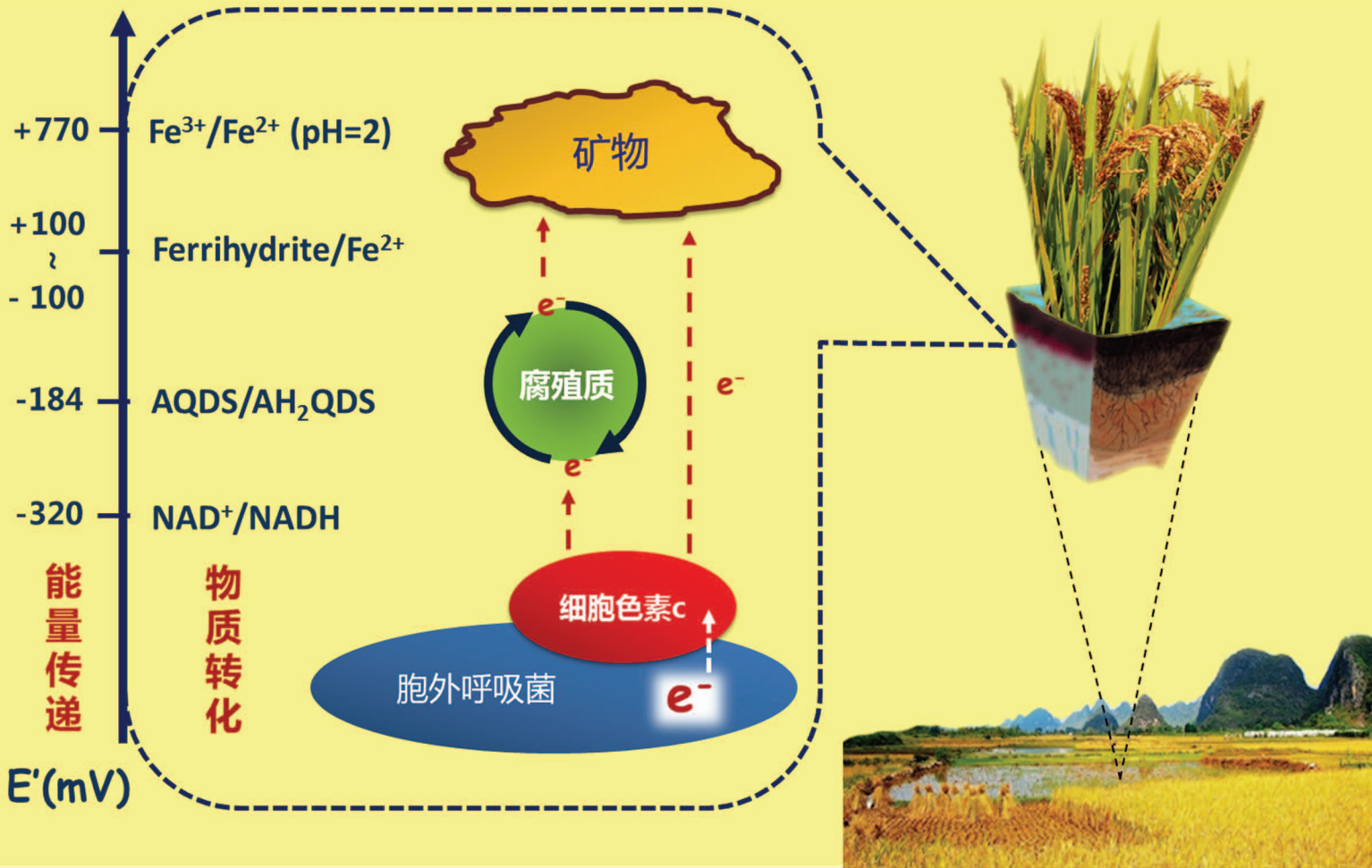


Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

目 次

综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)
长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 S_3 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)
基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)
基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)
基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)
鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)
放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)
汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)
咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)
基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)
拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)
砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)
AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)
激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)
臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)
黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)
水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)
祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)
基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)
适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)
旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)
西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)
加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)
不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

DOI: 10.11766/trxb201501080511

祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的 碳氮磷生态化学计量特征*

赵维俊^{1, 2, 3} 刘贤德^{1, 2, 3} 金 铭^{1, 3} 张学龙^{1, 2, 3} 车宗玺^{1, 3}
敬文茂^{1, 3} 王顺利^{1, 3} 牛 贇^{1, 3} 齐 鹏⁴ 李雯靖¹

(1 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃张掖 734000)

(2 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

(3 甘肃张掖生态科学研究院甘肃省祁连山生态科技创新服务平台, 甘肃张掖 734000)

(4 甘肃农业大学资源环境学院, 兰州 730070)

摘 要 以祁连山排露沟流域青海云杉 (*Picea crassifolia*) 林为研究对象, 研究其不同海拔梯度叶片—枯落物—土壤间的碳、氮、磷生态化学计量学特征, 并对其相关性进行分析。结果表明, 在不同海拔梯度上, 叶片、枯落物和土壤 C : N 比的变化范围分别为 22.95 ~ 36.72、21.41 ~ 41.61、12.41 ~ 20.70, 均值大小依次为枯落物 > 叶片 > 土壤, C : P 和 N : P 比的变化范围分别为 510.2 ~ 739.8、398.6 ~ 698.1、134.1 ~ 219.7 和 18.13 ~ 26.86、6.71 ~ 26.28、7.96 ~ 16.56, 均值大小依次为叶片 > 枯落物 > 土壤。随海拔梯度的增加, 除土壤 C : N 比差异性不显著外 ($p > 0.05$), 叶片和枯落物的碳、氮、磷化学计量比在不同海拔间的差异显著性各不相同。叶片、枯落物和土壤 C : N 比两两均具有显著正相关 ($p < 0.05$), 叶片与枯落物及土壤与枯落物 C : P 比均具有显著负相关 ($p < 0.05$), 叶片与土壤 C : P 比及不同组分 N : P 比之间相关性均不显著 ($p > 0.05$)。该研究结果有助于进一步了解青海云杉林碳、氮、磷在不同组分间的相互作用规律与机制。

关键词 青海云杉林; 叶片; 枯落物; 土壤; 生态化学计量学

中图分类号 S714.2 **文献标识码** A

植物在生长过程中, 通过光合作用生产有机物, 同时将部分有机物转移到土壤, 并以枯落物的形式将碳、氮、磷等养分逐步补偿给土壤^[1]。认识植物物质生产过程中结构性元素 (碳) 和限制性元素 (氮、磷) 的相互关系对生态系统生源要素耦合循环过程的理解显得尤为重要, 生态化学计量学为其研究提供了有效的手段^[2]。近年来, 国

内对不同的时间尺度和空间尺度 (物种、种群、群落等) 上森林和草原生态系统元素的生态化学计量关系进行了大量研究^[3]。祁连山位于青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的交汇地带, 多种因素叠加构成了大陆性高寒半湿润山地气候, 是脆弱的生态敏感区。青海云杉种群作为祁连山森林生态系统的主要优势种或建群种之一, 其分布面积占乔木林面

* 国家自然科学基金项目 (31260141)、国家林业公益性行业科研专项 (201104009-08)、甘肃省基础研究创新群体项目 (145RJIG337) 和甘肃省科技创新服务平台 (144JTCG254) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31260141), National Forestry Public Welfare Profession Scientific Research Project (No. 201104009-08), Innovation Group Fund on Fundamental Research of Gansu Province (No. 145RJIG337), and Science and Technology Innovation Service Platform of Gansu Province (No. 144JTCG254)

作者简介: 赵维俊 (1981—), 男, 甘肃靖远人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事森林生态和湿地生态研究。E-mail: zhaoweijun1019@126.com

收稿日期: 2015-01-08; 收到修改稿日期: 2015-06-30

积的55.79%^[4]，在有机质生产、碳循环、水源涵养和水土保持方面起着重要的调节作用，同时是鸟类、兽类和两栖爬行类等动物的栖息地。由于人类活动的长期干扰，青海云杉林生态系统退化严重，生态服务功能降低，逆向演化显著，进程加快，给区域生态环境建设和经济发展带来了负面影响，如何恢复和重建受损的青海云杉林生态系统，对植被恢复的合理调控具有一定的科学意义。

祁连山中海拔地带山地阴坡、半阴坡较厚的土壤腐殖质层是青海云杉林生长的主要适生环境^[5]，当前一些研究者对祁连山青海云杉林叶片氮、磷含量随海拔变化特征进行了研究^[6]，也对祁连山不同海拔梯度上青海云杉林土壤碳、氮、磷等养分的垂直变异性进行了研究^[7]，但将青海云杉林的叶片—枯落物—土壤作为一个完整的系统来研究其碳、氮、磷生态化学计量学特征少有报道。本研究以祁连山自然保护区中段的西水林区排露沟流域中海拔（2 900~3 300 m）青海云杉林为研究对象，运用生态化学计量学的原理和方法，分析其叶片—枯落物—土壤等不同组分碳、氮、磷化学计量学特征比在海拔梯度上的变化特征，更好地了解不同组分碳、氮、磷含量及其比值特征的变化格局，探讨叶片—枯落物—土壤等不同组分碳、氮、磷化学计量比的相关性，以期揭示青海云杉种群内碳、氮、磷在不同组分间的相互作用规律与机制，为青海云杉林生态系统的经营管理和可持续发展提供依据，也为我国亚高寒山地地区的植物与土壤间的生态化学计量特征研究提供基础的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山自然保护区中段西水林区的排露沟流域（100°17'E，38°24'N），流域总面积2.85 km²，长4.25 km，纵坡比降1:4.2，海拔2 600~3 800 m。年均气温-0.6~2.0℃，年均日照时数1 893 h，日辐射总量均值为110.3 kW m⁻²，多年平均降水量430 mm，年均蒸发量1 080 mm，年均相对湿度为60%，属高寒半干旱山地森林草原气候^[8]。流域自然条件复杂，水热条件差异大，受水分和热量制约形成了多种具有明显垂直梯度的植被类型和土壤类型，海拔从低到高，植被类型依次为山地草原植被、山地森林草原植被、亚高山灌

丛草甸植被、高山冰雪植被；与之对应的土壤类型依次为山地栗钙土、山地森林灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。在各类土壤中山地灰褐土和亚高山灌丛草甸土是生长森林的土壤，山地灰褐土分布在海拔2 600~3 300 m地带，是乔木林的主要分布带；亚高山灌丛草甸土分布在海拔3 300~3 800 m亚高山地带，是湿性灌木林的主要分布带。建群种青海云杉呈斑块状或条状分布在实验区海拔2 600~3 300 m阴坡和半阴坡地带，与阳坡草地犬齿交错分布；灌木优势种有金露梅（*Potentilla fruticosa*）、鬼箭锦鸡儿（*Caragana jubata*）和吉拉柳（*Salix gilashanica*）等，草本主要有珠牙蓼（*Polygonum viviparum*）、黑穗苔（*Carex atrata*）和针茅（*Stipa*）等。苔藓层平均厚度约为5 cm左右，主要种有山羽藓（*Abietinella abietina*）、毛尖藓（*Cirriphyllum cirrhosum*）、对叶藓（*Distichium capillaceum*）、黄色真藓（*Bryum pallescens*）等。

1.2 研究方法

流域内分布的青海云杉林均为天然次生林，而且为纯林，生长土壤为山地森林灰褐土。基于样地选择的典型性和青海云杉群落的代表性，2009年已在排露沟流域选择典型青海云杉林群落作为研究对象，以海拔2 900 m为基点，采用梯度格局法^[9]自下而上沿海拔2 900、3 000、3 100、3 200和3 300 m与等高线平行各设置了1条平行样带，共5条平行样带，样带宽20 m，同时垂直3 300 m高山林线沿坡面垂直向下设置了3条样带，样带宽同样20 m，在纵横设置的样带交汇处设置了15个样地，样地面积大小为20 m×20 m。应用手持GPS和数字坡度仪测定每一个样地的海拔、经纬度、坡度和坡向等基本信息，对样地内胸径大于等于1 cm的青海云杉个体进行每木检尺，包括胸径、树高、冠幅、郁闭度和林龄等，在每个样方的4个角和对角线交点设置了5个2 m×2 m灌木样方，记录灌木种类、数量、盖度、高度等，同时在每个灌木样方内设置了1 m×1 m的草本样方，调查草本种类、数量、高度、盖度等（表1）。多年统计表明，随海拔梯度（2 900~3 300 m）升高，青海云杉林林内大气温度和土壤温度均逐渐降低，每升高100 m温度降低0.44℃左右，年均降水量呈先增加（2 900~3 200 m）后减少（3 200~3 300 m）的变化趋势^[10]。

表1 不同海拔样地概况

Table 1 General information of the sample sites along the altitude gradient studied

样地号 Sample code	海拔 Altitude (m)	地理位置 Geographic location	林龄 Stand age (a)	胸径 Diameter at breast height (cm)	树高 Height (m)	冠幅 Canopy (m)	郁闭度 Canopy density	灌层覆盖度 Coverage degree of shrub layer (%)	活地被层 (草、苔 藓、地衣) 覆盖度 ^① (%)
A1, B1, C1	3 300	100° 18' 15" E 38° 32' 08" N	81	4.87 ± 0.95	6.30 ± 1.32	4.68 ± 1.32	0.12 ± 0.03	60, 70, 85	70, 80, 98
A2, B2, C2	3 200	100° 18' 15" E 38° 32' 13" N	88	29.80 ± 5.77	8.87 ± 2.30	4.07 ± 0.64	0.50 ± 0.17	40, 2, 15	60, 75, 60
A3, B3, C3	3 100	100° 17' 49" E 38° 32' 41" N	74	23.67 ± 4.15	6.87 ± 1.05	3.54 ± 0.53	0.60 ± 0.17	15, 7, 18	50, 85, 95
A4, B4, C4	3 000	100° 17' 49" E 38° 32' 41" N	75	15.22 ± 2.19	7.60 ± 1.54	3.15 ± 0.23	0.69 ± 0.09	15, 1, 18	20, 95, 95
A5, B5, C5	2 900	100° 18' 06" E 38° 32' 42" N	36	12.33 ± 1.03	5.67 ± 0.86	2.70 ± 0.28	0.72 ± 0.12	10, 10, 10	30, 30, 30

①Cover degree of ground vegetation (grasses, mosses, lichens)

1.3 样品采集与测定

于2013年9月17—19日青海云杉林生长盛期采集植物和土壤样品。在每个样地随机选取长势相近且较好的青海云杉个体, 分别设置东、西、南、北四个方向采集每株植物中上部位健康成熟的叶片, 混匀后装入牛皮纸袋; 此外在样方内随机均匀地选择腐熟程度一致的枯落物进行多点采集, 混匀后装入牛皮纸袋; 叶片和枯落物烘干粉碎过100目筛, 用于碳、氮、磷含量测定。用土钻采集0~10 cm土壤样品, 采集前先清除表层的苔藓枯落物层, 每个样地按“品”字形选择3个点进行采集, 混匀后自然风干, 剔除杂物, 研磨过100目筛, 用于土壤碳、氮、磷含量测定。测定方法参照文献[11], 其中, 叶片、枯落物和土壤全碳的测定采用重铬酸钾—外加热法测定; 叶片和枯落物全氮采用定氮法测定, 全磷采用钼锑抗比色法测定; 土壤全氮采用凯氏定氮法进行测定, 全磷采用钼锑抗比色法测定。每一样品测定实验室重复3次。

1.4 统计分析

应用Excel 2003和SPSS17统计分析软件对测定数据进行前期处理、统计分析及绘图。同一海拔青海云杉林植物叶片、枯落物和土壤等不同组分碳、氮、磷含量及其化学计量比为3个样地的算术平均值, 各养分含量均用质量单位表示, 化学计量比为养分相对含量的比值。不同海拔青海云杉林植物叶

片、枯落物和土壤等不同组分碳、氮、磷含量及其化学计量比为同一海拔算术平均值的加权平均值。在对不同组分碳、氮、磷含量及其计量比进行统计前, 进行数据正态分布检验, 数据服从正态分布进行下一步分析, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)的LSD法进行显著性检验, 相关性采用Pearson系数进行检验。

2 结 果

2.1 叶片—枯落物—土壤的碳、氮、磷含量总体特征

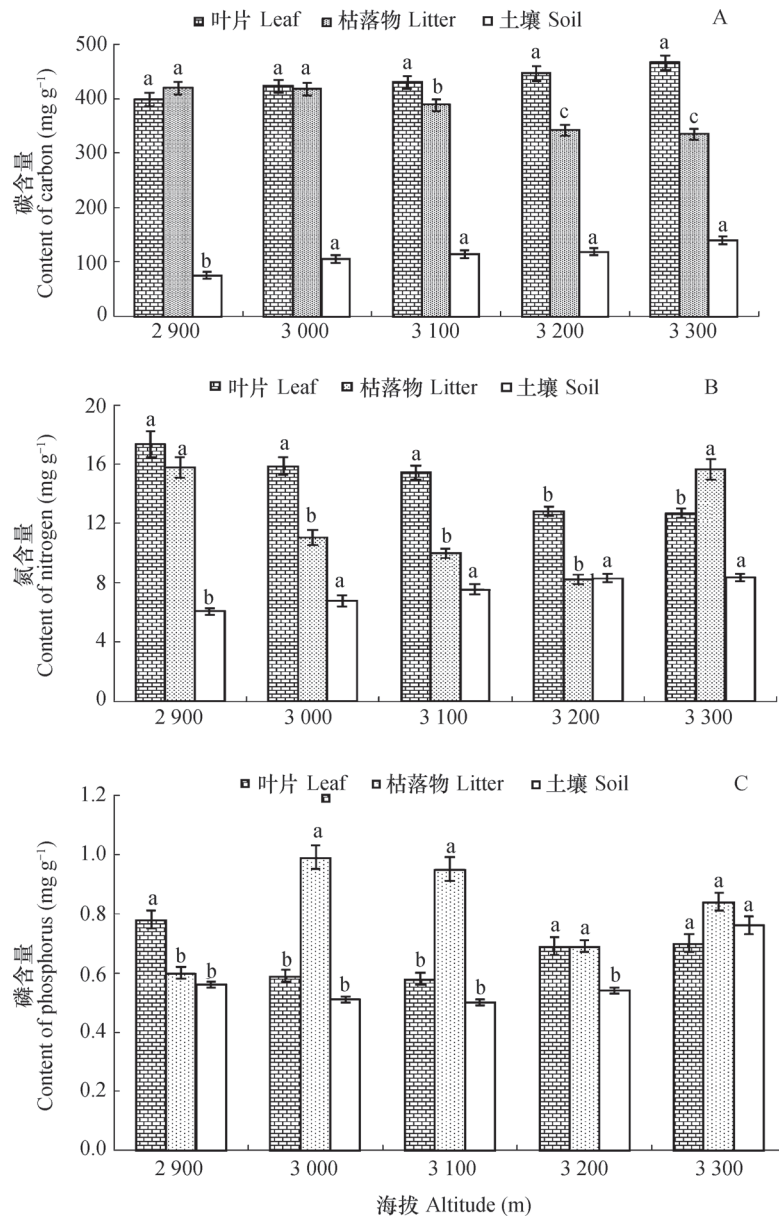
对不同海拔梯度青海云杉林叶片、枯落物和土壤等不同组分的碳、氮、磷含量进行了统计分析(图1)。从图1可以看出, 随海拔梯度增加, 不同组分的碳、氮、磷含量表现为不同的变化规律及差异显著性。其中, 叶片碳含量不断增加, 其含量变化范围为398.0~466.0 mg g⁻¹, 均值为432.4 mg g⁻¹, 碳含量在海拔间的差异性不显著($p > 0.05$) (图1A)。枯落物碳含量不断减小, 其含量变化范围为334.8~418.8 mg g⁻¹, 均值为379.9 mg g⁻¹, 碳含量在海拔3 100 m和3 200 m处发生显著变化($p < 0.05$) (图1A)。土壤碳含量与叶片碳含量变化规律相同, 即碳含量不断增加, 其变化范围为75.10~139.5 mg g⁻¹, 均值为110.4 mg g⁻¹, 海拔

2 900 m碳含量显著低于其他海拔碳含量 ($p < 0.05$) (图1A)。综上,不同海拔叶片、枯落物和土壤碳含量大小依次为:叶片 > 枯落物 > 土壤。可见,青海云杉林叶片以枯落物的形式归还林地土壤的过程中,碳含量是逐渐减小的。

随海拔梯度的增加,叶片氮含量不断减小,变化范围是12.69 ~ 17.34 mg g^{-1} ,均值为14.83 mg g^{-1} ,氮含量在低海拔(2 900 m ~ 3 100 m)显著高于高海拔(3 200 ~ 3 300 m) ($p < 0.05$) (图1B)。枯落物氮含量从低海拔2 900 m至3 200 m其含量不

断减小,至海拔3 300 m其含量又突然增加,变化范围为8.20 ~ 15.77 mg g^{-1} ,均值为12.12 mg g^{-1} ,氮含量在海拔2 900 m和3 300 m显著高于其他海拔 ($p < 0.05$) (图1B)。土壤氮含量不断增加,变化范围为6.05 ~ 8.28 mg g^{-1} ,均值为7.39 mg g^{-1} ,海拔2 900 m土壤氮含量显著低于其他海拔氮含量 ($p < 0.05$) (图1B)。不同海拔叶片、枯落物和土壤氮含量均值大小依次为:叶片 > 枯落物 > 土壤,与不同组分的碳含量大小顺序是一致的。

随海拔梯度增加,叶片磷含量先是减小而后



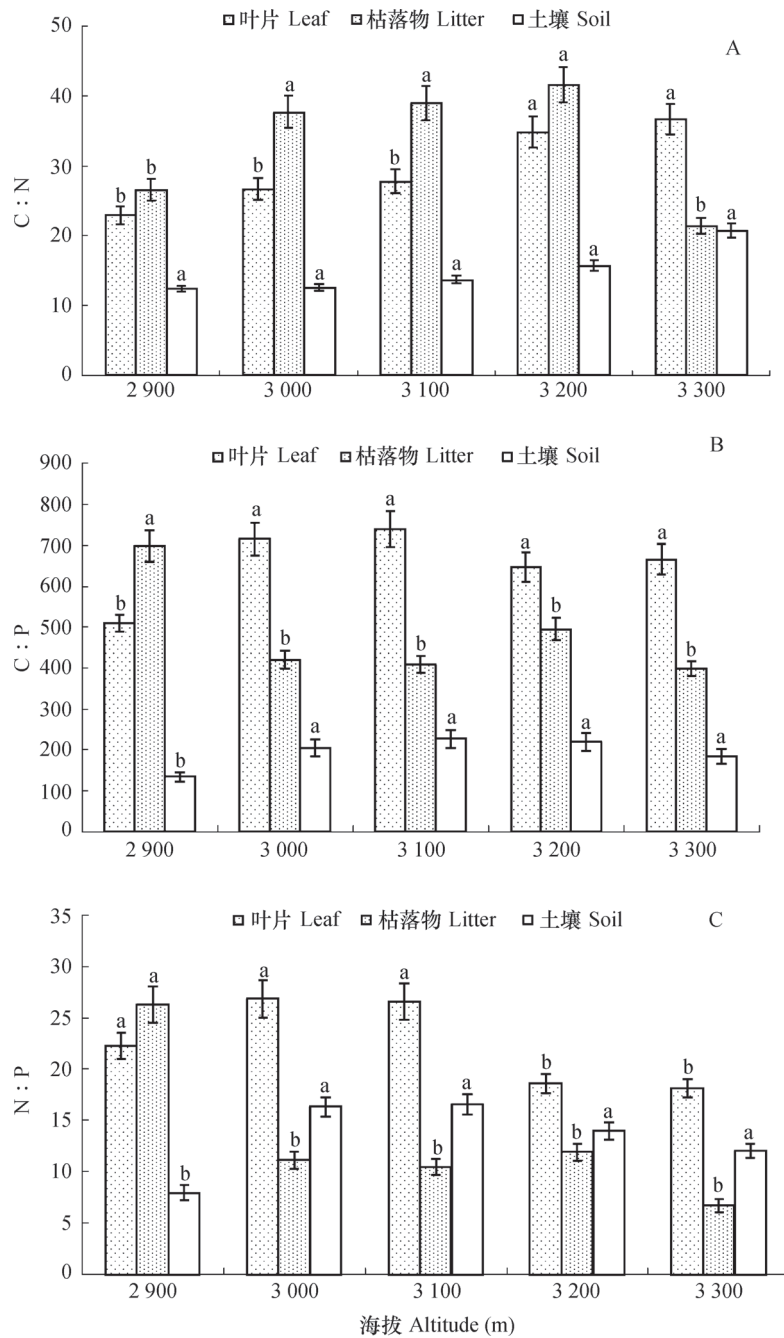
注:不同小写字母表示叶片、枯落物和土壤的碳、磷、磷含量在不同海拔的差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters represent significant difference in content of C, N and P in leaf, litters and soil of the forest systems different in altitude ($p < 0.05$)

图1 叶片—枯落物—土壤的碳、氮、磷含量特征

Fig. 1 Carbon, nitrogen and phosphorus contents in leaf, litters and soil

逐渐增加, 变化范围为 $0.58 \sim 0.78 \text{ mg g}^{-1}$, 均值大小为 0.67 mg g^{-1} , 3 000 m和3 100 m叶片磷含量显著低于其他海拔叶片磷含量 ($p < 0.05$) (图 1C)。土壤磷也是减小而后逐渐增加, 变化范围为 $0.50 \sim 0.76 \text{ mg g}^{-1}$, 均值为 0.57 mg g^{-1} , 3 300 m土壤磷含量显著高于其他海拔磷含量 ($p < 0.05$)

(图 1C)。枯落物磷含量没有明显的变化规律, 变化范围为 $0.60 \sim 0.99 \text{ mg g}^{-1}$, 均值为 0.81 mg g^{-1} , 海拔2 900 m和3 200 m磷含量显著低于其他海拔磷含量 ($p < 0.05$)。不同海拔叶片、枯落物和土壤磷含量均值大小依次为: 枯落物 > 叶片 > 土壤, 不同于不同组分碳、氮含量大小顺序。



注: 不同小写字母表示叶片、枯落物和土壤的C:N、C:P和N:P在不同海拔的差异显著性 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters represent significant difference in C:N, C:P and N:P of leaf, litter and soil of the forest systems different in altitude ($p < 0.05$)

图2 叶片—枯落物—土壤的C:N、C:P、N:P变化特征

Fig. 2 Variation C:N, C:P and N:P in leaf, litters and soil

2.2 叶片—枯落物—土壤的C:N、C:P和N:P生态化学计量比总体特征

对不同海拔梯度青海云杉林叶片、枯落物和土壤的碳、氮、磷生态化学计量比C:N、C:P和N:P比进行了作图分析(图2),不同组分的C:N、C:P和N:P比在随海拔梯度增加亦表现为不同的变化规律及差异显著性。其中,青海云杉林叶片C:N比逐渐增加,变化范围为22.95~36.72,均值为29.79,高海拔3 200 m和3 300 m处C:N显著高于其他海拔($p < 0.05$)(图2A)。枯落物C:N比随海拔的增加逐渐增加,而后在海拔3 300 m降低,变化范围为21.41~41.61,均值为33.25,2 900 m和3 300 m的C:N比显著低于其他海拔($p < 0.05$)(图2A)。土壤C:N比变化规律同叶片C:N比变化规律,变化范围为12.41~20.70,均值为15.03,不同海拔的C:N比差异性不显著($p > 0.05$)(图2A)。叶片、枯落物和土壤的C:N比均值大小依次为:枯落物>叶片>土壤。

随海拔梯度的增加,叶片C:P比先是增加而后减小,变化范围为510.2~739.8,均值为655.7,C:P比在2 900 m处显著低于其他海拔梯度C:P比($p < 0.05$)(图2B)。枯落物C:P比没有明显的变化规律,变化范围为398.6~698.1,均值为484.1,低海拔2 900 m显著大于其他海拔C:P比($p < 0.05$)(图2B)。土壤C:P比先是增加而后逐渐减小,变化范围为134.1~219.7,均值为194.1,但仅海拔2 900 m显著低于其他海拔梯度($p < 0.05$)(图2B)。不同海拔叶片、枯落物和土壤的C:P比的均值大小依次为:叶片>枯落物

>土壤。

随海拔梯度的增加,叶片N:P比先是增加而后逐渐减小(图2C),变化范围为18.13~26.86,均值为22.48,低海拔(2 900 m~3 100 m)N:P比显著高于高海拔(3 200~3 300 m)($p < 0.05$)。枯落物的N:P比基本上是不不断减小的,其变化范围为6.71~26.28,均值为13.30,2 900 m的N:P比显著高于其他海拔($p < 0.05$)(图2C)。土壤N:P比的变化规律同叶片N:P比变化规律,而且土壤和枯落物的N:P比较为接近,变化范围为7.96~16.56,均值为12.26,2 900 m处N:P比显著低于其他海拔梯度($p < 0.05$)(图2C)。不同海拔叶片、枯落物和土壤的N:P比的均值大小依次为:叶片>枯落物>土壤。

2.3 叶片—枯落物—土壤的C:N、C:P和N:P的相关性

本研究对不同海拔梯度青海云杉林的叶片—枯落物—土壤间的C:N、C:P、N:P两两之间进行了Pearson相关性分析,叶片与土壤C:P比及不同组分N:P比之间相关性均不显著($p > 0.05$)。表2中列出了满足 $p < 0.05$ 的相关关系,可以看出在较高海拔(3 300 m、3 200 m和3 100 m)青海云杉林的叶片与枯落物、叶片与土壤及枯落物与土壤的C:N均为极显著正相关($p < 0.01$),而在低海拔(3 000 m和2 900 m)不同组分两两之间C:N均为显著正相关($p < 0.05$)。不同海拔叶片与枯落物及枯落物与土壤C:P相关性没有明显的变化规律,总体上其在较高海拔的差异显著性($p < 0.01$)显著于低海拔差异显著性($p < 0.05$)。

表2 叶片—枯落物—土壤C:N和C:P的相关系数

Table 2 Relationships between leaf, litters and soil in C:N, and C:P

海拔 Altitude (m)	C:N			C:P	
	叶片与枯落物 Leaf and litters	叶片与土壤 Leaf and soil	枯落物与土壤 Litters and soil	叶片与枯落物 Leaf and litters	枯落物与土壤 Litters and soil
3 300	0.937**	0.913**	0.932**	-0.892**	-0.883**
3 200	0.902**	0.763**	0.884**	-0.782**	-0.632*
3 100	0.834**	0.603*	0.812**	-0.823**	-0.705*
3 000	0.704*	0.709*	0.703*	-0.702*	-0.645*
2 900	0.553*	0.703*	0.674*	-0.673*	-0.636*

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$

3 讨 论

3.1 叶片—枯落物—土壤的碳、氮、磷含量特征

碳、氮、磷是构成植物干物质、氨基酸、蛋白质、核酸等的生物合成和核酸及酶的组成部分^[12]。本研究中，祁连山不同海拔青海云杉林碳、氮含量均表现为叶片 > 枯落物 > 土壤，磷含量表现为枯落物 > 叶片 > 土壤。叶片碳含量低于全球492种陆地植物叶片碳的平均含量（464 mg g⁻¹），也低于我国东部南北样带碳的平均值480.1 mg g⁻¹^[13]，青海云杉林叶片碳储存能力较弱。叶片氮含量低于全球植物叶片氮平均含量（20.1 mg g⁻¹）和我国植物叶片氮平均含量（20.2 mg g⁻¹）^[14]，青海云杉林植物体内的氮含量相对缺乏。与全球水平叶片磷含量（1.80 mg g⁻¹或1.99 mg g⁻¹）和我国叶片全磷含量（1.5 mg g⁻¹）相比^[13, 15]，叶片磷含量（0.67 mg g⁻¹）明显低于全球水平和我国水平。可见，祁连山青海云杉林叶片碳、氮、磷含量均低于全球植物和中国植物叶片碳、氮、磷的平均含量，这主要与青海云杉林的单一乔木树种和其地处亚高山地带阴冷潮湿的地理环境及海拔梯度影响下的温度、湿度、根系对营养的吸收、养分有效性等有一定的关系。

叶片碳含量随海拔增加而增加，原因是虽然研究区降水量和土壤含水量随海拔升高而增加，但是大气温度和土壤温度随之逐渐降低，使得高海拔地区出现的冰冻低温现象增多，而且逐渐下降的土壤温度造成水分有效性降低，使青海云杉不定期地生活在相对于旱的条件下，叶片气孔导度降低，叶片的碳含量得到积累，这与多数研究关于高山植物叶片碳含量表现为随海拔高度的增加而增加结论相同^[16]。尽管叶片碳含量随海拔升高其含量不断增加，但碳含量在不同海拔间的差异性不显著，这与青海云杉树种为适应高海拔地区的生态环境有关。氮含量随海拔增加而减少，原因是高海拔土壤有效氮含量降低，植物为了适应“低氮”环境，将更多的氮投资于保护光合器官，而低海拔则更倾向于光合生产有关^[17]，使得低海拔氮素含量显著低于高海拔。叶片磷含量随海拔增加先是减小而后逐渐增加的，减小的原因是随海拔升高温度降低，养分的流动和植物对营养的吸收滞后，导致了低的叶片营养浓度，增加的原因是3 200 m和3 300 m青海云杉样地林下分布的灌木较多，而灌木根际具有保持土壤热量的优势^[18]，在一定程度上促成了植物对营

养的吸收，使叶片具有较高的磷。

不同海拔青海云杉林枯落物的碳平均含量低于叶片碳含量，这与枯落物分解有很大的关系，原因是枯落物在分解过程中，粗有机化学成分中粗脂肪、可溶性糖、单宁、有机碳含量显著下降^[19]。枯落物氮平均含量也低于叶片氮平均含量，原因是叶片在进行光合作用的过程中利用了大量氮素，较高的氮素利用率降低了凋落物中的氮素水平；还有可能与叶片凋落时氮再吸收有关^[20]。而枯落物磷平均含量高于叶片磷平均含量，说明成熟叶片磷含量在衰老过程中并不存在较高的转移率，养分重吸收不明显，这可能与其所处的经度、纬度地理格局和温度、降水气候格局等有关^[21]。该研究结论不支持常绿植物占据较贫瘠的生境、具有较高养分重吸收率的结论^[20]。枯落物碳含量随海拔增加不断减小，是高海拔地区降水频度和总量大于低海拔地区，降水淋溶增强和干湿交替等气候条件造成的^[10]。枯落物氮含量随海拔升高的变化规律先是减小，而后逐渐增加，这是青海云杉生物学和生态学特性等内部因素及海拔引起的气候变化等外部因素共同作用的结果^[22]，具体原因有待进一步研究。枯落物磷含量没有明显的变化规律，这与枯落物自身质量、生物因素和环境因素等因素密切相关，究其原因有待深入探讨。

不同海拔青海云杉林土壤碳含量高于全国均值的24.56 g kg⁻¹^[23]，碳蓄积能力较强。研究区土壤氮含量与碳含量显著相关^[24]，氮素亦主要来源于枯落物，氮含量低于中国温带针阔叶混交林土壤氮含量的平均值（8.83 g kg⁻¹）^[25]，但高于全国平均值（1.88 g kg⁻¹）^[23]。与氮供应相比，高山地区植物所需要的磷，其供应更依赖于土壤过程，青海云杉林土壤磷平均含量为0.78 mg g⁻¹，明显低于全球平均水平（2.8 mg g⁻¹）^[23]，这与青海云杉林地地表土壤对磷的吸附作用和祁连山区弱的岩石风化作用有关，与Han等^[14]关于中国土壤磷含量低导致植物叶片磷含量低的推论一致。土壤碳含量随海拔梯度增加，在该流域很大程度上与青海云杉林地处亚高寒山地有直接的关系，随海拔升高，降水不断增加，土壤温度不断下降^[10]，土壤碳分解因微生物及各种酶活性受到抑制，使得土壤有机质分解减缓和周转时间增长，输入量大于损失量，土壤碳不断得到积累。土壤氮含量随海拔增加不断增加，是因为土壤氮含量的消长取决于有机质含量的

变化^[24]。土壤磷含量在高海拔3 300 m显著高于其他海拔,原因是此处土壤成土过程中腐殖质的积累过程较为明显。

3.2 叶片—枯落物—土壤化学计量学特征关系

碳、氮、磷生态化学计量比是生态系统过程及其功能的重要特征,不同组分碳、氮、磷比可以作为养分限制以及碳、氮、磷饱和诊断和有效的预测性指标^[26],其中植物叶片的N:P比值被认为是环境判断因子,甚至可以作为土壤养分供给状况的指标^[27]。本研究中,不同海拔青海云杉林叶片C:N比(29.79)高于全球平均水平的22.5^[14],C:P比(655.70)显著高于全球平均水平的232^[13],N:P比(22.48)明显高于全球水平的13.8或12.7^[14],也高于全国平均水平16.3^[14],这与祁连山林区的气候条件,水热状况有关^[28],加上林地覆盖较厚的苔藓枯落物层生态作用^[28],土壤养分富集作用较强,可供林木吸收利用的养分水平较高有关。青海云杉叶片N:P比大于16,意味着环境为青海云杉林生长提供的可直接被吸收利用的磷含量相对氮更少^[27, 29],不同海拔N:P比变化规律也说明了这一点,即:低海拔林木密度大,生长旺盛,所需的磷含量较多,而高海拔林木密度小,生长矮化,所需的磷含量相对较少。叶片C:N比随海拔的增加而增加,这是因为叶片碳含量随海拔梯度逐渐增加,而氮含量逐渐降低所导致的,低海拔显著低于高海拔。叶片C:P比随海拔的增加先是增加而后减小,尽管叶片碳含量是逐渐增加的,说明磷含量的变化明显作用于C:P比。叶片N:P比随海拔的增加先是增加而后逐渐减小的,虽然氮含量是逐渐减小的,说明磷含量的变化很可能主导N:P比值的变化。

目前,对枯落物化学计量学的特征研究较少。青海云杉林枯落物C:N:P低于全球C:N:P比值的3007:45:1^[30]。枯落物C:N比(33.25)高于叶片C:N比(29.79),表明青海云杉林在生长的过程中,碳素和氮素更多的被植物吸收和在植物体内发生迁移,使得枯落物碳、氮含量较为缺乏,最终形成C:P比(484.07)和N:P比(13.30)低于叶片C:P比(655.70)和N:P比(22.48),除了与土壤中养分含量的大小有关之外,也与植物的生长发育变化有一定的关系,对基于计量关系来阐明养分迁移有待深入研究。此外,枯落物C:N比大于25,这对微生物而言是氮限制性的,

表明青海云杉枯落物分解速率较慢^[31],有利于养分的贮存。枯落物碳、氮、磷生态化学计量比均表现为C:P>C:N>N:P,说明青海云杉林植物氮含量偏高,磷含量偏低。枯落物C:N比随海拔的增加逐渐增加,而后在海拔3 300 m降低,这由不同海拔梯度上的碳、氮含量的变化决定的。枯落物C:P比和N:P比随海拔增加没有明显的变化规律,总体而言,低海拔2 900 m显著低于其他海拔,很大程度上取决于磷素含量。

与全球不同生态系统土壤C:N:P的平均水平(186:13:1)相比^[32],祁连山青海云杉林土壤C:N比(15.03)均值高于全球平均水平,也高于中国土壤的平均值(14.4)^[31]。而且C:N比大部分在15~25,表明土壤有机质的矿质化和腐殖质化明显^[33],不同海拔间的C:N比差异性不显著,可能是土层取样较浅,未深入到矿物层的缘故。C:P比(194.1)高于全球平均水平,也高于中国平均水平(136)^[33],较高的C:P比是磷有效性低的一个指标,这从另一个方面验证了土壤磷的缺乏。N:P比(12.26)与全球平均水平较为接近,但高于中国平均水平(9.3)^[33],很大程度上由研究区低的磷含量决定的。本研究表明,土壤的C:N、C:P和N:P比均低于叶片和枯落物,这与青海云杉林对土壤碳、氮、磷等营养元素的选择性吸收有一定关系^[34]。尽管随海拔增加,土壤C:N比逐渐增加,这主要由碳含量决定的,不同海拔土壤C:N比差异性不显著,C:N比维持相对稳定,验证了不同生态系统土壤C:N比相对稳定的结果^[35]。土壤C:P和N:P比随海拔增加均是先增加而后逐渐减小的,仅海拔2 900 m显著低于其他海拔梯度C:P比,主要是海拔2 900 m低的碳、氮含量和频繁的人为干扰及高海拔相对较高的磷含量决定的。

进行相关性分析可以揭示不同组分碳氮磷生态化学计量比指标变量之间的协调关系,有助于对养分之间的耦合过程做出合理的解释。不同海拔叶片与枯落物、叶片与土壤及枯落物与土壤的C:N比均呈极显著或显著正相关,说明土壤碳、氮主要来源于枯落物,而枯落物又直接来源于叶片,且腐解程度不高,导致叶片和枯落物有较好的相关性。叶片与枯落物和枯落物与土壤的C:P比均呈极显著或显著负相关,表明叶片在凋落之前未能将养分转移至活的有机体上或者转移较少,枯落物养分损失减

少, 尤其是磷素养分, 尽管枯落物保留了大量磷素养分, 但是归还至土壤中的磷素也较少, 说明枯落物分解缓慢, 处于一种稳定状态, 与研究区地处亚高寒山地环境有一定的关系, 还有可能就是分布在枯落物周围附近的苔藓植物对微生物活性的抑制作用, 不仅影响苔藓自身的凋落物的降解, 而且也抑制了青海云杉凋落物的分解^[36]。叶片与土壤C:P比及不同组分N:P比之间相关性均不显著, 由于碳一般不为植物生长的限制因子^[37], 很可能是土壤中磷供应量不足尤其是真正为植物吸收利用的有效磷影响植物体中的磷含量, 即植物磷素与土壤磷耦合性较差缘故。氮和磷是植物生长过程中最常见的限制性元素^[38]。通过比较发现, 青海云杉林枯落物C:N、C:P比高于低纬度和高温地区喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物养分的C:N比(23.72)、C:P比(484.0), 而N:P比低于喀斯特峰丛洼地N:P比(18.00)^[39]。南方森林由于低纬度和高温的影响, 植物的养分含量较低纬度地区低, 再吸收作用强度相对较强。可见, 不同地区的植物再吸收功能对凋落物的碳、氮、磷含量及C:N:P比值的影响是比较大的, 但是影响程度有差异, 祁连山区青海云杉林相对弱一些。

4 结 论

祁连山不同海拔梯度上的青海云杉林叶片—枯落物—土壤等不同组分中, 叶片、枯落物和土壤的碳、氮、磷含量随海拔梯度增加的变化规律和差异显著性各不相同, 不同海拔梯度青海云杉林的叶片和枯落物的碳、氮、磷含量均显著大于土壤的碳、氮、磷含量, 其中叶片和枯落物的碳、氮含量均值大小表现为叶片>枯落物>土壤, 而磷含量均值大小表现为枯落物>叶片>土壤。因不同组分的碳、氮、磷含量的差异性, 使得C:N、C:P和N:P比随海拔梯度增加的变化规律和差异显著性也各不相同, 不同海拔梯度青海云杉林C:N比均值表现为枯落物>叶片>土壤, C:P、N:P比均值表现为叶片>枯落物>土壤。相关性分析表明, 叶片、枯落物和土壤C:N比两两均具有显著正相关($p < 0.05$), 叶片与枯落物及土壤与枯落物C:P比均具有显著负相关($p < 0.05$), 叶片与土壤C:P比及不同组分N:P比之间相关性均不显著($p > 0.05$)。该研究结果有助于了解碳、氮、磷

元素在青海云杉林种群不同组分间的相互作用规律与机制, 进而更好地理解其潜在生态学过程或影响机理。

参 考 文 献

- [1] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31 (23) : 7119—7124
Wang W Q, Xu L L, Zeng C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (23) : 7119—7124
- [2] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. Ecology Letters, 2000, 3 (6) : 540—550
- [3] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片C、N、P化学计量特征. 植物生态学报, 2012, 36 (10) : 1054—1061
Li Z, Han L, Liu Y H, et al. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China (In Chinese). Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36 (10) : 1054—1061
- [4] 张明军, 周立华. 祁连山水源涵养林生态系统服务价值估算. 甘肃林业科技, 2003, 28 (1) : 7—9
Zhang M J, Zhou L H. The forest ecosystem service and their valuation on Qilian Mountain (In Chinese). Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2003, 28 (1) : 7—9
- [5] 王国宏, 杨利民. 祁连山北坡中段森林植被梯度分析及环境解释. 植物生态学报, 2001, 25 (6) : 733—740
Wang G H, Yang L M. Gradient analysis and environmental interpretation of woody plant communities in the middle section of the northern slopes of Qilian Mountain, Gansu, China (In Chinese). Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25 (6) : 733—740
- [6] Hu Q W, Song M H, Ouyang H, et al. Variations in Leaf N, P of *Picea crassifolia* along the altitude gradient in Qilian Mountains. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2000, 27 (10) : 2072—2079
- [7] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素. 应用生态学报, 2009, 20 (3) : 518—524
Zhang P, Zhang T, Chen N L. Vertical distribution patterns of soil organic carbon and total nitrogen and related affecting factors along northern slope of Qilian Mountains (In Chinese). Chinese Journal of Applied

- Ecology, 2009, 20 (3): 518—524
- [8] 刘鹤, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性. 生态学报, 2008, 28 (5): 2390—2391
Liu H, Zhao W Z, He Z B, et al. Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian Mountain (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (5): 2390—2391
- [9] 刘翠玲, 潘存德, 吴晓勇, 等. 新疆喀纳斯树种丰富度垂直格局特征. 生态学杂志, 2009, 28 (2): 203—208
Liu C L, Pan C D, Wu X Y, et al. Distribution pattern of tree species richness along an altitudinal gradient in Kanas of Xinjiang (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2009, 28 (2): 203—208
- [10] 白登忠. 祁连山青海云杉林线树木生长、更新的影响因素研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2012
Bai D Z. The impact factors of growth and regeneration of *Picea crassifolia* growing at timberline in the Qilian Mountains (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [12] Dawson T P, Curran P J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19: 2133—2139
- [13] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408: 578—580
- [14] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168 (2): 377—385
- [15] 陈步峰, 吴统贵, 肖以华, 等. 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, 2010, 34 (1): 58—63
Chen B F, Wu T G, Xiao Y H, et al. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China (In Chinese). Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34 (1): 58—63
- [16] Luo T X, Zhang L, Zhu H Z, et al. Correlations between net primary productivity and foliar carbon isotope ratio across a Tibetan ecosystem transect. Ecography, 2009, 32 (3): 526—538
- [17] 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等. 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化. 生态学报, 2013, 3 (12): 3594—3601
Hu Q P, Guo Z H, Sun L L, et al. Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal variation (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2013, 3 (12): 3594—3601
- [18] 胡启武, 吴琴, 张锋, 等. 祁连山青海云杉林树线温度特征. 干旱区地理, 2009, 32 (5): 698—702
Hu Q W, Wu Q, Zhang F, et al. Treeline temperature of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains (In Chinese). Arid Land Geography, 2009, 32 (5): 698—702
- [19] 杨曾奖, 曾杰, 徐大平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素. 生态环境, 2007, 16 (2): 649—654
Yang Z J, Zeng J, Xu D P, et al. The processes and dominant factors of forest litter decomposition: A review (In Chinese). Ecology and Environment, 2007, 16 (2): 649—654
- [20] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 1—67
- [21] 汤璐瑛. 木本植物叶片养分重吸收研究. 北京: 北京大学, 2012
Tang L Y. Nutrient resorption proficiency and efficiency of woody plants (In Chinese). Beijing: Beijing University, 2012
- [22] 刘蕾, 申国珍, 陈芳清, 等. 神农架海拔梯度上4种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态. 生态学报, 2012, 32 (7): 2142—2149
Liu L, Shen G Z, Chen F Q, et al. Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (7): 2142—2149
- [23] 邵梅香. 南亚热带红椎与西南桦生态化学计量学特征研究. 南宁: 广西大学, 2012
Shao M X. Ecological stoichiometry characteristics of *Castanopsis hystrix* and *Atula alnoides* in south subtropical area of China (In Chinese). Nanning: Guangxi University, 2012
- [24] 胡启武, 欧阳华, 刘贤德. 祁连山北坡垂直带土壤碳氮分布特征. 山地学报, 2006, 24 (6): 654—661
Hu Q W, Ouyang H, Liu X D. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen along the altitudinal belt in the northern slope of Qilian Mountains (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2006, 24 (6): 654—661
- [25] 张春娜, 延晓冬, 杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, 26 (5): 572—579
Zhang C N, Yan X D, Yang J H. Estimation of

- nitrogen reserves in forest soils of China (In Chinese). Journal of Southwest Agricultural University (Natural Sciences), 2004, 26 (5): 572—579
- [26] Hobbie S E, Gough L. Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska. *Oecologia*, 2002, 131: 453—462
- [27] G ü sewell S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164: 243—266
- [28] 王顺利, 王金叶, 张学龙, 等. 祁连山青海云杉林苔藓枯落物分布与水文特性. *水土保持研究*, 2006, 13 (5): 156—159
Wang S L, Wang J Y, Zhang X L, et al. Distribution of withered litters of moss and hydrographic characteristics in the *Picea crassifolia* forestry on Qilian Mountain (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13 (5): 156—159
- [29] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的N : P化学计量特征. *植物生态学报*, 2008, 32 (1): 13—22
Yan E R, Wang X H, Zhou W. N : P stoichiometry in secondary succession in evergreen broad-leaved forest, Tiantong, East China (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32 (1): 13—22
- [30] Redfield A. The biological control of chemical factors in the environment. *Science*, 1958, 46: 205—221
- [31] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制. *生态学报*, 2013, 33 (5): 1337—1346
Wang J Y, Zhang X Y, Wen X F, et al. The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (5): 1337—1346
- [32] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ration” for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85: 235—252
- [33] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2009, 98 (1/3): 139—151
- [34] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 133—142
Yang J J, Zhang X R, Ma L S, et al. Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 133—142
- [35] Chapin S F III, Matson P, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology. New York: Springer Verlag, 2002
- [36] 田维莉, 孙守琴. 苔藓植物生态功能研究新进展. *生态学杂志*, 2011, 30 (6): 1265—1269
Tian W L, Sun S Q. Ecological functions of bryophyte: Recent research progress (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30 (6): 1265—1269
- [37] Hendricks J J, Aber J D, Nadelhoffer K J, et al. Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems. *Ecosystems*, 2003, 3 (1): 57—69
- [38] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, 13 (2): 87—115
- [39] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物C : N : P生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31 (2): 335—343
Pan F J, Zhang W, Wang K L, et al. Litter C : N : P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (2): 335—343

Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains

ZHAO Weijun^{1, 2, 3} LIU Xiande^{1, 2, 3} JIN Ming^{1, 3} ZHANG Xuelong^{1, 2, 3} CHE Zongxi^{1, 3}

JING Wenmao^{1, 3} WANG Shunli^{1, 3} NIU Yun^{1, 3} QI Peng⁴ LI Wenjing¹

(1 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)

(2 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

(3 Gansu Science and Technology Innovation Service Platform of Ecology in Qilian Mountains, Gansu Province, Academy of Ecology Science of Zhangye, Zhangye, Gansu 734000, China)

(4 College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Ecological stoichiometric ratios of C, N and P are important indices characterizing process and functions of a forest ecosystem. *Picea crassifolia* is an important constructive or dominant species of the subalpine mountain forest vegetation in the Qilian Mountains, and its forest is a typical kind of water conservancy forest. Based on field survey and laboratory analysis, the objective of this study with the *Picea crassifolia* forest in the Pailugou watershed of the Qilian Mountains selected as subject, the leaf, litters and soil at different elevation gradient (2 900 ~ 3 300 m) were selected to measure their organic carbon (C), total nitrogen (N) and total phosphorous (P) contents, carried out on ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphate in the leaf-litters-soil systems of the *Picea crassifolia* forest different in elevation gradient and their correlations using the principles and methodology of ecological stoichiometry. Results show that carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios of *Picea crassifolia* forest in elevation gradient indicate that different variation laws and significance of difference with altitude increasing. Among them, C : N ratio in leaf and soil of *Picea crassifolia* forest increased gradually, C : N ratio in litter increased gradually with the increase of altitude and then decreased at 3 300 m. C : P ratio in leaf first increase and then decrease, at an altitude of 2 900 m was significantly lower than other altitude C : P ($p < 0.05$). C : P ratio in litter has no obvious change. C : P ratio in soil first increases and then decreases, only at an altitude of 2 900 m was significantly lower than other altitude C : P ($p < 0.05$). N : P ratio in leaf and soil first increases and then decreases, the N : P ratio of the low altitude (2 900 ~ 3 100 m) was significantly higher than that of the high altitude (3 200 ~ 3 300 m) ($p < 0.05$). In this systems along the elevation gradient, C : N ratio in leaf, litters and soil varied in the range of 22.95 ~ 36.72, 21.41 ~ 41.61 and 12.41 ~ 20.70, respectively, and in terms of average of the ratios, the three components of the system followed an order of litters > leaf > soil; C : P ratio did in the range of 510.2 ~ 739.8, 398.6 ~ 698.1 and 134.1 ~ 219.7, respectively, and N : P ratio did in the range of 18.13 ~ 26.86, 6.71 ~ 26.28 and 7.96 ~ 16.56, respectively, and in terms of average of either N : P or C : N ratio, the three followed an order of leaf > litters > soil. All the ratios in all the three components varied sharply with rising altitude, except for soil C : N ratio, which did not as much ($p > 0.05$). Three components were significantly positively related ($p > 0.05$) to each other in C : N ratio, while both leaf and soil were negatively related to litters in C : P ratio ($p > 0.05$). And the relationships of leaf with soil C : P ratio and with litters and soil in N : P

ratio were not obvious ($p > 0.05$). The findings of the study help further understand interactions between carbon, nitrogen and phosphorus in the three components of the *Picea crassifolia* forest system and their laws and mechanisms.

Key words *Picea crassifolia* forest; Soil; Leaf; Litter; Ecological stoichiometry

(责任编辑：卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu (290)
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. (303)

Insights and Perspectives

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science CAI Zucong, HUANG Xinqi (310)

Research Articles

- Element Migration in S₃ Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication CHU Chunjie, ZHAO Jingbo (320)
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. (330)
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared (VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. (340)
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. (353)
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. (363)
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. (373)
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. (386)
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang (399)
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong (409)
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. (419)
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. (426)
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. (436)
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao (448)
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. (455)
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. (466)
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. (475)
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. (488)
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ZHENG Yan, JIA Zhongjun (500)
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. (508)
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. (521)
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. (531)
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. (542)

Research Notes

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. (550)
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. (559)

Cover Picture: Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation (by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu)

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：卢 萍 檀满枝 陈荣府

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008
电话：025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717
电话：010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

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

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

