factors to slope aspect in alpine meadow of South Gansu, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 3295–3300. (in Chinese with English abstract) [刘旻霞, 马建祖 (2012) 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应. *应用生态学报*, 23, 3295–3300.]
- Meng TT, Ni J, Wang GH (2007) Plant functional traits, environments and ecosystem functioning. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 150–165. (in Chinese with English abstract) [孟婷婷, 倪健, 王国宏 (2007) 植物功能性状与环境及生态系统功能. *植物生态学报*, 31, 150–165.]
- Niklas KJ, Owens T, Reich PB, Cobb ED (2005) Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth. *Ecology Letters*, 8, 636–642.
- Qin J, Kong HY, Liu H (2016) Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forests. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 44(2), 68–76. (in Chinese with English abstract) [秦娟, 孔海燕, 刘华 (2016) 马尾松不同林型土壤C, N, P, K的化学计量特征. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 44(2), 68–76.]
- Reich PB, Oleksyn J (2004) Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 101, 11001–11006.
- Ren SJ, Yu GR, Tao B, Wang SQ (2007) Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, 28, 2665–2673. (in Chinese with English abstract) [任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强 (2007) 中国东部南北样带654种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. *环境科学*, 28, 2665–2673.]
- Shi Y, Wen ZM, Gong SH (2011) Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River basin, Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 6805–6814. (in Chinese with English abstract) [施宇, 温仲明, 龚时慧 (2011) 黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化. *生态学报*, 31, 6805–6814.]
- Su WH, Shi Z, Yang B, Yang JJ, Zhao GH (2015) Intraspecific functional trait variation in a tree species (*Lithocarpus dealbatus*) along latitude. *Plant Diversity and Resources*, 37, 309–317. (in Chinese with English abstract) [苏文华, 施展,

杨波, 杨建军, 赵冠华 (2015) 滇石栎沿纬度梯度叶片功能性状的种内变化. 植物分类与资源学报, 37, 309–317.]

Wang XK, Wang CK (2015) Acclimation of leaf phenology and adaption of photosynthetic capacity of *Larix gmelinii* to environmental changes. Acta Ecologica Sinica, 35, 4538–4546. (in Chinese with English abstract) [王先奎, 王传宽 (2015) 兴安落叶松对环境变化的物候驯化和光合能力适应. 生态学报, 35, 4538–4546.]

Westoby M (1998) A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. Plant and Soil, 199, 213–227.

Wright IJ, Reich PB, Westoby M (2004) The worldwide leaf economics spectrum. Nature, 428, 821–827.

Wright IJ, Reich PB, Westoby M (2001) Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats. Functional Ecology, 15, 423–434.

Wu TG, Chen BF, Xiao YH, Pan YJ, Chen Y (2010) Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China. Chinese Journal of Plant Ecology, 34, 58–63. (in Chinese with English abstract) [吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 潘勇军, 陈勇 (2010) 珠江三角洲3种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. 植物生态学报, 34, 58–63.]

Xie LH, Cao HJ, Huang QY, Wang JF, Ni HW (2018) Leaf functional traits and interrelationships of 3 plant species in Lava Plateau of new volcanic in Wudalianchi. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 38(4), 1–9. (in Chinese with English abstract) [谢立红, 曹宏杰, 黄庆阳, 王继丰, 倪红伟 (2018) 五大连池新期火山熔岩台地3种植物叶功能性状及其相互关系. 西北植物学报, 38(4), 1–9.]

Xu MS, Huang HX, Shi QR, Yang XD, Zhou LL (2015) Responses of soil water content to change in plant functional traits in evergreen broadleaved forests in eastern Zhejiang Province. Chinese Journal of Plant Ecology, 39, 857–866. (in Chinese with English abstract) [许谔山, 黄海侠, 史青

如, 杨晓东, 周刘丽 (2015) 浙东常绿阔叶林植物功能性状对土壤含水量变化的响应. 植物生态学报, 39, 857–866.]

Zhao HY, Li YL, Wang XY, Mao W, Zhao XY, Zhang TH (2010) Variations in leaf traits of 52 plants in Horqin Sandy Land. Journal of Desert Research, 30, 1292–1298. (in Chinese with English abstract) [赵红洋, 李玉霖, 王新源, 毛伟, 赵学勇, 张铜会 (2010) 科尔沁沙地52种植物叶片性状变异特征研究. 中国沙漠, 30, 1292–1298.]

Zhao WF (1987) Volcanic geology in Wudalianchi of Dedu. Northeastern Seismological Research, 3(1), 87–92. (in Chinese) [赵文峰 (1987) 德都五大连池火山地质. 东北地震研究, 3(1), 87–92.]

Zhang X, Wang ZN, Lu JY, Yang M, Yang HM (2016) Responses of leaf traits to drought at different growth stages of alfalfa. Acta Ecologica Sinica, 36, 2669–2676. (in Chinese with English abstract) [张曦, 王振南, 陆姣云, 杨梅, 杨惠敏 (2016) 紫花苜蓿叶性性状对干旱的阶段性响应. 生态学报, 36, 2669–2676.]

Zhou X, Zuo XA, Zhao XY, Liu C, Lü P (2016) Scale variation and correlation of plant functional traits in the Horqin Sandy Land, China. Journal of Desert Research, 36(1), 20–26. (in Chinese with English abstract) [周欣, 左小安, 赵学勇, 刘川, 吕朋 (2016) 科尔沁沙地植物功能性状的尺度变异及关联. 中国沙漠, 36(1), 20–26.]

Zhou ZQ, Xu LJ, Zhang YH, Xia CM, Li HG, Liu T, Ma KP (2011) An analysis of the ecological value of Wudalianchi, Heilongjiang Province, China. Biodiversity Science, 19, 63–70. (in Chinese with English abstract) [周志强, 徐丽娇, 张玉红, 夏春梅, 李洪光, 刘彤, 马克平 (2011) 黑龙江五大连池的生态价值分析. 生物多样性, 19, 63–70.]

(责任编辑: 王绪高 责任编辑: 黄祥忠)