

九寨沟自然保护区不同森林类型土壤养分特征*

徐波^{1,2} 朱忠福³ 李金洋¹ 吴彦¹ 邓贵平³ 吴宁¹ 石福孙^{1**}

¹中国科学院成都生物研究所 成都 610041

²阿坝师范学院 阿坝 623002

³九寨沟自然保护区管理局 阿坝 623402

摘要 土壤性状与植被演替间存在复杂的相互关系,探究不同森林类型间土壤养分差异有助于了解植被演变过程中地上与地下的关系以及生态系统养分循环机制.本文研究了九寨沟自然保护区内黄果冷杉(*Abies ernestii*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、青杆-辽东栎(*Picea wilsonii-Quercus wutaishanica*)混交林和红桦(*Betula albo-sinensis*)林4种典型森林类型表层土壤养分特征及其季节动态.结果显示:1)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、可溶性有机碳(DOC)、水解氮(HN)和有效磷(AP)在不同林型间均存在极显著差异($P < 0.01$),大小关系为红桦林>青杆-辽东栎混交林>油松林>黄果冷杉林.2)SOC与TN和TP间存在极显著正相关关系($P < 0.01$, $r \geq 0.88$),而土壤pH与SOC、TN和TP间存在极显著负相关关系($P < 0.01$, $r \leq -0.83$).3)土壤养分存在极显著的季节差异,且与林型间存在显著的交互作用($P < 0.01$).红桦林SOC和TN在10月最大,而其他3种林型在12月最大;可溶性养分在各林型中均在10月达到最大值.本研究表明,红桦林土壤肥力较其他3种林型好,但存在秋冬季节可溶性养分流失的风险;青杆-辽东栎混交林具有较好的养分循环效率和土壤肥力保持能力;森林枯枝落叶层在土壤养分循环过程中具有重要意义.(图3 表4 参30)

关键词 土壤养分; 季节动态; 养分循环; 土壤pH; 森林类型

CLC S714.2 (271)

Soil nutrient characteristics in different forest types at the Jiuzhaigou National Nature Reserve, China*

XU Bo^{1,2}, ZHU Zhongfu³, LI Jinyang¹, WU Yan¹, DENG Guiping³, WU Ning¹ & SHI Fusun^{1**}

¹Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

²Aba Teachers University, Aba 623002, China

³Jiuzhaigou National Nature Reserve Administration, Aba 623402, China

Abstract An intricate relationship exists between soil property and vegetation succession. Exploring the differences of soil nutrients between different forest types will contribute to understanding the relationship between the above- and underground and the nutrient cycling of ecosystems during vegetation succession. Our objective was to compare the differences of soil nutrients between different forest types, and study the seasonal dynamics of soil nutrients in the Jiuzhaigou National Nature Reserve, China. Soil nutrients including soil organic C (SOC), total N (TN), total P (TP), dissolved organic C (DOC), hydrolyzable N (HN), available P (AP) and soil pH were investigated in the four typical forests, i.e. *Abies ernestii* forest (AF), *Pinus tabulaeformis* forest (PF), *Picea wilsonii-Quercus wutaishanica* mixed forest (P-QF) and *Betula albo-sinensis* forest (BF). The results showed highly significant difference in SOC, TN, TP, DOC, HN and AP ($P < 0.01$) among the four forests, but similar soil nutrient constitution in the order of BF > P-QF > PF > AF. The SOC showed highly significant positive correlation with TN and TP ($P < 0.01$, $r \geq 0.88$), and soil pH had highly significant negative correlation with SOC, TN and TP ($P < 0.01$, $r \leq -0.83$). Furthermore, highly significant ($P < 0.01$) seasonal dynamics of soil nutrients were observed in the four forests. SOC and TN were the highest in October in the BF, but in December in the P-QF, PF and AF; the maximums of dissolved nutrients were found in October. The results indicate that soil fertility in BF is better than other three forests, and P-QF has better nutrient cycling efficiency and capacity to maintain soil fertility. The forest litter layer plays a crucial role in the process of soil nutrient cycling.

Keywords soil nutrient; seasonal dynamic; nutrient cycling; soil pH; forest type

收稿日期 Received: 2016-03-11 接受日期 Accepted: 2016-04-08

*国际科技合作专项(2013DFR90670)和四川省科技计划项目(2014HH0056)资助 Supported by the National International Technology Cooperation Project of China (2013DFR90670) and the Science and Technology Plan Projects in Sichuan Province of China (2014HH0056)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: shifs@cib.ac.cn)

土壤作为森林生态系统的重要组成部分,为植物生长和繁殖提供必需的养分物质^[1-3],也为生态系统中诸多生态过程(如养分循环和凋落物分解等)提供载体^[4-5]。森林土壤养分状况受气候条件、土壤类型和植被类型等因素的综合影响^[6-8]。土壤养分是土壤肥力的重要量化指标^[9],对植被的物种组成和结构变化有着至关重要的作用^[10],并直接影响着生态系统的生产力水平^[6, 11-12]。然而,植被演替又将反过来影响土壤性状和发育^[7, 13],因为伴随植被演替,植物凋落物和根系分泌物等发生的改变将直接影响着投入土壤的有机质数量^[14]。有机质在土壤养分循环过程中起着关键作用^[4, 8],主要通过影响微生物活性来影响土壤的代谢过程^[2, 12]。土壤和植被之间存在着复杂的相互关系,而两者之间的相互影响过程和机制尚不十分清楚,土壤与植被间的互动关系近年来成为土壤生态研究的热点问题之一^[4]。因此,针对不同森林类型开展土壤养分及其动态研究将有助于了解森林生态系统的土壤养分循环和养分供应状况。

九寨沟作为我国重要的自然保护区,具有丰富的森林植被资源,总面积达248 km²,是长江流域上游一个重要的水源涵养地^[15]。目前,仅有少数学者对九寨沟森林的土壤类型及其物理性质进行了研究^[16-17],而探讨不同森林类型土壤养分状况及其动态的研究还未见报道。本文选择了九寨沟自然保护区内4种典型的森林植被类型作为研究对象,探讨不同森林类型表层土壤养分特征及其季节动态,旨在解决以下科学问题:1)不同森林类型间各土壤养分存在何种差异?2)各土壤养分间是否存在相关关系?3)不同森林类型土壤养分存在怎样的季节动态特征?本研究旨在为探究九寨沟自然保护区不同森林植被类型的土壤养分循环提供一定的科学依据,并为保护区内森林资源的可持续经营与管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

九寨沟自然保护区位于青藏高原东缘的岷山山系南段(100°30'-104°27' E, 30°35'-34°19' N, 海拔1 996-4 764 m),属川西高原气候区。该区域受高原季风和热带海洋季风影响,年平均气温7.3 °C,年均降水量622 mm,且降水集中在5-9月;地势南高北低,相对高差较大,分为高山山地、高山坡地和高山河谷地貌;土壤以半湿润、半干旱暖温带基带山地淋溶褐土为代表性土类,此外随海拔增加还分布着山地棕壤和山地暗棕壤等。保护区内植被分布丰富,包括寒温性针叶树如红杉(*Larix potaninii*)和黄果冷杉(*Abies ernestii*),温性针叶树如油松(*Pinus tabulaeformis*)和华山松(*Pinus*

armandii),落叶阔叶树如红桦(*Betula albo-sinensis*)和辽东栎(*Quercus wutaishanica*)及落叶阔叶灌木如高山柳(*Salix cupularis*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等^[15]。

1.2 土样采集和处理

在保护区内选择黄果冷杉(*A. ernestii*)林、油松(*P. tabulaeformis*)林、青杆-辽东栎(*Picea wilsonii* - *Q. wutaishanica*)混交林和红桦(*B. albo-sinensis*)林4种典型的森林植被类型作为研究对象,样地概括详见表1,且样地分布区域的土壤类型均为山地棕壤^[16]。分别于2014年10月25日和12月25日及2015年2月25日、4月25日、6月25日和8月25日对4种森林类型的表层土壤(0-20 cm)进行6次土样采集,每次随机选择5个1 m × 1 m样点(间隔2 m)进行土壤样品采集,每一林型6次共采集土样30份。将采集的土样风干后,去除其中较大的砾石、植物残体和杂物等,装入无菌塑料袋中带回实验室进行养分指标测定。

1.3 土壤养分测定

将处理后的风干土壤过直径2 mm筛,然后根据土壤理化分析步骤测定各土壤养分指标。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮(Total nitrogen, TN)采用半微量开氏法测定;全磷(Total Phosphorus, TP)采用硫酸-高氯酸消煮法测定;可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、水解氮(Hydrolyzable nitrogen, HN)和有效磷(Available phosphate, AP)分别采用重铬酸钾氧化法、碱解扩散法和碳酸氢钠法测定;土壤pH采用酸度计测定^[18]。

1.4 统计分析

本文采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)探讨森林类型和月份对土壤养分(SOC、TN、TP、DOC、HN、AP)和pH的影响,并分析两者间的交互作用。然后,采用Duncan法对不同森林类型进行多重比较。采用Pearson相关分析法分析各土壤养分和pH之间的相关关系。通过因子分析法对不同森林类型各土壤养分指标和土壤pH进行公因子分析。以上统计分析使用SAS 9.2统计软件进行处理,多重比较显著性水平 $\alpha = 0.01$ ^[19]。

2 结果与分析

2.1 不同森林类型土壤养分特征

如表2所示,不同森林类型间各土壤养分含量和pH值均存在极显著差异($P < 0.01$)。不同森林类型土壤养分差异的多重比较结果表明,红桦林SOC、TN、TP、DOC、HN和AP均极显著($P < 0.01$)高于其他3种林型,分别为(241.93 ± 7.98) g/kg、(17.15 ± 0.58) g/kg、(0.93 ± 0.03) g/kg、(1391.05 ±

表1 样地信息

Table 1 Site information

森林类型 Forest type	发育阶段 Developmental stage	位置 Location	经纬度 Longitude and latitude	坡向 Aspect	坡度 Slope ($\alpha/^\circ$)	海拔 Elevation (h/m)
黄果冷杉林 <i>Abies ernestii</i> forest	成熟林 Mature forest	卧龙海 Wolong lake	103°54'4" E, 33°12'6" N	西北 NW	25	2266
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	成熟林 Mature forest	公主海 Gongzhu lake	103°53'40" E, 33°11'52" N	西南 SW	20	2314
青杆-辽东栎混交林 <i>Picea wilsonii</i> - <i>Quercus wutaishanica</i> mixed forest	中龄林 Middle-aged forest	树正群海 Shuzheng lakes	103°53'56" E, 33°11'59" N	西北 NW	20	2272
红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest	中龄林 Middle-aged forest	诺日朗 Nuorilang	103°54'28" E, 33°9'43" N	西南 SW	15	2398

表2 森林类型和月份对土壤养分影响的方差分析

Table 2 Two-way analysis of variance for the effect of forest type and month on soil nutrients

土壤养分 Soil nutrient	森林类型 Forest type			月份 Month			森林类型×月份 Forest type × month		
	d_f	F	P	d_f	F	P	d_f	F	P
SOC	3	1229.58	< 0.01	5	20.12	< 0.01	15	15.67	< 0.01
TN	3	917.89	< 0.01	5	1463.81	< 0.01	15	219.37	< 0.01
TP	3	1430.36	< 0.01	5	15.17	< 0.01	15	13.79	< 0.01
DOC	3	863.21	< 0.01	5	458.71	< 0.01	15	65.33	< 0.01
HN	3	1485.78	< 0.01	5	26.44	< 0.01	15	13.17	< 0.01
AP	3	659.49	< 0.01	5	290.96	< 0.01	15	89.33	< 0.01
pH	3	369.53	< 0.01	5	25.68	< 0.01	15	2.87	0.00

SOC: 土壤有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; DOC: 可溶性有机碳; HN: 水解氮; AP: 有效磷.

SOC: soil organic C; TN: total N; TP: total P; DOC: dissolved organic C; HN: hydrolyzable N; AP: available P.

291.24) mg/kg、(212.97 ± 26.45) mg/kg和 (12.88 ± 2.45) mg/kg; 青杆-辽东栎混交林各土壤养分均略高于油松林, 但两者间差异不显著 ($P > 0.05$), 而黄果冷杉林各土壤养分含量均最低, 分别为 (47.13 ± 1.47) g/kg、(2.97 ± 0.07) g/kg、(0.17 ± 0.02) g/kg、(430.01 ± 58.24) mg/kg、(64.47 ± 6.60) mg/kg和 (7.97 ± 0.04) mg/kg (图1). 土壤pH在各森林类型间比较结果为黄果冷杉林 (7.97 ± 0.04) > 油松林 (7.66 ± 0.07) > 青杆-辽东栎混交林 (7.23 ± 0.06) > 红桦林 (6.58 ± 0.05), 且差异极显著 ($P < 0.01$; 图1G).

2.2 土壤养分季节动态

各土壤养分含量和pH值均表现出极显著的季节差异 ($P < 0.01$), 且与森林类型间存在极显著的交互作用 ($P < 0.01$;

表2). 如图2所示, 红桦林土壤TN和SOC在10月达到最大值, 然后逐渐减小, 并从4月开始增加; 青杆-辽东栎混交林、油松林和黄果冷杉林土壤TN和SOC在12月达到最大值, 而后变化趋势与红桦林相似. 4种森林类型土壤TP均在10月达到最大值, 但全年季节变化规律不明显. 此外, 各林型土壤DOC、HN和AP均表现出先减小后增加的趋势, 且在10月达到最大值. 土壤pH在冬季 (12月或2月) 达到最小值. 总体来讲, 红桦林各土壤养分的季节波动较其他3种森林类型更明显.

2.3 土壤养分间相关关系

如表3所示, 各土壤养分之间均存在极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系, 土壤pH与各土壤养分间存在极显著 ($P < 0.01$)

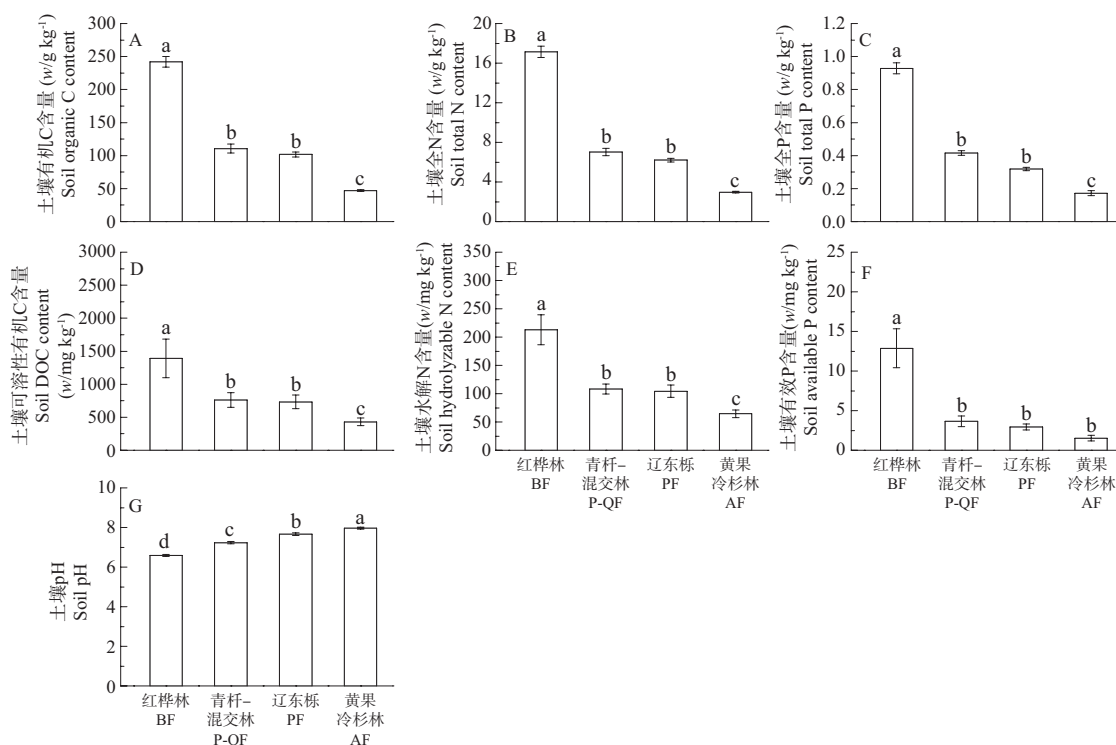


图1 不同森林类型土壤养分特征 (平均值 ± 标准误). 不同小写字母表示同一土壤养分在不同森林类型间差异极显著 ($P < 0.01$).

Fig. 1 Characteristics of soil nutrients in different forest types (mean ± SE). Different lowercase letters denote highly significant differences in the soil nutrient between different forest types ($P < 0.01$). BF: *B. albo-sinensis* forest; P-QF: *P. wilsonii* - *Q. wutaishanica* mixed forest; PF: *P. tabulaeformis* forest; AF: *A. ernestii* forest.

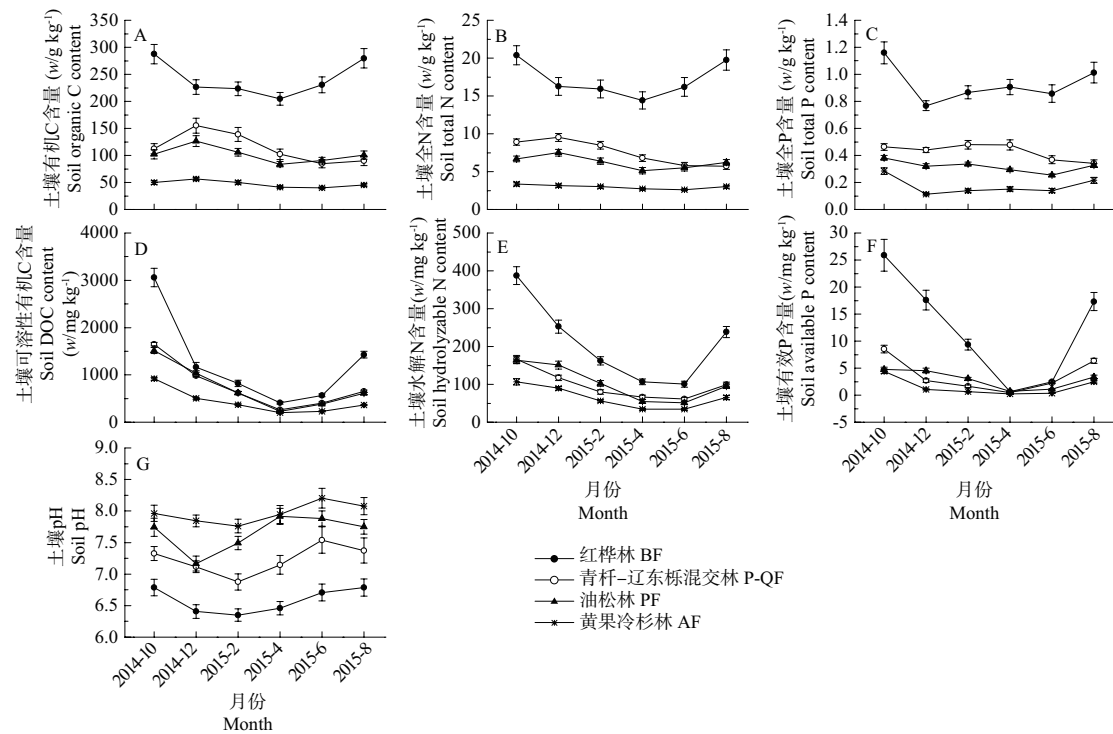


图2 不同森林类型土壤养分的季节动态 (平均值±标准误)。
Fig. 2 Seasonal dynamics of soil nutrients between different forest types (mean ±SE). BF: *B. albo-sinensis* forest; P-QF: *P. wilsonii* - *Q. wutaishanica* mixed forest; PF: *P. tabulaeformis* forest; AF: *A. ernestii* forest.

负相关关系。土壤SOC与TN和TP的相关系数 r 分别为0.99和0.97; TN和TP的 r 值为0.98; DOC与HN和AP的 r 值分别为0.93和0.88; HN和AP的 r 值为0.96, 而土壤pH与SOC、TN和TP的 r 值分别为-0.84、-0.84和-0.83。

表3 不同土壤养分间的Pearson相关关系

Table 3 Pearson correlations between different soil nutrients

	SOC	TN	TP	DOC	HN	AP	pH
SOC	1.00						
TN	0.99**	1.00					
TP	0.97**	0.98**	1.00				
DOC	0.59**	0.58**	0.59**	1.00			
HN	0.77**	0.77**	0.75**	0.93**	1.00		
AP	0.72**	0.74**	0.72**	0.88**	0.96**	1.00	
pH	-0.84**	-0.84**	-0.83**	-0.35**	-0.55**	-0.49**	1.00

** $P < 0.01$. SOC: 土壤有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; DOC: 可溶性有机碳; HN: 水解氮; AP: 有效磷。
** $P < 0.01$. SOC: soil organic C; TN: total N; TP: total P; DOC: dissolved organic C; HN: hydrolyzable N; AP: available P.

2.4 不同森林类型土壤养分因子分析

采用因子分析对不同森林类型各土壤养分和pH进行统计分析, 结果显示, 可选择2个公因子 (表4) 表征各森林类型间的土壤养分状况: 因子1 (占总变异79.36%) 代表土壤总体养分含量状况, 包括SOC、TN和TP; 因子2 (占总变异15.86%) 代表土壤可溶性养分含量状况, 包括DOC、HN和AP. 不同森林类型的公因子分布图 (图3) 表明, 红桦林土壤总体养分和可溶性养分含量均比其他3种森林类型高, 但可溶性养分含量变异较大; 黄果冷杉两者含量均最低, 且变异

较小。

表4 森林土壤养分公因子分析的变量载荷

Table 4 Variable loading of common factors in exploratory factor analysis of forest soil nutrients

公因子 Common factor	SOC	TN	TP	DOC	HN	AP	pH
因子1 Factor 1	0.90	0.91	0.90	0.23	0.43	0.40	-0.79
因子2 Factor 2	0.40	0.40	0.40	0.96	0.88	0.87	-0.15

SOC: 土壤有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; DOC: 可溶性有机碳; HN: 水解氮; AP: 有效磷。
SOC: soil organic C; TN: total N; TP: total P; DOC: dissolved organic C; HN: hydrolyzable N; AP: available P.

3 讨论与结论

本研究探讨了九寨沟自然保护区内4种典型森林植被类型, 即寒温性针叶林 (黄果冷杉林)、温性针叶林 (油松林)、寒温性针阔混交林 (青杆-辽东栎针阔混交林) 和落叶阔叶林 (红桦林) 的土壤养分特征, 结果表明, 不同森林类型土壤养分含量差异明显, 落叶阔叶林土壤养分含量极显著 ($P < 0.01$) 高于针阔混交林和针叶林, 而寒温性针叶林土壤养分含量最低 (图1). 这与常超等^[3]和张继平等^[10]的研究结果一致. 森林土壤养分的差异很大程度上受其植被类型的影响, 主要表现在植物凋落物和根系分泌物等对土壤碳和能量物质的不断补充^[13-14]. 因此, 不同森林类型凋落物的质量和数量对土壤养分的影响起着重要作用. 由于针叶树叶片与阔叶树相比具有较高的木质素含量^[14, 20]和较小的比叶面积^[21-22]等限制了其凋落物分解速率, 从而影响着凋落物的养

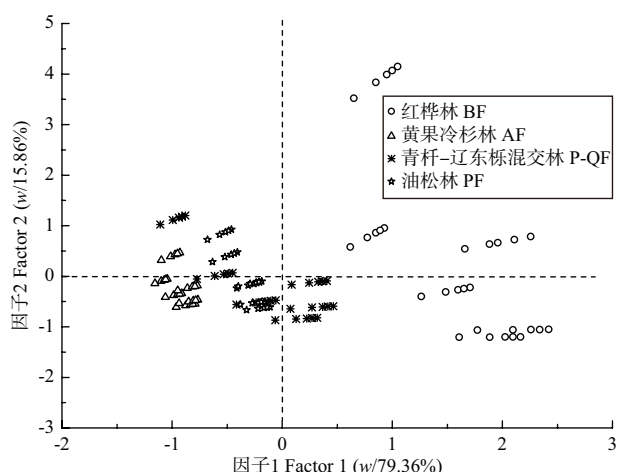


图3 不同森林类型土壤养分的因子分析。

Fig. 3 Exploratory factor analysis of soil nutrients for different forest types. BF: *B. albo-sinensis* forest; P-QF: *P. wilsonii* - *Q. wutaishanica* mixed forest; PF: *P. tabulaeformis* forest; AF: *A. ernestii* forest.

分归还速率。落叶阔叶林大量的枯枝落叶输入和较快的凋落物分解速率是其土壤肥力较针叶林高的一个重要原因。此外，针阔混交林土壤有机碳、全氮和全磷含量均高于针叶纯林，这与邓小军等对猫儿山自然保护区3种森林类型土壤养分垂直分布特征的研究结果^[2]一致。有研究表明，针阔混交林比针叶纯林生态系统中生态位重叠小，且具更加丰富的凋落物来源，这有利于提高养分循环效率和保持土壤肥力^[2]。

不同森林类型土壤养分间的相关分析表明，土壤有机碳含量与全氮和全磷含量存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$, $r \geq 0.97$)，且土壤可溶性有机碳含量与水解氮和磷含量间存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$, $r \geq 0.88$; 表3)，这与康冰等^[5]和魏强等^[4]的研究结果一致。土壤有机碳作为土壤养分的重要组成部分，在土壤养分循环过程中起着关键性作用^[4-5, 8]。土壤有机碳对土壤养分循环的影响主要表现为对土壤微生物活性的影响^[2]，即土壤有机碳含量与土壤微生物生物量间存在明显的正相关关系^[14, 23]。土壤微生物通过分解有机质释放养分，从而推进了土壤的代谢过程^[12]。因此，微生物生物量及其活性很大程度上影响着土壤养分循环的矿化和固持过程^[14]。此外，有研究表明，森林土壤中氮素主要以有机态存在，因此有机质含量越高，全氮和水溶性氮含量均越高^[24]。土壤磷素的主要来源为凋落物分解和岩石的风化作用，而岩石风化是一个缓慢且漫长的过程，凋落物分解则是土壤磷快速补充的来源。所以，凋落物来源和分解速率在很大程度上影响着土壤磷含量。

土壤酸碱度作为土壤重要的化学性质直接影响着植物生长、微生物活动和土壤养分循环等^[4, 25]。本文研究表明，土壤pH值与土壤有机碳、全氮和全磷均存在极显著负相关关系 ($P < 0.01$, $r \leq -0.83$; 表3)，这与程瑞梅等的研究结果^[26]一致。此外，不同森林类型土壤pH差异极显著 ($P < 0.01$)，落叶阔叶林（红桦林）土壤较其他3种森林类型存在明显的酸化过程。这可能是由于红桦林相对阴湿环境中大量微生物活动，相对快速的凋落物分解将释放出更多的有机酸等物质，从而导致土壤pH值下降^[26-27]。

本文研究发现，九寨沟自然保护区内森林土壤养分存在明显的季节差异（表2），且不同森林类型间呈现出不同的季节动态特征（图2）。一方面，不同时期凋落物养分归还特征很大程度上影响着土壤养分的季节动态。例如，红桦林从10月开始进入落叶期，大量叶片凋落物汇集于土壤表面，这将为微生物生长提供大量新的碳源，从而有助于提高其在凋落物分解过程中的活性^[28]。此外，凋落物在初期分解速率较快且大量可溶性养分通过淋溶作用进入土壤养分库^[29-30]。因此，落叶阔叶林土壤养分库在秋季将获得较大的补充。而针叶林没有固定且集中的落叶期，也就没有落叶阔叶林那样集中的凋落物养分归还期。另一方面，不同森林类型植被生长特征的差异也将影响土壤养分的季节动态。落叶阔叶树较针叶树存在明显的生长季和非生长季差异，即植物对土壤养分的吸收利用主要集中在春季和夏季，而在秋季和冬季植物对土壤养分的吸收较小。不同森林类型土壤养分季节动态（图2）和因子分析（图3）结果均表明落叶阔叶林土壤养分季节波动较针阔混交林和针叶林更明显，这也很好地印证了上述的讨论。

值得注意的是，虽然落叶阔叶林叶片凋落物养分在秋季将对土壤养分库具有很好的补充，但此时植物对土壤养分的需求量相对较小，这将造成大量可溶性养分在秋冬季节随降水流失，同时会对保护区内高山湖泊水体养分动态产生影响，从而具有影响水生生物群落种类和结构的风险。所以综合考虑凋落物养分归还速率和土壤肥力保持能力，针阔混交林将是比较合理的选择。综上所述，在九寨沟国家保护区内开展森林土壤养分特征研究以及森林生态系统可持续管理是一项值得关注且有待加强的工作。

致谢 感谢周祥玉、肖维阳和任锦海在野外试验布置和数据采集等工作中给予帮助；感谢生态系统恢复与生物多样性保育四川省重点实验室在样品分析过程中提供帮助。

参考文献 [References]

- 1 Trumbore SE, Czimczik CI. An uncertain future for soil carbon [J]. *Science*, 2008, **321**: 1455-1456
- 2 邓小军, 曹继钊, 宋贤冲, 唐健, 陈风帆. 猫儿山自然保护区3种森林类型土壤养分垂直分布特征[J]. *生态科学*, 2014, **33** (6): 1129-1134 [Deng XJ, Cao JZ, Song XC, Tang J, Chen FF. Vertical distribution characteristics of three forest types' soil properties on Mao'er Mountain Biosphere Reserve [J]. *Ecol Sci*, 2014, **33** (6): 1129-1134]
- 3 常超, 谢宗强, 熊高明, 赵常明, 申国珍, 赖江山, 徐新武. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征[J]. *生态学报*, 2009, **29** (11): 5978-5985 [Chang C, Xie ZQ, Xiong GM, Zhao CM, Shen GZ, Lai JS, Xu XW. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Three Gorges reservoir area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (11): 5978-5985]
- 4 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. *生态学报*, 2012, **32** (15): 4700-4713 [Wei Q, Ling L, Chai CS, Zhang GZ, Yan PB, Tao JX, Xue R. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (15): 4700-4713]
- 5 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮峙. 亚热带不

- 同植被恢复模式下土壤理化性质[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (10): 2479-2486 [Kang B, Liu SR, Cai DX, Lu LH, He RM, Gao YX, Di WZ. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (10): 2479-2486]
- 6 Schmidt M, Veldkamp E, Corre MD. Tree species diversity effects on productivity, soil nutrient availability and nutrient response efficiency in a temperate deciduous forest[J]. *For Ecol Manage*, 2015, **338**: 114-123
 - 7 Hedwall PO, Skoglund J, Linder S. Interactions with successional stage and nutrient status determines the life-form-specific effects of increased soil temperature on boreal forest floor vegetation [J]. *Ecol Evol*, 2015, **5**: 948-960
 - 8 Roy PK, Samal NR, Roy MB, Mazumdar A. Soil carbon and nutrient accumulation under forest plantations in Jharkhand State of India [J]. *Clean-Soil Air Water*, 2010, **38**: 706-712
 - 9 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (4): 947-954 [Yu YF, Peng WX, Song TQ, Zeng FP, Wang KL, Wen L, Fan FJ. Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between karst hills, southwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25** (4): 947-954]
 - 10 张继平, 张林波, 王凤玉, 刘伟玲, 沃笑. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. 土壤, 2014, **46** (2): 262-268 [Zhang JP, Zhang LB, Wang FY, Liu WL, Wo X. Spatial variation of soil nutrient contents in the Jinggangshan National Nature Reserve [J]. *Soils*, 2014, **46** (2): 262-268]
 - 11 Xu ZH, Ward S, Chen CR, Blumfield T, Prasolova N, Liu JX. Soil carbon and nutrient pools, microbial properties and gross nitrogen transformations in adjacent natural forest and hoop pine plantations of subtropical Australia [J]. *J Soil Sediment*, 2008, **8**: 99-105
 - 12 王树力, 袁伟斌, 杨振. 镜泊湖区4种主要森林类型的土壤养分状况和微生物特征[J]. 水土保持学报, 2007, **21** (5): 50-54 [Wang SL, Yuan WB, Yang Z. Soil nutrient status and microbiological properties of four main forest types around Ginbo Lake [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, **21** (5): 50-54]
 - 13 Rutigliano FA, Ascoli RD, De Santo AV. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**: 1719-1729
 - 14 Jia GM, Cao J, Wang CY, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **217**: 117-125
 - 15 刘少英, 章小平, 曾宗永. 九寨沟自然保护区的生态多样性[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007: 11-131 [Liu SY, Zhang XP, Zeng ZY. Biodiversity of the Jiuzhaigou National Nature Reserve [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2007: 11-131]
 - 16 林致远, 尹平. 九寨沟土壤发生及地理分布规律研究[J]. 西南师范大学学报自然科学版, 1994, **19** (1): 90-99 [Lin ZY, Yin P. Studies on the soil genetic characteristics and geographical distribution in Jiuzhaigou region [J]. *J SW Chin Norm Univ Nat Sci*, 1994, **19** (1): 90-99]
 - 17 庞学勇, 包维楷, 江元明, 王成. 九寨沟和黄龙自然保护区原始林与次生林土壤物理性质比较[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15** (6): 768-773 [Pang XY, Bao WK, JiangYM, Wang C. Comparison of soil physical properties under primary and secondary forests in Jiuzhaigou and Huanglong Nature Reserves, Sichuan, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15** (6): 768-773]
 - 18 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106-180 [Lu RK. Soil and Agro-Chemical Analytical Methods [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 106-180]
 - 19 SAS Institute Inc. SAS 9.2 User's Guide [M]. Carolina, 2008
 - 20 王相娥, 薛立, 谢腾芳. 凋落物分解研究综述[J]. 土壤通报, 2009, **40** (6): 1473-1478 [Wang XE, Xue L, Xie TF. A review on litter decomposition [J]. *Chin J Soil Sci*, 2009, **40** (6): 1473-1478]
 - 21 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究[J]. 植物生态学报, 2004, **28** (4): 457-467 [Wang XH, Huang JJ, Yan, ER. Leaf litter decomposition of common trees in Tiantong [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2004, **28** (4): 457-467]
 - 22 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 李庆康, 于贵瑞, 韩士杰, 范春楠, 刘万德. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究[J]. 生态学报, 2006, **26** (4): 1037-1046 [Guo ZL, Zheng JP, Ma YD, Li QK, Yu GR, Han SJ, Fan CN, Liu WD. Researches on litterfall decomposition rates and model simulating of main species in various forest vegetations of Changbai Mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (4): 1037-1046]
 - 23 Guggenberger G, Zech W. Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Region Huetar Norte, Costa Rica [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **124**: 93-104
 - 24 杨承栋, 张万儒. 卧龙自然保护区森林土壤有机质的研究[J]. 土壤学报, 1986, **23** (1): 30-39 [Yang CD, Zhang WR. Study on the organic matter of the forest soils in Wolong Natural Reserve [J]. *Acta Pedol Sin*, 1986, **23** (1): 30-39]
 - 25 Viani RAG, Rodrigues RR, Dawson TE, Lambers H, Oliveira RS. Soil pH accounts for differences in species distribution and leaf nutrient concentrations of Brazilian woodland savannah and seasonally dry forest species [J]. *Perspect Plant Ecol*, 2014, **16**: 64-74
 - 26 程瑞梅, 肖文发, 王晓荣, 封晓辉, 王瑞丽. 三峡库区植被不同演替阶段的土壤养分特征[J]. 林业科学, 2010, **46** (9): 1-6 [Cheng RM, Xiao WF, Wang XY, Feng XH, Wang RL. Soil nutrient characteristics in different vegetation successional stages of Three Gorges reservoir area [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46** (9): 1-6]
 - 27 周永斌, 张飞, 殷鸣放, 武囡囡, 史村, 吴可. 白石砬子自然保护区不同森林类型土壤化学性质与养分状况分析[J]. 中国农学通报, 2010, **26** (11): 118-122 [Zhou YB, Zhang F, Yin MF, Wu NN, Shi S, Wu K. Analysis of the different forest types on soil chemical property and nutrient status in National Nature Reserve of Baishilazi [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26** (11): 118-122]
 - 28 Antisari LV, Falsone G, Carbone S, Vianello G. Short-term effects of forest recovery on soil carbon and nutrient availability in an experimental chestnut stand [J]. *Biol Fert Soils*, 2013, **49**: 165-173
 - 29 Zhou GY, Guan LL, Wei XH, Tang XL, Liu SG, Liu JX, Zhang DQ, Yan JH. Factors influencing leaf litter decomposition: an intersite decomposition experiment across China [J]. *Plant Soil*, 2008, **311**: 61-72
 - 30 Aponte C, Garcia LV, Maranon T. Tree species effect on litter decomposition and nutrient release in Mediterranean oak forests changes over time [J]. *Ecosystems*, 2012, **15**: 1204-1218