

# 雪岭云杉林土壤—叶片碳、氮化学计量特征对 NDVI 及环境因子的响应

宋昕妮<sup>1,2</sup>, 许仲林<sup>1,2</sup>, 李 路<sup>1,2</sup>, 常亚鹏<sup>1,2</sup>, 罗庆辉<sup>1,2</sup>

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2.新疆大学 资源与环境科学学院 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘 要:**为了阐明不同生长环境下,土壤对植物营养元素的供应以及植物的生长状况,我们以天山雪岭云杉林为研究对象,运用多元回归分析探究了不同海拔高度上土壤和叶片碳(C)、氮(N)化学计量特征对环境因子的响应,以及土壤 C、N 含量对叶片 C、N 含量的影响。结果表明:土壤 C 含量的变化范围是 15.86~84.14 g/kg,平均值为 43.18 g/kg;土壤 N 含量的变化范围是 0.13~0.54 g/kg,平均值为 0.28 g/kg;土壤 C:N 的变化范围是 70.86~343.90,平均值为 164.27;叶片 C、N 含量的变化范围是 321.90~598.96,0.69~17.07 g/kg,平均值分别为 471.98,6.71 g/kg;叶片 C:N 的变化范围是 28.49~217.10,平均值为 83.22。叶片 C 含量、土壤 N 含量对海拔的响应显著,除此以外,其他均与海拔之间无显著的响应。多元回归分析表明年均温度(MAT)和年降水量(MAP)对土壤 C、N 影响显著,但主要贡献来自于 MAT,坡向和 NDVI 对土壤 C、N 的影响均显著,土壤 C:N 对 MAT、MAP、坡向、NDVI 的响应均不明显;叶片 C、N 与 MAT、MAP 之间的相关性不显著,NDVI 对叶片 C 有显著的影响,土壤 C、N 对叶片 C、N 的影响显著,叶片 C、N 与环境因子及土壤 C、N 化学计量特征均无显著相关性。

**关键词:**生态化学计量;多元回归分析;NDVI;解释程度

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0069-08

## Responses of Stoichiometric Characteristics of Soil and Leaf Carbon and Nitrogen in *Picea schrenkiana* Forests to NDVI and Environmental Factors

SONG Xinni<sup>1,2</sup>, XU Zhonglin<sup>1,2</sup>, LI Lu<sup>1,2</sup>, CHANG Yapeng<sup>1,2</sup>, LUO Qinghui<sup>1,2</sup>

(1.College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2.Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** In order to clarify the supply of nutrient elements and the growth status of plants in different growing environments, we studied the response of stoichiometric characteristics of soil and leaf Carbon (C), nitrogen (N) to environmental factors at different altitudes, and the effect of contents of soil C, N on contents of leaf C and N by using multiple regression analysis. The results showed that the variation range of soil C were 15.86~84.14 g/kg and the average was 43.18 g/kg, and the variation range of soil N were 0.13~0.54 g/kg, and the average was 0.28 g/kg, the variation range of soil C:N was 70.86~343.90 and the average value was 83.22; and the variation ranges of leaf C, N were 321.90~598.96 g/kg and 0.69~17.07 g/kg, respectively, and the average values were 471.98, 6.71 g/kg, respectively, the variation range of leaf C:N were 28.49~217.10, and the average was 83.22; there were no significant differences in stoichiometric characteristics of C and N of soil and leaf with elevation except for soil N and leaf C; the multiple regression showed that annual mean temperature (MAT) and annual precipitation (MAP) had significant effects on soil C and N, but the main contribution came from MAT, and the effects of aspect and NDVI on soil C and N were significant, but the response of soil C:N to MAT, MAP aspect and NDVI was not insignificant, the

收稿日期:2019-05-08

修回日期:2019-06-05

资助项目:国家自然科学基金“天山北坡雪岭云杉林自然恢复过程中土壤有机碳的积累过程及影响因素”(41361098)

第一作者:宋昕妮(1995—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为环境与气候建模。E-mail:374279168@qq.com

通信作者:许仲林(1982—),男,青海乐都人,副教授,硕士生导师,主要从事 GIS 与环境建模研究。E-mail:galinwa@gmail.com

correlation between leaf C, N and MAT, MAP was no significant, but there was significant correlation between leaf C and NDVI; There was significant response of leaf C, N to soil C, N, however, there was no significant correlation between leaf C : N and environmental factors and soil C and N stoichiometry characteristics.

**Keywords:**eco-stoichiometry; multiple regression analysis; NDVI; degree of interpretation

近几年来,生态化学计量学得到了广泛的研究<sup>[1-2]</sup>,目前已经形成从基因到生物圈各个环节的研究体系。生态化学计量学主要研究有机体内碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素的比值,是研究生态系统中各组成部分相互作用过程中营养元素之间多重平衡关系的科学。C、N是植物体的构建和促进植物新陈代谢过程的重要元素<sup>[3]</sup>,与P元素共同参与了碳水化合物、酶、纤维素等代谢过程<sup>[4]</sup>。相关研究表明,植物在不同环境条件的影响下,通过各种生理反应调节C、N的代谢<sup>[5]</sup>,从而使得其与土壤之间的元素交换量发生改变。Sardans等<sup>[6]</sup>研究表明气候变暖和干旱使得土壤C和N浓度发生改变。He等<sup>[7]</sup>研究表明中国沙漠植物叶片的C和N浓度受温度的影响,但不受降水的影响。除此之外,包括坡向在内的地形因素可能通过影响土壤的微气候及水热条件,引起土壤条件的变化,进而影响土壤以及植物体叶片等组分C、N、P养分含量及相对比例<sup>[8]</sup>,因此地形因素也是影响土壤和植物体养分含量和生态化学计量特征的因子之一<sup>[9-11]</sup>。

目前对于土壤和叶片C、N、P含量及其化学计量特征已有大量研究<sup>[12-13]</sup>,其化学计量比的相关性分析揭示出不同组分C、N、P及其化学计量指标的协调关系,有助于对养分之间的限制情况做出合理解释,相关学者还探究了化学计量特征与温度和降水的关系,但对于地形因子和植被指数与生态化学计量特征关系的研究较少,限制了对生态化学计量特征及其影响因子的理解。目前关于天山雪岭云杉林土壤和叶片C、N化学计量随海拔变化特征的研究已有报道<sup>[14]</sup>,但对于土壤和叶片C、N化学计量与环境因素的研究较少。本文以天山雪岭云杉林土壤和叶片为研究对象,探究土壤和叶片C、N化学计量与年均温度(MAT)、年降水量(MAP)、海拔、坡向、NDVI之间的关系,以及土壤C、N化学计量对植物叶片C、N含量的影响,从而更好地了解土壤C、N和叶片C、N含量的影响因素,探讨土壤和植物叶片C、N之间的相关性,揭示雪岭云杉林种群内C、N的制约因素和相互作用规律。

## 1 研究区概况与数据分析

### 1.1 研究区域概况

本文研究区为天山山脉,位于塔克拉玛干沙漠以

北,准格尔盆地南缘,东经 $80^{\circ}$ — $94^{\circ}$ ,北纬 $42^{\circ}$ — $45^{\circ}$ ,是典型的温带大陆性干旱气候。天山山脉北坡地形复杂多样,最高海拔为7 448.3 m,平均海拔约4 000 m。天山由西向东横跨新疆境内,年均温度为 $-0.66\sim 3.75^{\circ}\text{C}$ ,气温年较差相对较大,降水量丰富,降水多集中在夏季。天山北坡的土壤类型以灰褐土为主,植被类型多样,雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林主要分布于天山北坡1 400~2 800 m的中低山—亚高山地带。

### 1.2 数据采集与分析

本研究于2015—2017年的6月、7月份进行土壤和叶片样本的采集工作(图1)。在雪岭云杉林分布区,按照海拔高度从低到高进行采样。在每个样地设置20 m×20 m的样方,在样方内按照“品”字形选择3个采样点,用土钻采集土壤样本,并装入密封袋。在每个样地3个土壤采样点周围随机选取长势相近的雪岭云杉林个体,均匀地采集植物不同方向中上部位的健康叶片,并装入信封袋内。土壤样品带回实验室自然风干,研磨后过100目筛。将叶片样本带回实验室,在烘箱内 $105^{\circ}\text{C}$ 杀青10 min,然后在 $65^{\circ}\text{C}$ 环境下烘干,直至到恒重,将叶片磨碎并过100目筛装入密封袋内。土壤和叶片有机C采用重铬酸钾氧化—外加热法测定;土壤和叶片全N、全P采用Smart-chem 2000分析仪进行测定。

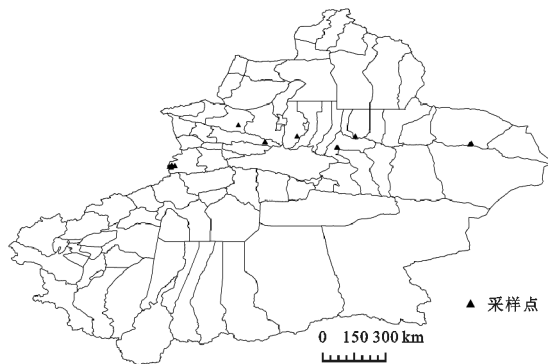


图1 土壤采样点分布

### 1.3 气象数据

本研究使用的温度和降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的新疆维吾尔自治区内54个基本气象站点1984—2013年的日气温和日降水数据,首先对数据的完整性进行检查,并剔除重复、缺失和错误的数据,然后利用Excel 2010将日数据处理成30 a平均气温和降

水的数据。插值所用的 DEM 数据为空间分辨率为 90 m 的 STRM(Shuttle Topography Mission)数据(<http://www.gscloud.cn/>)。54 个气象站的空间分布如图 2 所示。

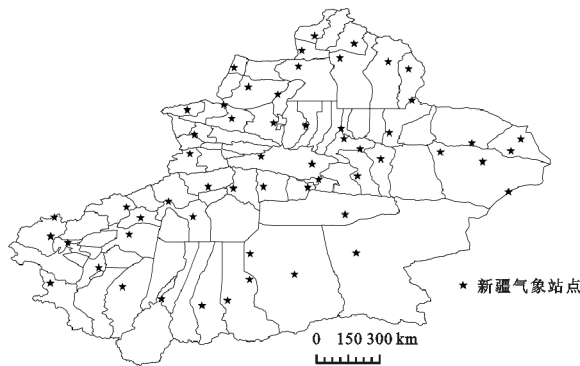


图 2 新疆气象站点分布

应用 ANUSPLIN 软件进行处理时需要标准格式的数据,因此,需要将固有格式存储的气象要素数据进行转换,生成文本文件,如果生成的文件格式错误,将会导致程序执行中断或出现错误提示信息。将处理过后的 54 个站点的平均气温和降水数据分别存为一个 MS DOS 文本文件,文中的数据包括站点号、经度、纬度、海拔和气象要素值,并以 ANUSPLIN 标准格式书写。利用 ANUSPLIN 软件采用薄盘样条法(TPS, Thin Plate Spline)进行空间插值<sup>[15]</sup>,得到 1984—2013 年平均气温和降水的栅格数据,其中分辨率为  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。

1.4 数据处理

将研究区域坡向以  $22.5^{\circ}$  为一个单元等距划分,依据坡向分级标准<sup>[16]</sup>划分为:阴坡(北  $337.5^{\circ}\text{--}22.5^{\circ}$  和东北  $22.5^{\circ}\text{--}67.5^{\circ}$ )、半阴坡(东  $67.5^{\circ}\text{--}112.5^{\circ}$ 、西北  $292.5^{\circ}\text{--}337.5^{\circ}$ )、阳坡(南  $157.5^{\circ}\text{--}202.5^{\circ}$  和西南  $202.5^{\circ}\text{--}247.5^{\circ}$ )和半阳坡(东南  $112.5^{\circ}\text{--}157.5^{\circ}$  和西  $247.5^{\circ}\text{--}292.5^{\circ}$ )。本研究采样的坡向主要分布在阴坡、半阴坡、半阳坡(表 1)。

本研究使用的 90 m 分辨率坡向数据(SRTMASPECT)

和 NDVI 数据来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)网站,利用 ArcGIS 对 NDVI 数据进行处理,与采样样地尺度上相统一,然后利用采样点经纬度提取样地的坡向、NDVI 以及 MAT 和 MAP 数据信息。利用 Excel 2010 整理数据并进行统计分析,采用 SPSS 22.0 进行数据之间的多元回归分析和偏相关分析。

表 1 采样点坡向的分布

项目	阴坡	半阴坡	阳坡	半阳坡
样地数占比/%	50	26	4	20

2 结果与分析

2.1 土壤和叶片 C,N 化学计量随海拔高度的变化

从表 2、图 3 可以看出,土壤 C 含量的变化范围是  $15.86\sim 84.14\text{ g/kg}$ ,平均值为  $43.18\text{ g/kg}$ ,变异系数为  $38.41\%$ ;土壤 N 含量的变化范围是  $0.13\sim 0.54\text{ g/kg}$ ,平均值为  $0.28\text{ g/kg}$ ,变异系数为  $38.27\%$ ;土壤 C:N 的变化范围是  $70.86\sim 343.90$ ,平均值为  $164.27$ ,变异系数为  $23.33\%$ 。土壤 C 含量、C:N 在海拔高度上并没有表现出显著的变化趋势,而 N 含量随着海拔的升高显著上升( $p<0.05$ )。叶片 C,N 含量的变化范围分别是  $321.90\sim 598.96, 0.69\sim 17.07\text{ g/kg}$ ,平均值分别为  $471.98, 6.71\text{ g/kg}$ ,变异系数分别为  $14.50\%, 42.09\%$ ;叶片 C:N 的变化范围是  $28.49\sim 217.10$ ,平均值为  $83.22$ ,变异系数为  $46.74\%$ 。叶片 C 含量随着海拔高度的增加呈现出极显著的增加趋势( $p<0.001$ ),N 含量、C:N 与海拔高度之间并没有显著的相关性。变异系数(Coefficient of Variation, CV)用来衡量观测数据离散程度的大小,一般来说,变量值平均水平高,其离散程度的测度值越大,即说明观测的空间变异性较大。本研究中,土壤 C,N 化学计量特征的整体空间变异性情况为  $C>N>C:N$ ,叶片 C,N 化学计量特征的整体空间变异性情况为  $C:N>N>C$ 。

表 2 土壤与叶片 C 和 N 的统计分析

项目	元素	均值/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	中值/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	范围/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	变异系数/%
土壤	C	$43.18\pm 16.59$	39.08	$15.86\sim 84.14$	38.41
	N	$0.28\pm 0.11$	0.24	$0.13\sim 0.54$	38.27
	C:N	$164.27\pm 38.82$	154.76	$70.86\sim 343.90$	23.33
叶片	C	$471.98\pm 68.41$	469.40	$321.90\sim 598.96$	14.50
	N	$6.71\pm 2.82$	6.18	$0.69\sim 17.07$	42.09
	C:N	$83.22\pm 38.90$	71.61	$28.49\sim 217.10$	46.74

2.2 不同因子对土壤 C,N 化学计量特征的影响

以 MAT 和 MAP 为自变量,土壤 C 作为因变量进行多元回归分析表明(表 3—4),受 MAT 和 MAP 线性组合影响的土壤 C 占  $23\%$ ,且相关性显著( $p<0.05$ )。

由于 MAT 和 MAP 之间可能存在相关关系,利用偏相关分析判断它们对土壤 C 的影响,结果表明,MAT 对土壤 C 的影响显著。除此以外,地形因子和植被指数也可能对土壤 C 产生影响,因此,利用多元回归分析探究地

形因子(坡向)和植被指数(NDVI)对土壤 C 的影响。与引入 MAT 和 MAP 的多元回归相比,坡向也对土壤 C 产生显著影响( $p<0.05$ )。NDVI 的多元回归分析同样表明与土壤 C 的相关性显著( $p<0.05$ )。以 MAT 和 MAP 为自变量,土壤 N 作为因变量进行多元回归分析。结果表明,MAT 和 MAP 对土壤 N 变化的贡献为 19% ( $p<0.05$ )。利用偏相关分析判断 MAT 和

MAP 对土壤 N 的影响,结果表明,MAT 对土壤 N 的影响显著( $p<0.05$ )。当加入坡向时,土壤 N 变异的解释程度提高到 19%,且相关性显著( $p<0.05$ );当 NDVI 加入模型时,土壤 N 变异的解释程度提高到 26%,且与 NDVI 相关性显著( $p<0.05$ )。以土壤 C : N 作为因变量进行多元回归及偏相关分析表明,其不受 MAT、MAP、坡向、NDVI 的影响。

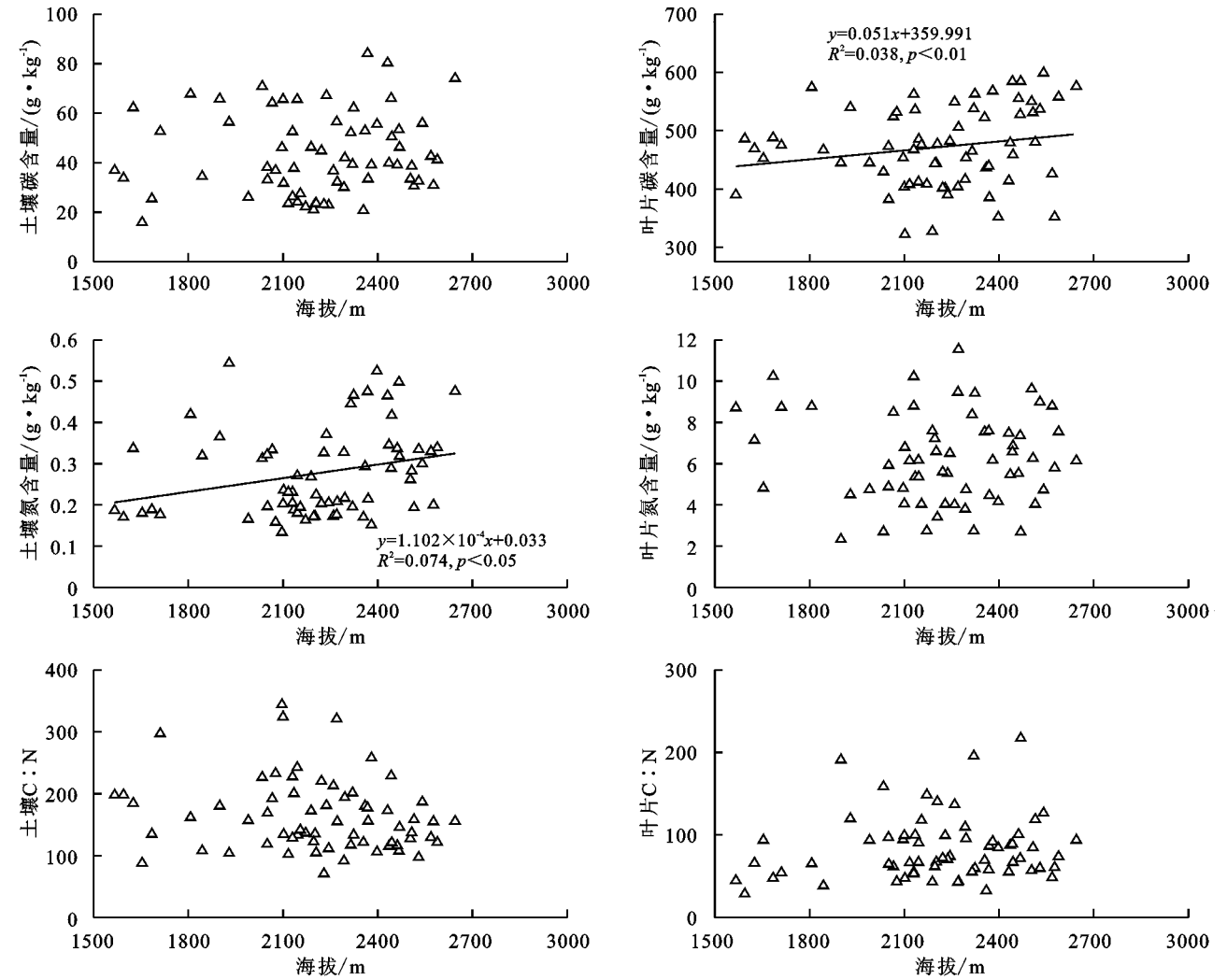


图 3 土壤和叶片 C,N 化学计量特征随着海拔的变化

表 3 土壤 C,N 化学计量特征与不同因子的多元回归分析

土壤	模型	回归系数				常数	$R^2$	Adj. $R^2$	$p$
		MAT	MAP	坡向	NDVI				
C	1	-1.674	0.035			35.43	0.23	0.18	*
	2	-1.995	0.028	-0.03		42.44	0.28	0.21	*
	3	-1.091	0.023		20.23	23.40	0.23	0.15	*
N	1	-0.002	-0.001			0.63	0.19	0.13	*
	2	-0.003	-0.001	-4.370E-5		0.64	0.19	0.10	*
	3	0.021	-0.001		0.828	0.14	0.26	0.18	*
C : N	1	4.209	-0.027			169.50	0.04	0.01	
	2	3.360	-0.045	-0.07		187.22	0.06	0.02	
	3	-3.128	0.141		-234.50	299.34	0.09	0.05	

注: \* 表示显著相关( $p<0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $p<0.01$ ),下表同。模型 1 的自变量是 MAT 和 MAP;模型 2 的自变量是 MAT,MAP 和坡向;模型 3 的自变量是 MAT,MAP 和归一化植被指数(NDVI)。



表 4 土壤 C,N 化学计量特征与气候因子的 偏相关系数及回归方程						
气候因子	C		N		C : N	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
MAT	−0.43	*	−0.42	*	0.20	
MAP	−0.31		0.06		−0.03	

注:*r* 为偏相关系数。

2.3 不同因子和土壤 C,N 化学计量特征对叶片 C, N 含量的影响

用 MAT 和 MAP 作为自变量,叶片 C 作为因变量进行多元回归分析(表 5)。结果表明,MAT 和 MAP 对叶片 C 变化的贡献仅为 12%。当加入 NDVI 时,叶片 C 变异的解释程度提高到 22%,且相关性显著

( $p<0.05$ )。由于植物叶片的营养主要来源于土壤,因此,将土壤 C 加入到模型中进行多元回归分析,结果表明,土壤 C,N 对叶片 C 变异性影响极显著,对叶片 C 变化的贡献为 21%( $p<0.01$ ),但土壤 C : N 并未对叶片 C 产生影响。用 MAT 和 MAP 作为自变量,叶片 N 作为因变量进行多元回归分析表明,MAT 和 MAP 对叶片 N 变化的影响不大。加入 NDVI 并未提高叶片 N 的变异程度,当加入土壤 C,N 时,叶片 N 变异的解释程度提高到了 60%,且相关性显著( $p<0.05$ )。叶片 N 含量同叶片 C 含量一样,不受土壤 C : N 的影响。对叶片 C : N 的分析表明,其与各环境变量及土壤 C,N 化学计量特征均为显著相关性。

表 5 叶片化学计量特征与不同因子的多元回归分析

叶片	模型	回归系数						常数	<i>R</i> <sup>2</sup>	Adj. <i>R</i> <sup>2</sup>	<i>p</i>
		MAT	MAP	NDVI	土壤 C	土壤 N	土壤 C : N				
C	4	−12.678	0.026					486.92	0.12	0.06	
	5	−8.938	−0.035	234.475				234.48	0.22	0.13	*
	6	−13.223	0.014		0.58	−3.66		467.66	0.21	0.15	**
	7	−13.359	0.020				0.08	476.54	0.10	0.06	
N	4	0.435	0.004					4.67	0.11	0.05	
	5	0.362	0.006	−4.579				7.79	0.13	0.04	
	6	0.447	0.004		−0.01	0.87		4.60	0.60	0.43	*
	7	0.438	0.004				0.001	4.72	0.08	0.04	
C : N	4	−5.716	−0.001					93.61	0.06	0.03	
	5	−4.020	−0.029	106.324				20.97	0.11	0.06	
	6	−6.224	−0.006		0.23	−34.61		95.76	0.07	0.01	
	7	−6.018	−0.003				0.04	88.99	0.07	0.02	

注:模型 4 的自变量是 MAT 和 MAP;模型 5 的自变量是 MAT,MAP 和归一化植被指数(NDVI);模型 6 的自变量是 MAT,MAP 和土壤 C,N;模型 7 的自变量是 MAT,MAP 和土壤 C : N。

3 讨论

3.1 不同因子对土壤 C,N 化学计量特征的影响分析

不同海拔的植被类型和分布、水热条件和土壤类型等存在一定差异,这些差异将影响土壤 C,N 含量的分布<sup>[17]</sup>。Tan 等<sup>[18]</sup>研究表明土壤 C 和 N 含量与海拔之间不存在任何关系。Köhler 等<sup>[19]</sup>通过对加那利群岛的研究表明土壤 N 随着海拔高度的增加并无明显的差异性。王淑芳等<sup>[20]</sup>对密云水库上游流域土壤全氮的研究表明,土壤全 N 与海拔之间存在极显著的正相关( $p<0.01$ ),土壤 C 和 N 含量与温度之间有显著的相关性。Müller 等<sup>[21]</sup>对喜马拉雅山区高寒草甸交错带沿海拔梯度的养分短缺的研究表明,土壤 C : N 随着海拔的升高而降低。本研究对天山雪岭云杉林土壤 C,N 化学计量特征进行了研究,结果表明土壤 C,C : N 与海拔无明显的变化关系,而土壤 N 随着海拔的升高呈现显著上升趋势。随着海拔的升

高,土壤温度逐渐降低,低温会使得土壤微生物量减少进而导致土壤微生物活性降低<sup>[22]</sup>,土壤中动植物残体分解速率下降,使得土壤中 N 含量增加。虽然土壤 N 含量与海拔之间存在显著关系,但是其相关性较小,这可能是因为海拔仅仅是控制土壤 N 含量变化的机理之一<sup>[23]</sup>,群落结构和植被生物量等因子也可能导致不同海拔高度上土壤 N 变化。Tian 等<sup>[24]</sup>研究表明,虽然 C 和 N 具有较大的空间变异性,但 C : N 相对稳定,并且 C : N 比受气候的影响较小<sup>[25]</sup>,与本研究的结果相一致,这可能是因为在大尺度范围中,土壤 C 和 N 的空间分布性相一致,且对同一环境的响应相同<sup>[26]</sup>。

土壤 C,N 含量的变化主要受控于植被、气候、地形、土壤理化特征等<sup>[27]</sup>。杨敏等<sup>[28]</sup>对祁连山中段土壤有机 C 影响的研究表明,环境要素对有机 C 含量的影响较为显著,并且 NDVI 是影响有机 C 含量的重要环境因子之一。杜有新等<sup>[29]</sup>研究表明坡向明显

影响着森林土壤有机 C 密度。刘旻霞等<sup>[30]</sup>研究表明不同坡向上土壤有机质的含量各不相同。本研究的多元回归分析表明, MAP 和 MAT 对土壤 C 的影响显著, 且 MAT 是主要的影响因素。温度和降水对生物量和有机物的来源有一定的影响, 而 NDVI 与生物量存在显著的相关关系<sup>[31]</sup>。水分、光照和热量等对植被类型的分布和植被生产力有一定的影响<sup>[32]</sup>, 进而影响土壤中凋落物的输入量, 其资源的分配受坡度、坡向等地形条件的影响。坡向通过影响土壤光热条件进而影响土壤 C 含量, 阴坡土壤受阳光照射时间短且强度小, 土壤水分蒸发较弱, 土壤肥料较高, 半阴坡和半阳坡土壤接受光照时间长且强度大, 植被蒸腾量较大使得有机质合成缓慢<sup>[33]</sup>。本研究中雪岭云杉林主要分布在阴坡、半阴坡和半阳坡, 不同坡向接受的光照强度不同。植物在适当的光照条件下, 才会促进光合作用, 使得更多的有机质被输送到土壤中。因此, 坡向对土壤 C 有显著影响。袁勇等<sup>[34]</sup>研究表明坡向对土壤全 N 影响不显著, 对土壤 pH 值和土壤全钾质量分数有显著影响。李燕丽等<sup>[35]</sup>研究表明 NDVI 与有机质和全 N 变化均具有显著正相关关系。本研究结果表明, 坡向和 NDVI 与土壤全 N 具有显著正相关关系。由于本研究尺度较大, 能够体现出气候因子的地带性, 气候对土壤物质的迁移转化有一定的影响, 并且决定着母质分化的强度<sup>[36]</sup>。因此, 土壤 N 含量与气候之间存在显著的相关关系。由于坡向对光照和降水均有影响, 进而影响森林土壤微生物活性。因此, 不同坡向土壤全 N 的分解和转化速率不同。

### 3.2 不同因子和土壤 C、N 化学计量特征对叶片 C、N 化学计量特征的影响分析

植物叶片元素与环境因子之间关系密切<sup>[37]</sup>。Hoch 等<sup>[38]</sup>对全球山脉范围的研究结果表明, 叶片 C 随着海拔的升高呈现出显著的上升趋势。赵维俊等<sup>[39]</sup>对祁连山青海云杉林叶片的研究表明, 叶片碳含量随海拔增加而增加, 这与本研究结果相一致。Wen<sup>[40]</sup>对鼎湖山的研究表明叶片 N 随着海拔(10~1 000 m)的升高而下降, 而 Han 等<sup>[41]</sup>的研究表明随着纬度的增加, 年均温度降低, 从而使得植物叶片 N、P 含量增加, Woodward<sup>[42]</sup>认为叶片 N 含量在草本和落叶木本植物中随着海拔上升而增加, 任书杰等<sup>[43]</sup>研究表明叶片 N 含量与纬度和年均温度之间存在极显著的相关性。相关研究表明, 植物叶片 C:N 随海拔高程的增大而减小<sup>[44]</sup>。本研究表明, 雪岭云杉林叶片 N 含量、C:N 与海拔高度无显著关系。研究区降水量随着海拔的升高而增加, 但温度随着海拔的升

高逐渐降低, 使得高海拔地区的土壤水分的有效性降低, 导致雪岭云杉林叶片的气孔导度降低, 叶片的 C 含量得到积累。根据温度与植物生理的假说可知, 温度降低影响植物体内酶活性从而导致植物生理生化反应的降低<sup>[45]</sup>。在高海拔低温的条件下, 植物需要较高的 N 含量抵抗温度对代谢的抑制作用<sup>[46]</sup>。而在低海拔中, 气温升高也会导致植物吸收更多的氮素。因此, 海拔对叶片 N 含量无显著影响。在不同海拔高度的生态系统中, 植物对 C 和 N 的吸收利用较为复杂, 环境的改变会导致其利用效率的改变, 因此, 叶片 C:N 对海拔的响应不明显。

不同环境因子对植物叶片特征的贡献显著不同<sup>[47]</sup>。相关研究表明, NDVI 与植物生物量之间存在明显的相关关系<sup>[48]</sup>。因此, NDVI 是反映植物生产的标志之一。苏凯文等<sup>[49]</sup>研究表明, 叶片 C 含量与生物量的相关关系极显著, 而叶片 N 与生物量无显著相关性。土壤是植物营养元素的重要来源, 其养分的分布和变化状况直接影响植物的生长<sup>[50]</sup>。王绍强等<sup>[51]</sup>研究表明土壤与植物在养分供应与需求之间通过动态交换达到平衡。本研究表明, NDVI 对叶片 C 有显著影响, 而叶片 N 与 NDVI 之间无显著相关关系; 土壤 C、N 含量对叶片 C、N 含量有显著影响。由于 NDVI 是影响植物生物量的因素之一, 因此, 其能够通过影响生物量来影响叶片 C 的含量。植物与土壤在地球化学循环之间存在必然的联系, 植物通过土壤吸收养分, 同时又以凋落物的形式将 C、N、P 归还土壤<sup>[52]</sup>, 因此, 其二者的元素特征具有一定的相关性。植物与土壤营养元素的转化是一个相对复杂的过程, 因此, 气候和地形因子仅是影响其变异程度的部分因素。在今后的研究中, 还需进一步研究土壤理化因子等因素对土壤和植被叶片的影响。

## 4 结论

(1) 研究区土壤 C 含量高于全国 C 含量平均水平(25.71 g/kg), 说明雪岭云杉林的碳蓄积能力较强, 具有较大的碳汇能力。土壤 N 含量不仅低于全国平均水平, 还低于邻近的青海云杉林, 叶片 N 含量低于中国陆生植物叶片的 N 含量(20.2 g/kg), 这说明雪岭云杉林的生长可能受到了 N 的限制。不同海拔梯度土壤和叶片 C、N 的空间变异性呈现差异, 由变异系数可知, 土壤 C、N 化学计量特征变异性最大的是 C, C:N 的空间变异性相对较小。土壤 C 容易受到气候的影响, 因此其变化程度较大。叶片化学计量特征变异性表现为 C:N>N>C。这是由于雪岭云杉林的生长过程缓慢, 使得叶片进行光合作用的速

率较低,造成了 C 含量累积。

(2) 研究区叶片 C 含量和土壤 N 含量与海拔之间呈显著正相关关系,其他对海拔的响应均不明显。多元回归分析和偏相关回归结果表明土壤 C、N 含量主要受 MAT、坡向和 NDVI 的影响,而土壤 C : N 对环境因子的响应不显著。这主要是因为研究区位于西北干旱区,森林的生态系统循环过程与气候和地形条件有直接的关系,土壤 C、N 化学计量特征对环境因子的响应使得其本身变化复杂。而土壤 C : N 比随环境因子变化的空间分布性一致,导致了其空间变异性较小。

(3) 多元回归分析显示土壤 C、N 对叶片 C、N 含量的贡献率均显著,植物生长所需的养分来源于土壤,叶片又会以枯落物的形式为土壤补给养分,土壤中的养分含量会直接关系到叶片含量。由此可见,叶片和土壤含量是相互影响且相互制约的。土壤养分可以反映出植物的利用效率,而叶片含量可以反映出土壤养分有效性的差异。

#### 参考文献:

- [1] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2007,10(12):1135-1142.
- [2] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 2002.
- [3] Waal D B V D, Verschoor A M, Verspagen J M H, et al. Climate-driven changes in the ecological stoichiometry of aquatic ecosystems [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010,8:145-152.
- [4] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change [J]. *New Phytologist*, 2010,186(3):593-608.
- [5] 王振南,杨惠敏.植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应[J].*草业科学*,2013,30(6):927-934.
- [6] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008,39(2):223-235.
- [7] He M, Dijkstra F A, Zhang K, et al. Leaf nitrogen and phosphorus of temperate desert plants in response to climate and soil nutrient availability [J]. *Scientific Reports*, 2014,4.DOI:10.1038/srep06932.
- [8] Zak D R, Hairston A, Grigal D F. Topographic influences on nitrogen cycling within an upland pin oak eco-

system [J]. *Forest Science*, 1991,37(1):45-53.

- [9] 林兰稳,余炜敏,肖振奇,等.沙罗竹人工林生长与立地条件的关系研究[J].*生态环境学报*,2011,20(1):88-90.
- [10] Badgery W B, Simmons A T, Murphy B M, et al. Relationship between environmental and land-use variables on soil carbon levels at the regional scale in central New South Wales, Australia [J]. *Soil Research*, 2013,51(7/8):645-656.
- [11] 李婷,邓强,袁志友,等.黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J].*环境科学*,2015,36(8):2988-2996.
- [12] 安申群,贡璐,李杨梅,等.塔里木盆地北缘绿洲 4 种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系[J].*环境科学*,2018,39(7):3382-3390.
- [13] 谢锦,常顺利,张毓涛,等.天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性[J].*生态学报*,2016,36(14):4363-4372.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 钱永兰,吕厚荃,张艳红.基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J].*气象与环境学报*,2010,26(2):7-15.
- [16] 刘殿君.赤峰市敖汉旗小流域防护林空间对位配置研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [17] 贡璐,朱美玲,刘曾媛,等.塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性[J].*环境科学*,2016,37(4):1516-1522.
- [18] Tan Q, Wang G. Decoupling of nutrient element cycles in soil and plants across an altitude gradient [J]. *Scientific Reports*, 2016,6(1).DOI:10.1038/srep34875.
- [19] Köhler L, Gieger T, Leuschner C. Altitudinal change in soil and foliar nutrient concentrations and in microclimate across the tree line on the subtropical island mountain Mt. Teide (Canary Islands) [J]. *Flora*, 2006,201(3):202-214.
- [20] 王淑芳,王效科,欧阳志云.密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究[J].*环境科学*,2012,33(3):946-951.
- [21] Müller Michael, Oelmann Y, Schickhoff U, et al. Himalayan treeline soil and foliar C : N : P stoichiometry indicate nutrient shortage with elevation [J]. *Geoderma*, 2017,291:21-32.
- [22] 常宗强,马亚丽,刘蔚,等.土壤冻融过程对祁连山森林土壤碳氮的影响[J].*冰川冻土*,2014,36(1):200-206.
- [23] 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[J].*应用生态学报*,2009,20(3):518-524.
- [24] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010,98(1/3):

- 139-151.
- [25] 曾全超,黄土高原不同植被生态系统土壤微生物多样性及其影响因素研究[D].陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2015.
- [26] 齐鹏,刘贤德,赵维俊,等.祁连山中段青海云杉林土壤养分特征[J].山地学报,2015,3(5):538-545.
- [27] 王淑芳,王效科,欧阳志云.密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素[J].土壤,2011,43(4):515-524.
- [28] 杨敏,杨飞,杨仁敏,等.祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J].土壤,2017,49(2):386-392.
- [29] 杜有新,吴从建,周赛霞,等.庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1675-1681.
- [30] 刘旻霞,马建祖.甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应[J].应用生态学报,2012,23(12):3295-3300.
- [31] 于健,刘琪璟,徐倩倩,等.长白山东坡植被指数变化及其对气候变化的响应[J].应用与环境生物学报,2015,21(2):323-332.
- [32] Zhang W, Brandt M, Tong X, et al. Impacts of the seasonal distribution of rainfall on vegetation productivity across the Sahel[J]. Biogeosciences, 2018, 15(1):1-27.
- [33] Qiqi S, Rui W, Yaxian H, et al. Spatial variations of soil respiration and temperature sensitivity along a steep slope of the semiarid Loess Plateau[J]. PLOS ONE, 2018, 13(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0195400.
- [34] 袁勇,李小英,刘晓梅,等.纳板河自然保护区不同坡向和坡位的常绿阔叶林土壤养分[J].东北林业大学学报,2016,44(3):12-15.
- [35] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,等.广西中南部耕地土壤有机质和全氮变化的遥感监测[J].生态学报,2014,34(18):5283-5291.
- [36] 代子俊,赵霞,石平超.湟水流域农田土壤全氮空间分布特征及其影响因素分析[J].北方园艺,2017(16):131-138.
- [37] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等.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[J].环境科学,2010,31(8):1716-1725.
- [38] Hoch G, Körner C. Global patterns of mobile carbon stores in trees at the high-elevation tree line[J]. Global Ecology & Biogeography, 2012,21(8):861-871.
- [39] 赵维俊,刘贤德,金铭,等.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[J].土壤学报,2016,53(2):477-489.
- [40] Wen D. Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China[J]. Scientific Reports, 2016,6.DOI:10.1038/srep34875.
- [41] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.
- [42] Woodward F I. Ecophysiological studies on the shrub *Vaccinium myrtillus*, L. taken from a wide altitudinal range[J]. Oecologia, 1986,70(4):580-586.
- [43] 任书杰,于贵瑞,陶波,等.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[J].环境科学,2007,28(12):2665-2673.
- [44] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.
- [45] 任运涛,徐翀,张晨曦,等.贺兰山青海云杉针叶 C、N、P 含量及其计量比随环境因子的变化特征[J].干旱区资源与环境,2017,31(6):185-191.
- [46] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(30):11001-11006.
- [47] 刘旻霞,车应弟,李俐蓉,等.甘南高寒草甸微地形上植物叶片特征与环境因子的冗余分析[J].生态学杂志,2017,36(9):2473-2480.
- [48] 普布次仁.归一化植被指数与降水量、土壤湿度的关系[J].气象,1995,21(12):8-12.
- [49] 苏凯文,陈路红,郑伟,等.云南杨梅碳、氮、磷化学计量特征[J].植物生态学报,2017,41(1):136-146.
- [50] 秦燕燕,冯起,朱猛,等.坡向对祁连山大野口流域草地植物叶片 N、P 化学计量学的影响[J].兰州大学学报:自然科学版,2017,53(3):362-367.
- [51] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [52] 姜沛沛,曹扬,陈云明,等.不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征[J].生态学报,2016,36(19):6188-6197.