

DOI: 10.5846/stxb201701130109

杨欢, 尹春英, 唐波, 郑东辉, 赵春章, 李丹丹, 刘庆. 川西亚高山针叶林树种云杉和冷杉土壤酸碱碱性差异及其机制. 生态学报, 2018, 38(14): - .
Yang H, Yin C Y, Tang B, Zheng D H, Zhao C Z, Li D D, Liu Q. Difference in soil pH values between *Picea asperata* and *Abies faxoniana* stands in subalpine regions and a preliminary study on its mechanism. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): - .

川西亚高山针叶林树种云杉和冷杉土壤酸碱碱性差异及其机制

杨 欢^{1, 2}, 尹春英^{1, *}, 唐 波^{1, 2}, 郑东辉^{1, 2}, 赵春章¹, 李丹丹¹, 刘 庆¹

1 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 比较了川西亚高山针叶林主要树种粗枝云杉(*Picea asperata*)和岷江冷杉(*Abies faxoniana*)样地各土层(0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm)土壤 pH 值差异, 并从两树种养分吸收和养分归还相关累积 H⁺ 输入方面探究其差异原因。研究结果表明: 云杉样地各土层土壤 pH 值均显著高于冷杉样地($P < 0.05$); 云杉样地地被物累积 H⁺ 输入显著低于冷杉样地($P < 0.05$); 云杉样地凋落物中 P、Mg、N、C 平均浓度显著低于冷杉($P < 0.05$), 而 Ca、C/N、木质素/N、C/P 显著高于冷杉样地($P < 0.05$), 两树种凋落物中木质素、K 平均浓度无显著差异。云杉和冷杉凋落物化学特性主成分分析 PC₁、PC₂ 方差贡献率分别为 73.7% 和 15.6%, 累积方差贡献率为 89.4%, 其中 PC₁ 主要综合 Ca、C/P、C/N、木质素/N、P、N、Mg 的信息; PC₂ 主要综合木质素、K、C 的信息。各土层土壤 pH 值均与地被物累积 H⁺ 输入显著负相关, 与 PC₁ 样本分数显著正相关。研究结论: 云杉和冷杉样地土壤 pH 值存在显著树种差异, 且云杉使土壤 pH 值变大, 冷杉使土壤 pH 值变小, 这主要与地被物形成以及凋落物化学特性有关, 即与凋落物的量和凋落物分解速率、凋落物养分归还率密切相关。

关键词: 土壤 pH 值; 地被物; 凋落物; 针叶林

Difference in soil pH values between *Picea asperata* and *Abies faxoniana* stands in subalpine regions and a preliminary study on its mechanism

YANG Huan^{1, 2}, YIN Chunying^{1, *}, TANG Bo^{1, 2}, ZHENG Donghui^{1, 2}, ZHAO Chunzhang¹, LI Dandan¹, LIU Qing¹

1 CAS Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

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

Abstract: Soil pH value is the most important soil property. It can not only directly affect the growth of crops, but is also involved in altering other soil properties. Our objective was to determine the difference in soil pH values between *Picea asperata* and *Abies faxoniana* stands and its mechanism. We used the seedlings of *Picea asperata* and *Abies faxoniana*, the widely distributed and important species in subalpine coniferous forests of Sichuan, China, as materials with which to conduct the experiment. We measured soil pH values of different soil layers, calculated the cumulative H⁺ input through nutrient uptake and storage in biomass, and forest floor accumulation, and analyzed the litter quality. The results showed that the pH value of *A. faxoniana* soil was greater than that of *P. asperata*. The soil pH value was significantly positively related to the calculated cumulative H⁺ input through forest floor accumulation, and negatively related to the first principal

基金项目: 国家自然科学基金(31370495, 31070533, 31570477 和 31400424); 中国科学院西部之光项目(Y4C2021); 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室开放基金项目(TEL201701)

收稿日期: 2017-01-13; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yincy@cib.ac.cn

component scores of different plots. Thus, soil pH value was significantly positively related to the ratio of lignin/N, C/N, C/P, and total concentration of Ca, and negatively related to total concentrations of N and P in leaf litter. The results suggested that the difference in the soil pH values between *P. asperata* and *A. faxoniana* was related to the forest floor accumulation and the leaf litter quality, i.e., the mass, decomposition, and nutrient-restitution of leaf litter.

Key Words: Soil pH value; forest floor; leaf litter; conifer tree

土壤酸碱性是土壤最重要的化学性质,土壤酸碱性的变化能较好地指示生态系统发展状态,在植被恢复和环境治理中非常重要。研究表明全球大约 50% 的农耕地发生土壤酸化现象,比例还在持续增加^[1]。我国酸化土壤呈现面积大、分布广及酸化程度高等特点,严重威胁粮食安全及农田可持续发展。因此,土壤酸碱性是生态学研究中的至关重要的课题。

土壤酸碱性通常用 pH 值表示,即指土壤溶液中 H^+ 浓度的负对数。它不仅能够直接影响作物的生长,而且还参与土壤一系列性质的变化。自然条件下土壤的酸碱性主要受土壤盐基状况所支配,而土壤的盐基状况决定于淋溶过程和复盐基过程的相对强度^[2]。所以,土壤酸碱性实际上是由气候条件、母质等自然因素,施肥和灌溉等人为因素,及植物和微生物等生物因素共同决定的^[2]。植物在修饰土壤化学以及养分循环方面起着非常主动与活跃的作用^[3]。因此,本试验主要着重于探究树种对土壤酸碱性影响的具体机制。前人研究表明影响造林土壤酸碱性过程的主要原因是养分获取、凋落物降解、与固氮菌的共生、大气干沉降。植物可通过生长过程中额外阳离子获取、凋落物降解、与固氮菌的共生以及大气干沉降等过程影响土壤 pH 值^[4]。植物生长过程中为了平衡其营养物质吸收过程中根系从土壤中吸收的较多阳离子,会向土壤中输入净质子(H^+),并且因为植物组织中存在阳离子累积情况(植物组织中大部分阳离子与有机阴离子相结合),所以植物根系吸收营养离子过程可视作一种酸化过程^[5]。凋落物完全分解释放的阳离子会对土壤中酸性物质起到缓冲作用,但是凋落物缓慢分解过程中又会产生有机酸等酸性物质^[6-7]。而共生固氮菌主要通过影响生态系统中活性 N 的浓度,从而对土壤酸碱性造成影响^[8]。此外,研究表明大气中的酸性物质(SO_x, NO_x)和潜在酸性成分(NH_x)通过植物截获而对土壤酸碱性的影响也是不容忽视的^[9]。

我国西南地区地处青藏高原东缘,川西亚高山针叶林作为青藏高原东部高寒林区的重要组成部分,对维持我国西部地区的区域生态安全和促进区域可持续发展具有十分重要的“生态屏障”作用^[10]。该区关于森林土壤的研究主要集中在土壤理化性质、微生物特性及其对增温、施氮、 CO_2 加倍的响应等方面^[11-13]。在我们前期的试验中发现,云杉和冷杉林下土壤 pH 有明显不同变化趋势(数据未发表)。因此,本研究基于茂县生态试验站已有的云杉、冷杉人工样地开展试验,拟解决以下几个问题:1)川西亚高山针叶林两主要树种云杉和冷杉土壤酸碱性存在哪些差异性? 2)云杉和冷杉林在营养循环过程(养分吸收和归还)方面具有哪些差异性,及其对土壤酸碱性的影响。

1 材料和方法

1.1 研究地区概况

本研究试验样地位于四川省阿坝州的中国科学院成都生物研究所茂县山地生态系统定位研究站($31^{\circ}41'N$, $103^{\circ}54'E$, 海拔 1826 m)。该区气候垂直带谱明显,从高山底部到顶部的植被带依次为灌木、落叶阔叶林、亚高山针叶林和高山草甸,粗枝云杉(*Picea asperata*)和岷江冷杉(*Abies faxoniana*)是亚高山针叶林的优势树种。该地区年平均降水量、年平均蒸发量和年平均气温分别为 825.2 mm、968.7 mm 和 $9.3^{\circ}C$,属暖温带亚高山季风气候。

1.2 试验设计

本实验参照 Wan 等^[14]采用裂区设计,共设 4 对 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的小区,其中 4 个为云杉小区,4 个为冷杉小区。

根据植株高度和基径,从当地苗圃选择大小相对一致的4年生云杉和冷杉幼苗于2010年10月移栽于设置的试验样地内。试验地原来为农业用地,试验布置时,取该区针叶林土壤,混匀过筛后,置换上层0—30 cm的表层土^[15]。试验开始前土壤理化特性为:全氮含量为4.0 g/kg、有机碳为61 g/kg;pH值为6.8;容重为0.91 g/cm³。试验期间,定期清除样地内的杂草,浇水等管理措施一致。

1.3 样品采集与指标测定

取样:于试验布置6年后,2016年8月进行植物和土壤样品采集。采用挖掘法于样地内大概80 cm×60 cm×50 cm(长×宽×高)区域内进行取样,带回整株植物清洗干净,将植株按叶、小枝、茎、根系四个部分分装,去离子水洗净,风干水分,然后80℃恒温下烘干至恒重,分别称取干重。烘干后的植物样品(叶、小枝、茎、根系)在粉碎机中分别进行磨碎、过筛处理,备用。每个小区内根据典型“S”形随机取样方法,用20 cm深的土钻取0—5、5—10、10—20 cm 3个层次土样,用冰袋保存土壤样品,带回实验室分析。土壤样品风干过筛用于土壤酸度指标的测定。

土壤酸碱性:土壤pH值的测定采用电位法(GB7859-87)^[16]。

植物养分吸收和养分归还(地被物)相关累积H⁺输入:根据公式
$$\text{NPG}_{\text{Bio/FF}} = (\text{Cation})_{\text{Bio/FF}} - (\text{Anion})_{\text{Bio/FF}}$$
^[4, 17-18] 计算,其中(Cation)_{Bio/FF},即total cation amount stored in biomass or forest floor;表示养分吸收或地被物累积相关总阳离子;(Anion)_{Bio/FF},即total anion amount stored in biomass or forest floor;表示养分吸收或地被物累积相关总阴离子;NPG_{Bio/FF},即net proton generation by cation excess uptake by vegetation or forest floor;表示养分吸收或地被物累积相关净质子生成。

1.植物养分吸收相关累积H⁺输入:测定云杉、冷杉各器官(叶、小枝、茎、根系)生物量,元素分析仪分析钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)以及氮(N)、磷(P)、硫(S)浓度。本研究未测定在林木中含量极少的铁、铝、氯,因为在林木中这些元素含量极少^[4, 19]。通过各部分生物量权重计算出植物单株阳离子和阴离子浓度(g/kg),再通过植株投影面积将离子浓度单位换算成mol/m²,得到不同树种下植物养分吸收相关累积H⁺输入。

2.植物地被物相关累积H⁺输入:测定云杉、冷杉林下指定面积0.3 m×0.3 m收集到的地被物生物量,元素分析仪分析钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)以及氮(N)、磷(P)、硫(S)浓度。通过地被物生物量和收集面积计算出单位面积阳离子、阴离子浓度(g/kg),得到不同树种下植物地被物累积H⁺输入(mol/m²)。

植物养分归还——凋落物生物量和化学特性:分别测定连续5个月(2016年4月—8月)收集到的凋落物生物量,所有凋落物混合后,烘干、磨碎、过筛处理。用元素分析仪分析其木质素、P、K、Ca、Mg、N、C的平均浓度(g/kg)以及C/N、木质素/N、C/P,然后通过因子分析和主成分分析得到能综合反映凋落物化学特性的信息。

1.4 统计分析

所有数据经过Excel 2003整理后,用SPSS 16.0软件完成统计分析,采用Origin 8.5软件绘图。分别对各土层(0—5、5—10、10—20 cm)土壤pH值、养分吸收相关累积H⁺输入、养分归还(地被物)相关累积H⁺输入进行单因素方差分析(One-way ANOVA),比较两树种各土层土壤pH值、物质循环相关累积H⁺输入差异;分别对两树种各器官(根、茎、枝、叶)以及单位面积地被物主要阴、阳离子及其收支、单位质量主要养分浓度及其生物量、凋落物生物量和化学特性进行单因素方差分析(One-way ANOVA),采用Duncan法判断同一树种不同器官之间以及两树种之间是否有显著差异,当方差不齐时,则将数据进行对数或平方根转化后采用Duncan法进行比较。

考虑到凋落物各化学特性之间的相关性,为简单而综合地反映凋落物化学特性,使用SPSS 16.0软件对凋落物所有化学特性进行因子分析提取主成份,根据主成分综合评价方法计算出两树种主成分得分,并对表征凋落物化学特性的主成分得分和各土层土壤pH值进行相关分析。

2 结果

2.1 云杉和冷杉土壤pH差异

本研究中云杉和冷杉各土层土壤pH值均存在显著树种差异($P < 0.05$)(图1),表现为冷杉各土层土壤

pH 值均显著低于云杉 ($P < 0.05$)。与试验前土壤 pH 值 (6.8) 比较, 云杉使土壤 pH 值升高 (0.3 ± 0.1), 冷杉使土壤 pH 值降低 (0.6 ± 0.1)。

2.2 云杉、冷杉养分吸收和归还(地被物)相关累积 H^+ 输入

云杉、冷杉各器官、森林地被物生物量: 云杉、冷杉生物量分配方式不同, 通过表 1 可以看出, 云杉和冷杉只有茎和枝的生物量存在显著树种差异 ($P < 0.05$), 云杉显著大于冷杉; 而云杉和冷杉总生物量不具有显著差异。此外, 表 1 中云杉样地地被物产量显著低于冷杉 ($P < 0.05$)。

云杉、冷杉养分吸收相关累积 H^+ 输入: 云杉、冷杉对养分的获取和利用效率不同, 各器官多种养分浓度树种差异显著: 云杉和冷杉根中 Ca、茎中 N、Ca、S 和枝中 N、叶中 Ca、Mg 平均浓度存在显著树种差异 ($P < 0.05$), 云杉 N、Mg、S 平均浓度低于冷杉, Ca 平均浓度高于冷杉。对于同一树种不同器官养分浓度: 云杉和冷杉 N、Ca、S、P 浓度均在叶片中较高, 茎中较低。但通过表 2 和图 2 可以看出, 云杉和冷杉植株仅 Mg 总储量存在显著树种差异 ($P < 0.05$), 表现为冷杉显著大于云杉; 因此植物养分吸收相关累积 H^+ 输入不存在树种差异。

云杉、冷杉养分归还(地被物)相关累积 H^+ 输入: 对于地被物养分浓度, N、Ca、S 平均浓度均存在显著树种差异 ($P < 0.05$), 表现为云杉 N、S 平均浓度显著低于冷杉, Ca 平均浓度显著高于冷杉。而地被物养分总储量除了 Ca 无显著树种差异(表 2), 其余指标(K、Mg、Na、N、P、S)均存在显著树种差异 ($P < 0.05$), 表现为云杉显著低于冷杉; 所以地被物累积 H^+ 输入存在显著树种差异, 表现为云杉显著低于冷杉 ($P < 0.05$)。

2.3 云杉、冷杉养分归还——凋落物生物量和化学特性

凋落物生物量: 通过表 3 可以看出, 4 月凋落物生物量不存在树种差异, 而其他月份(5—8 月)均存在显著树种差异 ($P < 0.05$), 表现为云杉显著小于冷杉。此外, 整个生长季所收集云杉和冷杉凋落物其总量具显著树种差异 ($P < 0.05$), 表现为云杉样地显著小于冷杉。

凋落物化学特性: 通过表 4 可以看出, 除了凋落物木质素、K 平均浓度, 其他化学特性均存在显著树种差异 ($P < 0.05$), 表现为云杉 P、Mg、N、C 平均浓度显著低于冷杉 ($P < 0.05$), Ca、C/N、木质素/N、C/P 显著高于冷杉 ($P < 0.05$)。

云杉和冷杉凋落物化学特性主成分分析提取出两个主成分, 第一主成分方差贡献率为 73.7%, 第二主成分方差贡献率为 15.6%, 两个主成分累积方差贡献率为 89.4%, 能比较全面的反映所有凋落物化学特性。由图 3 结果可知, 第一主成分(PC₁: the first principal component)主要综合 Ca($r = 0.982$)、C/P($r = 0.977$)、C/N($r = 0.967$)、木质素/N($r = 0.944$)、P($r = -0.974$)、N($r = -0.955$)、Mg($r = -0.857$)的信息; 第二主成分(PC₂: the second principal component)主要综合木质素($r = 0.881$)、K($r = 0.774$)、C($r = -0.678$)的信息。

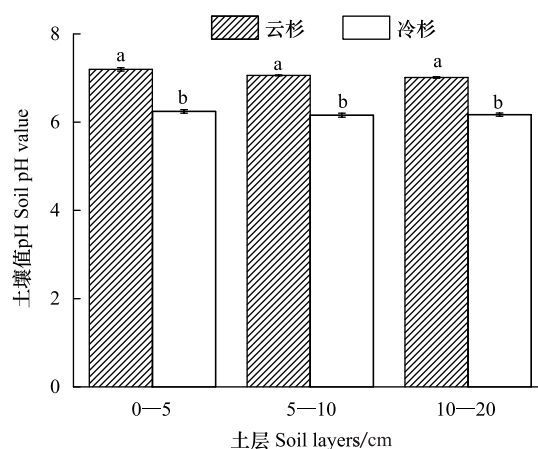


图 1 云杉和冷杉土壤 pH 值(平均值±标准误)

Fig. 1 Soil pH value under *Picea asperata* and *Abies faxoniana* (mean ± SE)

不同小写字母表示两树种之间差异显著 ($P < 0.05$)

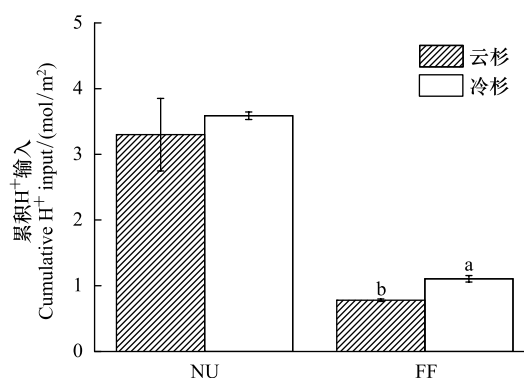


图 2 云杉和冷杉养分吸收和地被物累积 H^+ 输入(平均值±标准误)

Fig. 2 Cumulative H^+ input of *Picea asperata* and *Abies faxoniana* (mean ± SE)

不同小写字母表示两树种之间差异显著 ($P < 0.05$); NU: 养分吸收相关累积 H^+ 输入, cumulative H^+ input through nutrient uptake and storage in biomass; FF: 地被物相关累积 H^+ 输入, cumulative H^+ input through forest floor accumulation

表 1 云杉和冷杉各器官以及地被物主要养分浓度和生物量(平均值±标准误差)

植物器官及地被物 Organ and Forest floor of tree	N/(g/kg)	K/(g/kg)	Na/(g/kg)	Ca/(g/kg)	Mg/(g/kg)	S/(g/kg)	P/(g/kg)	生物量/(kg/株) Biomass
云杉 <i>Picea asperata</i>								
根 Root	14.8±0.06bA	3.46±0.19bA	0.14±0.01abA	12.7±1.29aA	1.63±0.08aA	0.64±0.07aA	1.07±0.05bcA	0.14±0.02aA
茎 Stem	6.66±0.18dB	7.10±0.52aA	0.12±0.01bA	5.94±0.46bA	0.72±0.04cA	0.08±0.01cB	0.93±0.05cA	0.12±0.01aA
枝 Twig	7.73±0.16cB	8.12±0.22aA	0.16±0.01aA	5.68±0.15bA	1.05±0.10bA	0.38±0.06bA	1.74±0.06aA	0.18±0.03aA
叶 Leaf	16.0±0.46aA	4.46±0.27bA	0.07±0.01cA	15.0±0.71aA	0.59±0.04cB	0.73±0.08aA	1.27±0.11bA	0.18±0.03aA
地被物 Forest floor	12.3±0.17B	1.70±0.05A	0.13±0.01A	27.7±0.24A	1.74±0.05A	0.38±0.01B	0.86±0.07A	Total 0.63±0.09A 0.03±0.01B
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>								
根 Root	15.6±0.51aA	4.41±0.33bA	0.15±0.01bA	7.04±0.71bB	1.80±0.09aA	0.68±0.06aA	1.27±0.07bA	0.10±0.01bA
茎 Stem	8.53±0.51bA	6.11±0.83bA	0.11±0.01cA	3.93±0.37cB	0.72±0.05cA	0.20±0.01bA	1.03±0.03cA	0.07±0.01cB
枝 Twig	9.09±0.39bA	7.91±0.16aA	0.19±0.01aA	4.78±0.34cA	1.25±0.07bA	0.38±0.02bA	1.95±0.06aA	0.09±0.01bB
叶 Leaf	15.9±0.60aA	4.58±0.60bA	0.08±0.01cA	12.9±0.30aB	1.31±0.07bA	0.68±0.10aA	1.16±0.09bcA	0.15±0.01aA
地被物 Forest floor	17.5±0.17A	1.79±0.10A	0.14±0.01A	20.8±1.02B	1.84±0.07A	0.68±0.03A	0.95±0.09A	Total 0.41±0.01A 0.04±0.01A

同一列中不同小写字母表示同一树种各器官之间差异显著($P < 0.05$),同一列中不同大写字母表示相同器官两树种之间差异显著($P < 0.05$)

表 2 云杉和冷杉养分吸收和地被物累积过剩阳离子(平均值±标准误差)

植株和地被物 Vegetation and Forest floor of tree	N/(g/kg)	K/(g/kg)	Na/(g/kg)	Ca/(g/kg)	Mg/(g/kg)	S/(g/kg)	P/(g/kg)	阳离子 (Cation) _{Bio/FF} /(mol/m ²)	阴离子 (Anion) _{Bio/FF} /(mol/m ²)	净质子 NPG _{Bio/FF} /(mol/m ²)
云杉 <i>Picea asperata</i>										
植株 Vegetation	25.5±4.14A	12.9±2.26A	0.27±0.05A	22.3±4.04A	2.16±0.25B	1.07±0.21A	2.85±0.43A	3.46±0.58A	0.16±0.03A	3.30±0.55A
地被物 Forest floor	3.99±0.09B	0.55±0.02B	0.04±0.01B	8.99±0.22A	0.57±0.01B	0.12±0.01B	0.28±0.02B	0.80±0.02B	0.02±0.01B	0.78±0.02B
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>										
植株 Vegetation	30.8±0.60A	13.1±0.58A	0.30±0.01A	19.3±0.38A	3.10±0.12A	1.25±0.08A	3.16±0.14A	3.77±0.06A	0.18±0.01A	3.59±0.06A
地被物 Forest floor	8.01±0.47A	0.82±0.08A	0.06±0.01A	9.47±0.23A	0.85±0.08A	0.31±0.03A	0.43±0.04A	1.14±0.05A	0.03±0.01A	1.11±0.05A

同一列不同大写字母表示两树种之间差异显著($P < 0.05$); (Cation)_{Bio/FF}: 养分吸收或地被物相关总阳离子, total cation amount stored in biomass or forest floor; (Anion)_{Bio/FF}: 养分吸收或地被物相关总阴离子, total anion amount stored in biomass or forest floor; NPG_{Bio/FF}: 养分吸收或地被物净质子生成, net proton generation by cation excess uptake by vegetation or forest floor

根据因子分析提取出的两个主成份,分别计算出云杉、冷杉凋落物化学特性主成份样本得分(图4)。由图4可以看出,对于云杉和冷杉两树种而言:云杉凋落物化学特性第一主成分(PC₁)得分显著大于冷杉($P<0.05$);云杉和冷杉第二主成分(PC₂)得分不存在树种差异。

表3 云杉和冷杉凋落物生物量(平均值±标准误)
Table 3 Leaf litter mass of *Picea asperata* and *Abies faxoniana* (mean ± SE)

树种 Plant species	4月 April/(g/m ²)	5月 May/(g/m ²)	6月 June/(g/m ²)	7月 July/(g/m ²)	8月 August/(g/m ²)	合计 Total/(g/m ²)
云杉 <i>Picea asperata</i>	32.90±6.16Aa	30.13±1.53Bab	20.26±2.83Bb	23.46±0.44Bab	26.04±3.92Bab	132.80±8.37B
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	47.75±11.65Aa	43.60±4.53Aa	30.82±1.20Aa	36.11±3.39Aa	37.81±1.48Aa	196.08±9.00A

同一行中不同小写字母表示月份之间差异显著($P<0.05$),同一列中不同大写字母表示两树种之间差异显著($P<0.05$)

表4 云杉和冷杉凋落物化学特性(平均值±标准误)
Table 4 Leaf litter quality variables of *Picea asperata* and *Abies faxoniana* (mean ± SE)

树种 Plant species	木质素 Lignin/(g/kg)	P/ (g/kg)	K/ (g/kg)	Ca/ (g/kg)	Mg/ (g/kg)	N/ (g/kg)	C/ (g/kg)	C/N	木质素/N Lignin/N	C/P
云杉 <i>Picea asperata</i>	181±1.22A	0.93±0.04B	2.11±0.11A	26.2±0.72A	1.28±0.05B	9.80±0.03B	474±5.53B	48.4±0.58A	18.5±0.15A	513±25.6A
冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	180±0.68A	1.34±0.06A	2.06±0.12A	18.5±0.42B	1.49±0.06A	15.7±0.09A	490±0.77A	31.3±0.20B	11.5±0.06B	367±14.8B

同一列中不同大写字母表示树种间差异显著($P<0.05$)

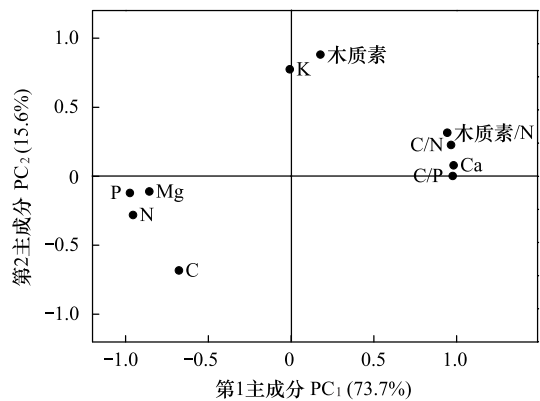


图3 云杉和冷杉凋落物化学特性主成分荷载
Fig. 3 Rotating components of PCA for leaf litter quality variables of *Picea asperata* and *Abies faxoniana*

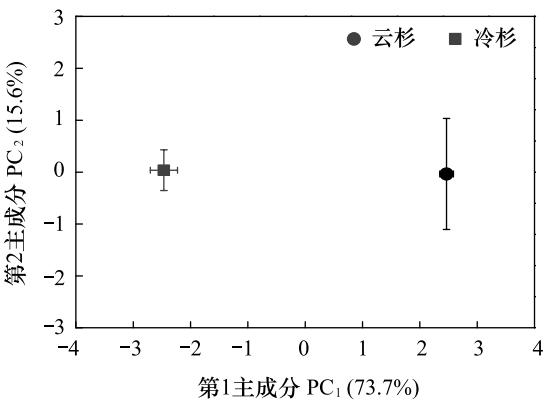


图4 云杉和冷杉凋落物化学特性主成分样本得分(平均值±标准误)
Fig. 4 PCA scores for leaf litter quality on PC₁ and PC₂ of *Picea asperata* and *Abies faxoniana* (mean ± SE)

2.4 云杉和冷杉土壤 pH 与植物养分循环的相关性

相关分析表明,土壤 pH 值与云杉、冷杉养分吸收相关累积 H⁺输入与各土层(0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm)均无显著相关性。两树种各土层土壤 pH 值与其地被物累积 H⁺输入呈显著负相关($P<0.01$)(图5A)。各土层土壤 pH 值与云杉、冷杉凋落物化学特性第一主成分(PC₁)得分均呈极显著正相关($P<0.01$),而与第二主成分(PC₂)得分无显著相关性;说明土壤 pH 值与凋落物 Ca、C/P、C/N、木质素/N、P、N、Mg 关系密切(图5B)。

据表5可得,对于云杉和冷杉两树种而言,各土层土壤 pH 值与凋落物 P、Ca、N、C/N、木质素/N、C/P 存在显著相关性($P<0.05$);与 Ca、C/N、木质素/N、C/P 呈显著正相关($P<0.05$),与 P、N 呈显著负相关($P<0.05$)。各土层土壤 pH 值与凋落物 Mg、C 平均浓度关系不一;10—20 cm 土层土壤 pH 值与凋落物中 Mg 呈显著负相关($P<0.05$),0—5 cm、5—10 cm 土层土壤 pH 值与凋落物中 Mg 无显著相关性;5—10 cm 土层土壤 pH

值与凋落物中 C 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 0—5 cm、10—20 cm 土层土壤 pH 值与凋落物中 C 无显著相关关系。

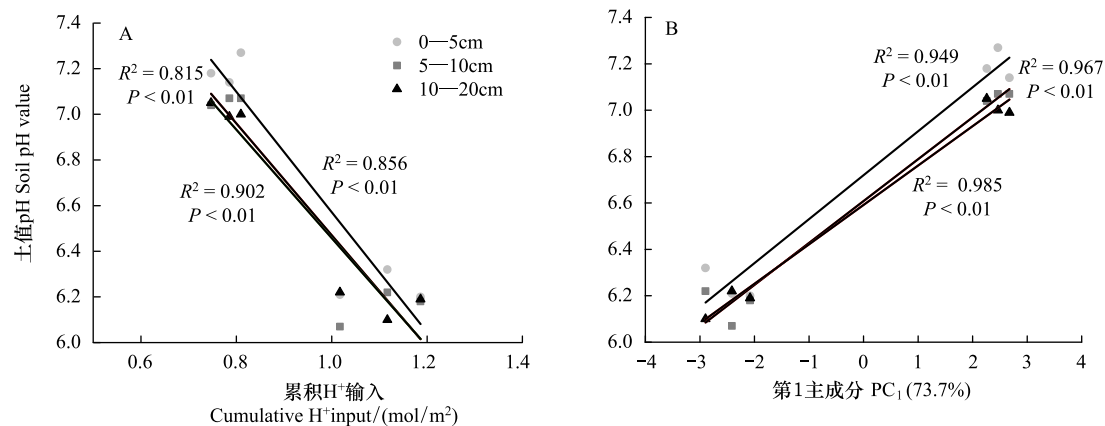


图 5 云杉和冷杉地被物累积 H^+ 输入、凋落物化学特性第一主成分样本得分与各土层土壤 pH 值的关系

Fig.5 Relationship between cumulative H^+ input through forest floor accumulation, PCA scores for leaf litter quality on PC_1 and soil pH value

表 5 云杉和冷杉凋落物化学特性与各土层土壤 pH 值的相关性分析

Table 5 Correlations between soil pH value and leaf litter quality variables of *Picea asperata* and *Abies faxoniana*

	土层 Soil layer	木质素 Lignin	P	K	Ca	Mg	N	C	C/N	木质素/N Lignin/N	C/P
土壤 pH 值	0—5 cm	0.440	-0.939 *	0.070	0.988 *	-0.767	-0.990 *	-0.808	0.990 *	0.989 *	0.932 *
Soil pH value of	5—10 cm	0.461	-0.938 *	0.099	0.981 *	-0.801	-0.991 *	-0.841 *	0.989 *	0.993 *	0.917 *
	10—20 cm	0.388	-0.961 *	0.208	0.970 *	-0.858 *	-0.998 *	-0.802	0.998 *	0.994 *	0.936 *

表中数据为皮尔逊相关系数;星号表示相关性显著 (*, $P < 0.05$)

3 讨论

研究证实植物能影响土壤特性,且在影响土壤化学以及营养循环方面起着非常主动与活跃的作用,进而使土壤表现出不同理化性质,比如土壤 pH 值^[20-21]。Reich^[20]等人的研究中,同一样地 14 种不同树种土壤有机层 pH 值范围为从落叶松的 3.9 至椴树的 6.1,矿质层 pH 值范围为从云杉的 4.0 至樟子松的 5.0;而 Yahya^[22]等的研究中也表明不同树种间土壤 pH 值差异显著。本研究中,云杉和冷杉样地各土层(0—5 cm、5—10 cm、10—20 cm)土壤 pH 值均表现出显著树种差异(图 1),表明云杉和冷杉两树种确实通过某些机制影响土壤 pH 值。

植物对土壤酸性影响的研究广泛,研究表明植物有四种可能降低土壤 pH 的过程,即提高土壤溶液中阴离子数量、酸类物质数量和酸性物质的质子化,以及增大土壤酸性强度^[9]。除了植物养分吸收过程中的生物酸化^[5],凋落物分解以及森林地被物的形成也被证实和土壤酸性密切相关^[4]。本研究发现土壤 pH 值与两树种的养分吸收相关累积 H^+ 输入无显著相关性,这与 De Schrijver^[4]等人和 Mueller^[18]等的研究结果类似,说明土壤酸性和植株吸收阳离子过程中向土壤中输入的 H^+ 累积量相关性很小。本研究比较云杉和冷杉两树种不同器官中各离子平均浓度(表 1)和各离子累积总量(表 2),发现两树种间根 Ca、茎 N、Ca、S 和枝中 N、叶 Ca、Mg 平均浓度均存在显著差异,说明云杉、冷杉对养分的获取和利用效率不同;但植株各离子累积总量只有 Mg 差异显著,其他离子平均浓度的显著差异性均被树种单位面积生物量(云杉和冷杉平均冠幅分别为 60 cm 和 48 cm)所抵消,故云杉、冷杉养分吸收相关累积 H^+ 输入在两个树种间不表现出显著差异。

土壤 pH 值与云杉和冷杉地被物累积 H^+ 输入呈显著负相关(图 5 A),说明冷杉样地土壤 pH 值显著低于

云杉,与冷杉更多的地被物累积 H^+ 输入有关。研究表明地被物之所以会引起土壤 pH 值降低是因为地被物的形成主要是由凋落物缓慢分解而引起的,而地被物的形成一方面使凋落物中阳离子滞留,减缓对土壤酸性物质的缓冲作用;另一方面凋落物缓慢分解过程中会产生很多有机酸^[4, 6-7]。本研究比较云杉和冷杉地被物中各离子平均浓度(表 1)和各离子累积总量(表 2),发现冷杉样地地被物累积 H^+ 输入显著高于云杉,这主要与冷杉样地地被物单位面积质量显著高于云杉有关。即与地被物产量密切相关,而森林地被物产量一方面与凋落物凋落速度相关,另一方面反映凋落物不同的分解速率。

本研究中,4—8 月所收集云杉和冷杉凋落物其总量在两树种间具显著差异,表现为云杉样地显著小于冷杉,与森林地被物产量在两树种间差异的结果一致,说明冷杉较云杉产生更多凋落物。关于凋落物化学特性,除了木质素和 K 离子平均浓度,其他化学指标均表现出显著树种间差异($P<0.05$);云杉样地凋落物中 P、Mg、N、C 平均浓度显著低于冷杉样地($P<0.05$),而 Ca、C/N、木质素/N、C/P 显著高于冷杉样地($P<0.05$)。凋落物性质主要包括物理性质和化学性质,目前对凋落物化学性质研究较多,化学性质称之为“基质质量”,定义为凋落物的相对可分解性,其中包括 N、C、P 等易分解组分和纤维素、木质素等难分解有机组分,并常用 C/N、木质素/N、C/P 等来预测凋落物分解速率^[23-24],所以云杉和冷杉凋落物分解过程必定存在显著差异性。

鉴于凋落物化学特性指标太多,采用降维方式对其进行主成分分析,以便更综合地对云杉和冷杉凋落物化学特性进行比较分析。对于提取出的两个主成分还需以各自的贡献率为权数进行线性加权求和来综合评价样本^[25]。结果表明土壤 pH 值与凋落物化学特性因子分析提取出的第一主成分 PC_1 得分呈显著正相关(图 5 B),且通过分析各土层土壤 pH 值与凋落物化学特性的相关性(表 5),进一步说明云杉样地土壤 pH 值显著高于冷杉样地,是与云杉较冷杉凋落物中木质素/N、C/N、C/P 以及 Ca 浓度更大,而 N、P 浓度更小有关。葛晓改等^[26]在不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系的研究结果指出土壤 pH 值与凋落物木质素/N、C/N 呈显著正相关,与 N 平均浓度呈显著负相关,与本研究结果一致。但是凋落物化学性质对凋落物分解的影响表现并不一致^[27-33],因此本研究中依据 C/N 来预测凋落物分解速率并不合理,但可以肯定的是本研究中土壤 pH 值和木质素/N、C/N、C/P 呈显著正相关。此外本研究中土壤 pH 值和凋落物中 Ca 平均浓度呈显著正相关,与 Hobbie^[27]等人以及 De Schrijver^[4]等的研究结果一致,指出凋落物中 Ca 含量越高,一方面土壤中对凋落物分解起重要作用的蚯蚓生物量越大,进而加速凋落物分解过程,减少地被物的形成;另一方面凋落物中高含量的 Ca 离子随分解过程归还至土壤中使土壤 pH 值变大。这与上述研究中云杉地被物累积 H^+ 输入显著低于冷杉样地且土壤 pH 值显著高于冷杉样地结果一致。此外本研究中土壤 pH 值与凋落物化学特性因子分析提取出的第二主成分 PC_2 得分无显著相关性,即本研究中土壤 pH 值与凋落物木质素、K、C 平均浓度无明确相关性。

本研究中云杉和冷杉两树种间叶 Ca、Mg 平均浓度存在显著差异,凋落物中除了 Ca、Mg 平均浓度,N、P 平均浓度也存在显著差异。凋落物中 N、P 含量可以反映植物叶片养分归还率,在森林植物的研究过程中,营养转移主要指枝叶枯死脱落前,养分转移到其他生活器官内的过程,特别是叶子脱落前的养分转移^[34]。研究表明成熟叶脱落前养分转移主要利于减少植物对外界营养的依赖,且被证明是植物保持营养内稳态的最重要策略之一^[35-38]。前人对于植物叶片中营养转移的研究主要集中在 N 和 P 上,少数涉及其他元素,且表明大约 50% 的养分(主要是 N 和 P)都会在叶成熟期间发生回流转移^[39]。据统计,只有极少发现不转移氮磷营养的情况^[34]。Killingbeck^[40]在 1993 年的研究中结果表明香蕨木叶片 N、P 平均转移率分别为 11% 和 53%;Chen^[41]等在 2016 的研究中也表明 N 和 P 平均转移率达 61.20% 和 48.11%。本研究中云杉叶片 N、P 平均转移率分别为 38.78% 和 25.36%,但冷杉叶片 N、P 均未发生转移,因此两树种凋落物中 N、P 平均浓度表现显著差异。对于本研究中云杉和冷杉叶片中 N、P 转移的不同表现,具体机制尚不明确,还有待进一步研究。

4 结论

综上所述,云杉各土层土壤 pH 值均显著高于冷杉,且云杉使土壤 pH 值升高,冷杉使土壤 pH 值降低。两

树种土壤 pH 值差异主要和地被物累积 H^+ 输入以及凋落物中 Ca、P、N 平均浓度以及 C/P、C/N、木质素/N 有关。本研究中被物累积 H^+ 输入表现出显著树种差异, 主要与地被物单位面积质量密切相关, 冷杉样地凋落物凋落速度显著大于云杉, 使冷杉样地凋落物生物量显著大于云杉, 进而地被物单位面积质量 (kg/m^2) 显著大于云杉。冷杉和云杉凋落物养分浓度差异显著, N、P 平均浓度树种差异是因为两树种具有不同养分归还率, C/P、C/N、木质素/N 以及 Ca 平均浓度与凋落物分解速率密切相关, 鉴于 C/P、C/N、木质素/N 与凋落物分解的相关性不固定, 所以本研究中根据凋落物中 Ca 平均浓度推测冷杉凋落物中 Ca 平均浓度显著小于云杉, 从而冷杉凋落物分解速率显著小于云杉, 进一步引起凋落物滞留形成更多森林地被物。而且云杉样地土壤因凋落物中高含量的 Ca 归还也会引起 pH 值高于冷杉。需要说明的是土壤 pH 值受到多种因素的影响, 特别是植物根系分泌物、土壤微生物群落的活动以及环境气候条件等, 并表现出明显季节动态^[42], 而本研究着重探究了生长季植物养分吸收及归还等和土壤 pH 的相关性, 观测时间较短, 需要进一步长期的观察, 并探究植物根系、微生物群落以及凋落物分解过程等对土壤 pH 的影响, 以得出更加全面的研究结论。

参考文献 (References):

- [1] Kochian L V, Piñeros M A, Liu J P, Magalhaes J V. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annual Review of Plant Biology*, 2015, 66: 571-598.
- [2] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 171-178.
- [3] Asplund J, Ohlson M, Gauslaa Y. Tree species shape the elemental composition in the lichen *Hypogymnia physodes* transplanted to pairs of spruce and beech trunks. *Fungal Ecology*, 2015, 16: 1-5.
- [4] de Schrijver A, de Frenne P, Staelens J, Verstraeten G, Muys B, Vesterdal L, Wuys K, van Nevel L, Schelfhout S, de Neve S, Verheyen K. Tree species traits cause divergence in soil acidification during four decades of postagricultural forest development. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 1127-1140.
- [5] Iwald J, Löfgren S, Stendahl J, Karlun E. Acidifying effect of removal of tree stumps and logging residues as compared to atmospheric deposition. *Forest Ecology and Management*, 2013, 290: 49-58.
- [6] De Vries W, Breeuwsma A. Relative importance of natural and anthropogenic proton sources in soils in the Netherlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1986, 28(1/2): 173-184.
- [7] 杜春艳, 曾光明, 张龚, 苏小康, 王玲玲, 黄璐, 蒋益民. 韶山针阔叶混交林凋落物层的淋溶及缓冲作用. *生态学报*, 2008, 28(2): 508-516.
- [8] Compton J E, Church M R, Larned S T, Hogsett W E. Nitrogen export from forested watersheds in the Oregon Coast Range: the role of N_2 -fixing red alder. *Ecosystems*, 2003, 6(8): 773-785.
- [9] Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 2002, 59(3): 233-253.
- [10] 刘庆. 亚高山针叶林生态学研究. 成都: 四川大学出版社, 2002.
- [11] 吴秀臣, 孙辉, 杨万勤, 王开运. 川西亚高山红桦幼苗土壤蔗糖酶活性对温度和大气二氧化碳浓度升高的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1225-1230.
- [12] Zhao C Z, Zhu L Y, Liang J, Yin H J, Yin C Y, Li D D, Zhang N N, Liu Q. Effects of experimental warming and nitrogen fertilization on soil microbial communities and processes of two subalpine coniferous species in Eastern Tibetan Plateau, China. *Plant and Soil*, 2014, 382(1/2): 189-201.
- [13] Sun D D, Li Y J, Zhao W Q, Zhang Z L, Li D D, Zhao C Z, Liu Q. Effects of experimental warming on soil microbial communities in two contrasting subalpine forest ecosystems, eastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(8): 1442-1452.
- [14] Wan S, Luo Y, Wallace L L. Changes in microclimate induced by experimental warming and clipping in tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 754-768.
- [15] Yin C Y, Pu X X, Xiao Q Y, Zhao C Z, Liu Q. Effects of night warming on spruce root around non-growing season vary with branch order and month. *Plant and Soil*, 2014, 380(1/2): 249-263.
- [16] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 刘兆礼. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [17] Fujii K, Funakawa S, Hayakawa C, Kosaki T. Contribution of different proton sources to pedogenetic soil acidification in forested ecosystems in Japan. *Geoderma*, 2008, 144(3/4): 478-490.

- [18] Mueller K E, Eissenstat D M, Hobbie S E, Oleksyn J, Jagodzinski A M, Reich P B, Chadwick O A, Chorover J. Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in mineral soils at a common garden experiment. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 601-614.
- [19] Nilsson S I, Miller H G, Miller J D. Forest growth as a possible cause of soil and water acidification: an examination of the concepts. *Oikos*, 1982, 39(1): 40-49.
- [20] Reich P B, Oleksyn J, Modrzynski J, Mrozinski P, Hobbie S E, Eissenstat D M, Chorover J, Chadwick O A, Hale C M, Tjoelker M G. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species. *Ecology Letters*, 2005, 8(8): 811-818.
- [21] Tanikawa T, Sobue A, Hirano Y. Acidification processes in soils with different acid buffering capacity in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* forests over two decades. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334: 284-292.
- [22] Kooch Y, Rostayee F, Hosseini S M. Effects of tree species on topsoil properties and nitrogen cycling in natural forest and tree plantations of northern Iran. *CATENA*, 2016, 144: 65-73.
- [23] 王相娥, 薛立, 谢腾芳. 凋落物分解研究综述. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1473-1478.
- [24] 宋飘, 张乃莉, 马克平, 郭继勋. 全球气候变暖对凋落物分解的影响. *生态学报*, 2014, 34(6): 1327-1339.
- [25] 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 1-242.
- [26] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862.
- [27] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytowski R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, 87(9): 2288-2297.
- [28] Day T A, Ruhland C T, Xiong F S. Warming increases aboveground plant biomass and C stocks in vascular-plant-dominated Antarctic tundra. *Global Change Biology*, 2008, 14(8): 1827-1843.
- [29] Berg B, McLaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. New York: Springer-Verlag, 2008: 286-286.
- [30] Waldrop M P, Zak D R. Response of oxidative enzyme activities to nitrogen deposition affects soil concentrations of dissolved organic carbon. *Ecosystems*, 2006, 9(6): 921-933.
- [31] Micks P, Downs M R, Magill A H, Nadelhoffer K J, Aber J D. Decomposing litter as a sink for ^{15}N -enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 71-87.
- [32] 樊后保, 刘文飞, 杨跃霖, 张子文, 曹汉洋, 徐雷. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 8-13.
- [33] Miatto R C, Batalha M A. Leaf chemistry of woody species in the Brazilian cerrado and seasonal forest: response to soil and taxonomy and effects on decomposition rates. *Plant Ecology*, 2016, 217(12): 1467-1479.
- [34] 李志安, 王伯荪, 林永标, 曾友特. 植物营养转移研究进展. *武汉植物学研究*, 2000, 18(3): 229-236.
- [35] Zhang L H, Ye G F, Lin Y M, Zhou H C, Zeng Q. Seasonal changes in tannin and nitrogen contents of *Casuarina equisetifolia* branchlets. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2009, 10(2): 103-111.
- [36] Lin Y M, Liu X W, Zhang H, Fan H Q, Lin G H. Nutrient conservation strategies of a mangrove species *Rhizophora stylosa* under nutrient limitation. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 469-479.
- [37] Ye G F, Zhang S J, Zhang L H, Lin Y M, Wei S D, Liao M M, Lin G H. Age-related changes in nutrient resorption patterns and tannin concentration of *Casuarina equisetifolia* plantations. *Journal of Tropical Forest Science*, 2012, 24(4): 546-556.
- [38] Wei S D, Liu X W, Zhang L H, Chen H, Zhang H, Zhou H C, Lin Y M. Seasonal changes of nutrient levels and nutrient resorption in *Avicennia marina* leaves in Yingluo Bay, China. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 2015, 77(3): 237-242.
- [39] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1-67.
- [40] Killingbeck K T. Inefficient nitrogen resorption in genets of the actinorhizal nitrogen fixing shrub *Comptonia peregrina*: physiological ineptitude or evolutionary tradeoff? *Oecologia*, 1993, 94(4): 542-549.
- [41] Chen H, Xu B H, Wei S D, Zhang L H, Zhou H C, Lin Y M. Nutrient resorption and phenolics concentration associated with leaf senescence of the subtropical mangrove *Aegiceras corniculatum*: implications for nutrient conservation. *Forests*, 2016, 7(11): 290.
- [42] 刘艳, 周国逸, 褚国伟, 刘菊秀, 张倩媚. 鼎湖山针阔叶混交林土壤酸度与土壤养分的季节动态. *生态环境*, 2005, 14(1): 81-85.