

青海省祁连圆柏天然林林地土壤生态化学计量特征

井 赛¹, 陈志林², 侯晓巍², 李智华², 胡云云², 向安民², 侯 琳^{1*}

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100;

2. 国家林业和草原局西北调查规划设计院 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要:以青海省祁连圆柏天然林林地土壤为研究对象,分析土壤有机碳(SOC)、全 N(TN)、全 P(TP)及化学计量比海拔与土层的响应及其与环境因子的关系,以期深入了解青海省祁连圆柏林土壤养分限制状况。结果表明:1)土壤 SOC、TN、TP、C:P、N:P 随海拔与土层深度增加均呈现减小趋势;不同海拔与土层深度间 C:N 无明显变化。SOC 与 TN 在不同土层深度与海拔梯度间表现出协同变化特征;TP 的空间变异性小。2)土壤理化性质、气候、植被因素对土壤 C、N、P 化学计量有显著影响($P<0.05$)。其中,土壤含水率是主要影响因素,解释了变异信息的 44.0%。3)祁连圆柏天然林林地土壤 C:P(57.96)、N:P(5.43)高于全国土壤平均水平(52.90、3.9),说明土壤 N 有效性高,P 素缺乏。林木正常生长受土壤中可利用性 P 限制。

关键词:青海;祁连圆柏;土壤;化学计量;海拔

中图分类号:S279.440.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)06-0001-08

Soil Ecological Stoichiometry Characteristics of *Juniperus przewalskii* Natural Forest Lands in Qinghai, China

JING Sai¹, CHEN Zhi-lin², HOU Xiao-wei², LI Zhi-hua², HU Yun-yun², XIANG An-min², HOU Lin^{1*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Northwest Surveying,

Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration, Key Laboratory of National Forestry

Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Taking the soil of natural *Juniperus przewalskii* forest occurring in Qinghai Province as the research object, the responses of soil organic carbon (SOC), total N (TN), total P (TP) and stoichiometry to altitude and soil layer and their correlations with environmental factors were explored. The results indicated that 1) soil SOC, TN, TP, C:P, N:P decreased with the increase of altitude and soil depth, while soil C:N had no significant change. The SOC and TN showed good synergistic variation characteristics between different soil layers and altitudes, and the spatial variability of TP was small. 2) The physical and chemical properties of soil, climate and vegetation factors had significant impacts on the stoichiometry of soil C, N and P ($P<0.05$), among them, soil water content was the main factor affecting the C:N:P stoichiometry, and accounted for 44.0% of the variation information. 3) The average values of soil C:P ratio (57.96), N:P ratio (5.43) were significantly lower than the average levels of the soil C:P ratio (52.90) and N:P ratio (3.9) in China, which indicated that the soil had high N availability and lack of P element. And the normal growth of forests was limited by available P in soil.

Key words: Qinghai; *Juniperus przewalskii*; soil; stoichiometry; altitude

收稿日期:2020-12-16 修回日期:2021-02-08

基金项目:青海柏树生态系统特征与服务功能评价(K4030218362);国家林业和草原局自主研发项目(LC-2-12)。

作者简介:井 赛。研究方向:土壤养分及化学计量。E-mail:17835422168@163.com

* 通信作者:侯 琳,博士,副研究员,博士生导师。研究方向:森林生态。E-mail:houlin_1969@nwsuaf.edu.cn

生态化学计量学主要关注生态过程中多重化学元素(C、N、P)平衡,表征 C、N、P 的耦合关系,已被广泛应用于生态系统各层次的种群动态、群落生产力限制因素、养分循环与分布等研究中^[1-4]。土壤作为生态系统的重要组成部分,提供了植物生长所必须的养分元素,直接影响植被群落的结构、林地生产力水平与生态系统的稳定性^[5-6]。探究土壤生态化学计量特征已逐步成为揭示林地养分状况与营养循环,实现生态系统可持续经营的新兴工具^[7-8]。

森林土壤 C、N、P 化学计量沿环境梯度变化的地理分布格局已成为共识^[9-12]。海拔作为关键的地理因子,其综合了气候、土壤、植被因素的变化,围绕海拔梯度森林土壤 C、N、P 生态化学计量研究已成为热点^[9-10]。有研究发现,土壤有机碳(SOC)、全 N(TN)、C:P、N:P 随海拔升高呈现上升趋势^[8],但其他研究却发现相反的变化趋势^[5,11]。以往对青海林地土壤研究表明,SOC 随海拔呈单峰变化,TN 随海拔呈增加趋势^[12]。还有研究发现,土壤生态化学计量特征与海拔梯度间存在非线性关系^[5]。已有的研究结果并不一致且多集中于不同植被类型间土壤生态化学计量特征的比较^[5,8,13],对祁连圆柏天然林林地土壤生态化学计量特征关注较少。

祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)为柏科圆柏

属常绿乔木,因耐寒、耐旱、耐瘠薄成为青海省高寒生境中分布最广的优势成林树种之一,在水源涵养、防风固沙、应对气候变化、维持生物多样性等方面发挥着不可替代作用^[14]。同时,祁连圆柏由于其广泛的地理分布,生境水热条件变化显著,表现出明显的垂直分异性^[15]。目前,关于祁连圆柏的研究多聚焦于树轮生长、造林、生理生态特性、叶片性状变异^[16-20]。本研究以青海省祁连圆柏 7 个典型分布区的天然林林地土壤为研究对象,探讨祁连圆柏天然林土壤生态化学计量的垂直分布特征与影响因素,以为林地土壤管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取祁连圆柏天然林分布的典型区域德令哈市、都兰县、互助县、泽库县、祁连县、乌兰县、兴海县 7 个地点为研究区(表 1)。区域范围 97.33°—102.54°E,35.01°—38.22°N,海拔 2 340~3 870 m,年平均气温-1.33~5.28℃,年降雨量 51.60~502.50 mm,降水集中于 5—9 月,林下土壤类型多为山地褐色针叶林土和山地灰褐色森林土。7 个研究区的年平均温度和年平均降水等气象数据从中国气象数据网站(<http://data.cma.cn/>)获取。

表 1 研究区基本概况

Table 1 Basic information of the study areas

采样点	样地数	年平均温度/℃	年平均降水/mm	经度(°E)	纬度(°N)	海拔/m
德令哈	2	5.28	169	97.33—97.35	37.48—37.49	3 660~3 740
都兰	4	3.41	179.1	98.11—98.20	35.99—36.03	3 780~3 870
乌兰	3	4.55	324.9	98.66—98.67	37.02—37.03	3 010~3 500
兴海	7	1.71	377.9	99.89—100.14	35.01—35.52	2 910~3 700
祁连	4	1.00	420.0	100.25—100.31	38.08—38.22	2 730~3 390
泽库	7	-1.33	460.0	101.85—101.94	35.21—35.25	3 150~3 810
互助	8	4.01	502.5	102.11—102.54	36.78—37.03	2 340~3 525

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集 依据典型性原则,结合 7 个县祁连圆柏林的海拔分布范围(2 340~3 870 m),以 200 m 为 1 个梯度进行海拔划分,即<2 900、2 900~3 100、3 100~3 300、3 300~3 500、3 500~3 700、>3 700 m 共 6 个海拔梯度。在 7 个县布设 20 m×20 m 的群落样地 35 个。根据对角线法,在每个群落样地内设置 5 个 5 m×5 m 灌木和 5 个 1 m×1 m 草本调查样方。利用 GPS 记录每个样地的经度、纬度、海拔,对样地内的乔木进行计数,测定胸径与树高;在各样地的中心与四角位置设置 5 个 5 m×5 m 灌木和 5 个 1 m×1 m 草本调查样方;灌木样方中,记录灌木的种类、株数,测定高

度、盖度、基径,记录草本植物种类、株数,测定高度、盖度。

每个群落样地内按照“S”型取样法选取土壤样点 5 个,挖掘土壤剖面,因调查区土层厚度各异,为确保数据的可比性,在各土壤样点按 0~20、20~40、40~60 cm 3 个土层用体积为 100 cm³ 的环刀采集各层原状土,同时采集同深度散土。同一样地内相同土层的散土混合均匀成一个土样。将采集的环刀土和散土进行现场称重、编号并装入土样袋中带回实验室。

1.2.2 样品分析 将采集的土壤样品风干,去杂(捡去其中的植物残体、砾石与侵入体),磨细,过筛,用于测定土壤 pH 与 SOC、TN、TP。

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法测定;土壤全 N(TN)采用凯氏定氮法测定;土壤全 P(TP)采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;土壤 pH 利用 pH 计测定(水土比为 2.5 : 1);土壤含水率采用经典的烘干法测定;土壤容重利用环刀法测定^[21]。

1.2.3 物种多样性计算 本研究选取物种丰富度指数(*S*)、Shannon-wiener 指数(*H*)来衡量群落多样性特征,计算方法分别为:

物种丰富度指数(*S*):*S*=样方内的物种数目

Shannon-wiener 指数(*H*):

$$H=-\sum P_i \ln P_i$$

式中,*S* 为样方内物种数目,*P_i* 为物种 *i* 的相对重要值,即 $P_i=N_i/N$,*N_i* 为物种 *i* 的重要值,*N* 为所有物种的重要值之和,重要值=(相对频度+相对盖度+相对高度)/3^[22]。

1.3 数据处理

运用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 对数据进行整理与分析。依据拉伊达准则(3σ 准则)排除异常值。采取单因素方差分析(ANOVA)检验不同海拔与土层下土壤 C、N、P 化学计量特征的差异,若方差为齐

性,用最小显著差异法(LSD)进行多重比较;若方差为非齐性,用 Tamhane’s T2 法进行多重比较,所有检验的显著性水平为 $P<0.05$ 或 $P<0.01$ 。同时对海拔与土壤化学计量间进行线性和二次回归方程拟合,根据模型解释度(*R*²)确定最优回归模型。运用 Pearson 检验衡量土壤 C、N、P 及其化学计量比间的相关性,利用 RDA 与 Pearson 相关性分析环境因素对土壤生态化学计量特征的影响。作图采用 Origin 2018。

2 结果与分析

2.1 祁连圆柏林土壤生态化学计量特征

土壤 SOC、TN、TP 含量平均值分别为 36.49、3.43、0.62 g·kg⁻¹,变化范围为 9.05~75.92、0.61~7.47、0.34~0.91 g·kg⁻¹,变异系数为 16.13%~45.77%(表 3)。SOC 与 TN 的变异系数相近,对外界环境变化响应具有一致性,TP 的变异较 SOC 和 TN 小;土壤化学计量比中,C : N、C : P、N : P 的变化范围分别为 7.13~17.17、15.60~105.44 和 1.24~9.64,变异系数在 1.91%~37.02%,C : P 与 N : P 变异系数相近(表 3)。

表 2 土壤 C、N、P 及其生态化学计量统计特征

Table 2 Statistical characteristics of soil C,N,P contents and their eco-stoichiometry

项目	有机碳 /(g·kg ⁻¹)	全 N /(g·kg ⁻¹)	全 P /(g·kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
平均值	36.49	3.43	0.62	11.1	57.96	5.43
最小值	9.05	0.61	0.34	4.62	15.60	1.24
最大值	75.92	7.47	0.91	18.39	105.44	9.64
标准差	16.38	1.57	0.10	1.66	21.23	2.01
变异系数/%	44.89	45.77	16.13	14.95	36.63	37.02

2.2 祁连圆柏天然林土壤生态化学计量特征沿海拔梯度的变化

在同一土层不同海拔梯度下,土壤 SOC 随海拔的增加呈降低趋势,在<3 500 m 时显著高于其他海拔(3 500~3 700、>3 700 m)($P<0.05$)(图 1)。土壤全 N 与有机碳变化规律相似,3 个土层最高值均出现在<2 900 m,最低值出现在>3 700 m,随海拔的增加而降低。在<2 900~3 700 m 海拔范围内,土壤全 P 随海拔上升小幅度下降,至海拔 3 700 m 略微上升,且在>3 700 m 显著低于其他 5 个海拔梯度($P<0.05$)。土壤 C : N 随海拔梯度增加无明显变化,且各海拔间无显著差异($P>0.05$)。C : P 与 N : P 最大值出现在<2 900 m,最小值在最高海拔梯度(>3 700 m),多重比较显示,除海拔>3 700 m 显著低于其他海拔梯度外其余 4 个海拔梯度间差异并不显著($P>0.05$)(图 1)。

在同一海拔梯度不同土层内,土壤 SOC、TN 含

量均随土壤深度的增加而逐渐降低,且 0~20 cm 土层的 SOC、TN 含量显著高于 20~40 cm 与 40~60 cm 土层($P<0.05$)(图 1),表现为明显的“表聚现象”。土壤 TP 虽随土层增加表现为减小趋势,但减小程度小于 SOC 与 TN,同时 0~20 cm 土层磷含量显著高于 40~60 cm($P<0.05$)(图 1)。在相同海拔梯度内,土壤化学计量比随土层加深呈现出各异的变化规律。其中,C : P、N : P 表现为相同的变化趋势,随土层的加深而降低,而 C : N 随土层的加深无明显变化,在各土层间的差异不显著($P>0.05$)(图 1)。

进一步对土壤 SOC、TN、TP 及其化学计量与各样点的实际海拔进行回归分析,结果表明(图 2),海拔对土壤 3 个土层 SOC、TN、C : P、N : P 具有显著影响($P<0.05$),对土壤 C : N 无显著影响($P>0.05$)。其中,土壤 SOC、TN、C : P、N : P 与海拔呈呈现二次曲线负相关关系,土壤 TP 与海拔间呈

线性负相关关系,土壤 C : N 与海拔间的回归关系均未达到显著水平(图 2)。

相关分析表明,SOC、TN、TP 含量两两之间均呈现极显著正相关($P < 0.01$),且 SOC 与 TN 之间相关系数最大(表 3)。SOC 与 TP 作为 C : P 的分

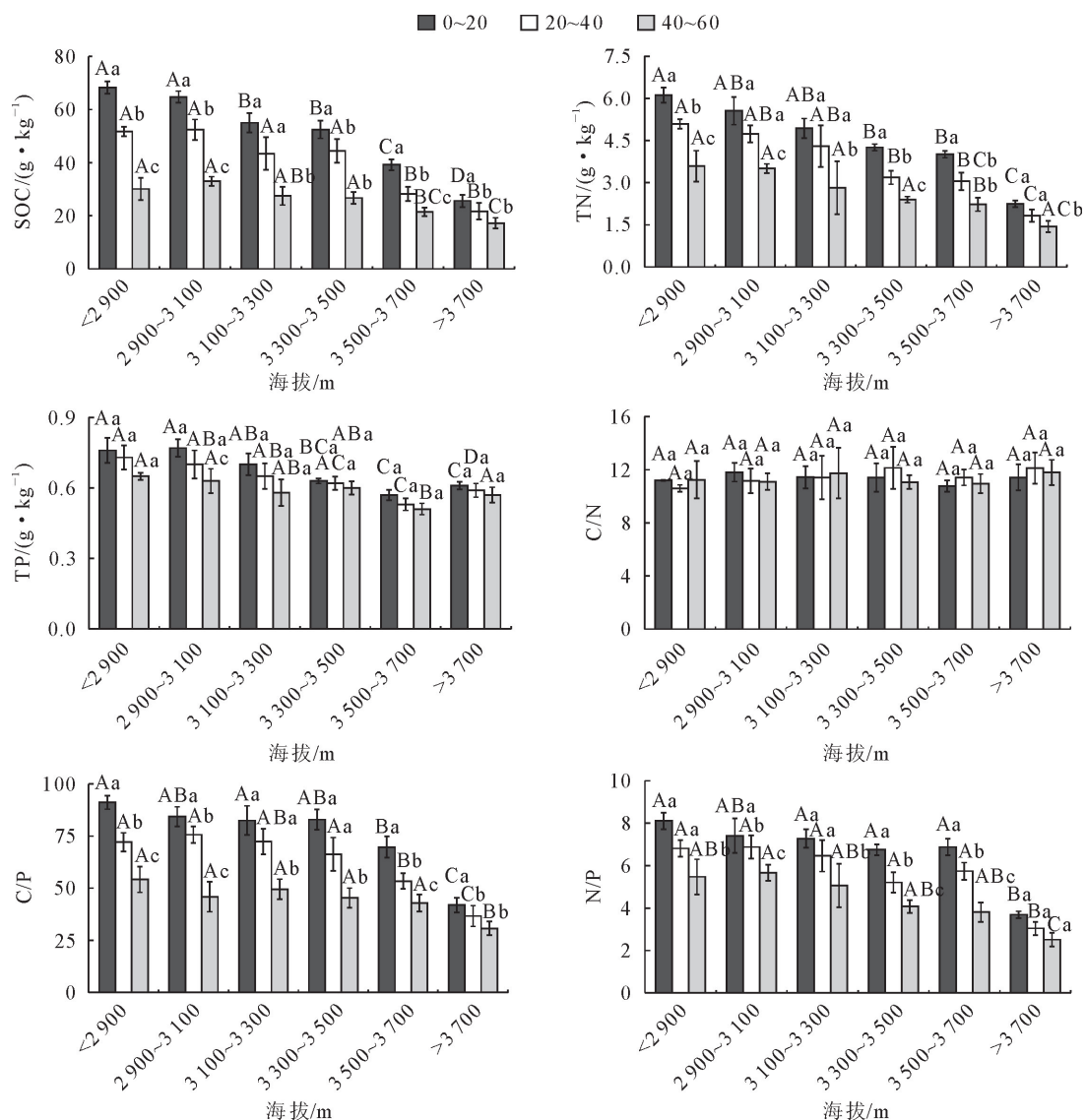
子和分母,理论上应与 C : P 分别呈正相关、负相关,而本研究结果 SOC、TP 与 C : P 均呈极显著正相关($P < 0.01$)(表 3),因此 C : P 的变化主要由 SOC 引起。N : P 与 TN 的相关性强于 TP,说明 N : P 的变化主要有 TN 引起。

表 3 土壤 C、N、P 及其化学计量的相关性

Table 3 Correlation of soil C, N, P contents and their eco-stoichiometry

项目	SOC/(g · kg ⁻¹)	TN/(g · kg ⁻¹)	TP/(g · kg ⁻¹)	C : N	C : P	N : P
SOC/(g · kg ⁻¹)	1					
TN/(g · kg ⁻¹)	0.868**	1				
TP/(g · kg ⁻¹)	0.576**	0.563**	1			
C : N	0.201*	-0.205*	0.094	1		
C : P	0.907**	0.853**	0.297**	0.145	1	
N : P	0.740**	0.910**	0.210**	-0.323**	0.872**	1

注:SOC:有机碳; TN:全 N; TP:全 P; *表示 $P < 0.05$ 水平上显著相关; ** $P < 0.01$ 水平上显著相关。



注:不同大写字母表示同一土层不同海拔梯度下的差异;不同小写字母表示同一海拔梯度不同土层间的差异。

图 1 不同海拔梯度不同土层土壤生态化学计量特征

Fig. 1 Soil ecological stoichiometry of different soil layers in different altitudinal gradients

2.3 气候因素沿海拔梯度的变化

对各研究区的年平均温度与年平均降水与海拔

梯度间进行相关分析,结果表明(表 4),随海拔的升高,年平均温度与年平均降水呈降低的变化趋势,且

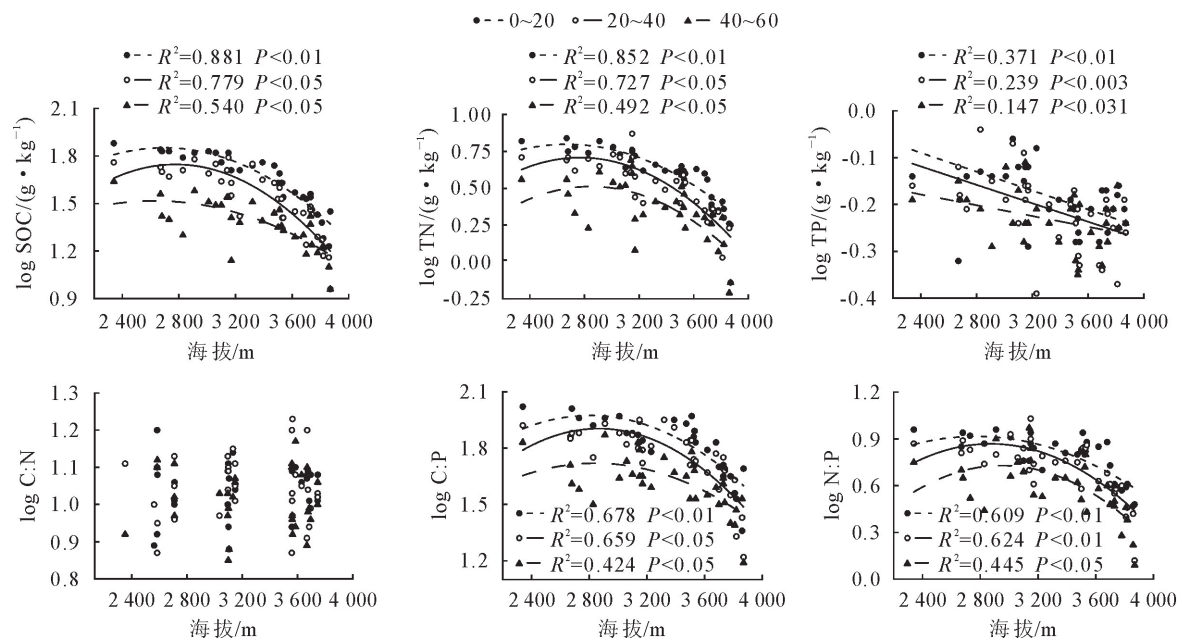


图 2 土壤化学计量与海拔间的回归分析

Fig. 2 Regression analyses between soil ecological stoichiometry and altitude gradient

表 4 研究区海拔与气候因素的关系

Table 4 Correlation between altitude and climate factors

项目	海拔/m	年平均温度/℃	年平均降雨/mm
海拔/m	1	-0.243 *	-0.417 **
年平均温度/℃		1	-0.405 **
年平均降雨/mm			1

相关性均达到显著水平($P < 0.05$)。

2.4 群落特征与土壤指标沿海拔梯度的变化

从青海祁连圆柏天然林群落多样性指数可以看出,随海拔的升高,总体灌木、草本的 Shannon-Winner 指数均呈减小趋势,且在不同海拔梯度下差异性显著($P < 0.05$) (表 5)。然而从物种丰富度来看,灌木与草本物种丰富度随海拔的升高无规律性变化特征,仅群落总体的物种丰富度随海拔的升高而显著降低($P < 0.05$)。林分密度随海拔梯度增加虽呈减小趋势,但在各海拔梯度间无显著差异($P > 0.05$) (表 5)。不同海拔梯度下土壤含水率、pH、容重差异显著($P < 0.05$),其中土壤含水率随海拔梯度的升高呈减小趋势,且在高海拔区域(3 500 ~ 3 700、> 3 700 m)区域显著低于低海拔区域(< 3 500 m);相反,土壤 pH、容重最大值出现在海拔 > 3 700 m,最小值出现在海拔 < 2 900 m,表明土壤 pH、容重随海拔梯度的升高呈增加趋势(表 5)。

2.5 环境因素对土壤生态化学计量特征的影响

以土壤 SOC、TN、TP 及其化学计量比为响应变量,气候、土壤指标、与群落特征为解释变量,进行冗余分析。结果表明,前 2 个排序轴累积解释土壤

SOC、TN、TP 及其化学计量比变异的 75.93%,其中第 1 排序轴解释变异的 75.28%,第 2 排序轴解释变异的 0.65% (图 2)。土壤 SOC、TN 与群落总体 Shannon-Winner 指数(H)、物种丰富度(R)、林分密度、降水、土壤含水率呈极显著正相关($P < 0.01$),与温度呈显著正相关($P < 0.05$),与海拔、pH、容重呈极显著负相关($P < 0.01$)。土壤 TP 与群落总体 Shannon-Winner 指数(H)、物种丰富度、林分密度、土壤含水率呈极显著正相关,与海拔、pH、容重呈极显著负相关($P < 0.01$)。土壤 C:N 与各影响因素间相关性均未达到显著水平($P > 0.05$),土壤 C:P、N:P 与群落总体 Shannon-Winner 指数(H)、林分密度、降水、土壤含水率呈极显著正相关,与海拔、pH、容重呈极显著负相关($P < 0.01$) (图 3、表 6)。冗余分析单独效应表明土壤含水率、海拔、土层是影响土壤生态化学计量的主要因素,分别解释了变异的 44.0%、15.1%、9.7% (图 3),土壤含水率的解释率远大于海拔与土层。

3 结论与讨论

海拔对青海省祁连圆柏天然林土壤 SOC、TN、TP 及化学计量比具有显著影响。随海拔的升高与土层的加深,土壤 SOC、TN、TP、C:P、N:P 呈下降趋势;C:N 无显著的变化。不同海拔梯度上气候、土壤理化性质、植被因素的差异引起了土壤化学计量的变化,其中土壤含水率是影响土壤化学计量的主控因素,解释了变异的 44.0%。青海祁连圆柏天然林土壤 P 有效性低,N 有效性高。

表 5 不同海拔土壤理化性质与群落特征

Table 5 Soil parameters and community characteristics in different altitudes

指标		海拔/m					
		<2 900	2 900~3 100	3 100~3 300	3 300~3 500	3 500~3 700	>3 700
土壤含水率	0~20 cm	46.66±5.34 a	44.88±5.62 a	44.70±2.96 a	41.36±2.56 ab	32.01±4.85 b	20.38±2.47 c
	20~40 cm	46.12±3.59 a	42.24±4.63 a	41.66±2.99 a	40.83±2.46 a	26.23±3.26 b	19.77±2.13 b
	40~60 cm	38.78±2.33 a	34.25±2.80 a	32.06±1.36 a	31.39±5.34 ab	24.73±2.91 b	13.72±2.04 c
pH	0~20 cm	7.59±0.14 a	7.74±0.33 ab	7.72±0.19 ab	8.13±0.03 b	8.04±0.05 ab	8.33±0.07 b
	20~40 cm	7.82±0.23 a	7.83±0.31 a	7.98±0.16 a	8.28±0.05 a	8.26±0.05 ab	8.66±0.14 b
	40~60 cm	8.07±0.18 a	7.95±0.24 a	8.22±0.18 a	8.33±0.03 a	8.39±0.05 a	8.86±0.16 b
容重	0~20 cm	0.63±0.02 a	0.89±0.14 abc	0.82±0.09 ac	0.86±0.02 c	1.02±0.05 cd	1.11±0.05 d
	20~40 cm	0.79±0.05 a	0.91±0.09 ab	0.93±0.06 ab	0.94±0.09 ab	1.18±0.10 b	1.32±0.12 bc
	40~60 cm	0.91±0.09 a	0.94±0.07 a	1.05±0.03 ab	1.15±0.03 ab	1.19±0.08 b	1.34±0.06 bc
Shannon-Winner 指数	总体	2.91±0.10 a	2.79±0.04 ab	2.73±0.07 ab	2.64±0.06 b	2.38±0.03 c	2.10±0.07 d
	灌木	1.73±0.08 a	1.65±0.02 a	1.62±0.04 a	1.64±0.05 a	1.16±0.07 b	0.81±0.05 c
	草本	2.84±0.04 a	2.75±0.07 a	2.49±0.08 b	2.26±0.13 c	2.28±0.03 bc	1.98±0.08 d
物种丰富度	总体	26.60±3.20 a	16.00±1.08 b	15.00±2.05 b	14.00±1.00 b	15.86±1.62 b	15.38±1.91 b
	灌木	5.00±0.55 a	3.00±0.82 a	4.67±0.61 a	2.50±1.32 a	2.43±0.57 a	3.13±0.83 a
	草本	21.60±2.73 a	13±1.68 bc	8.67±1.20 b	11.50±1.04 bc	14.86±1.58 c	12.25±1.24 bc
林分密度	—	1250±278.39 a	912.5±288.22 a	916.67±229.55 a	781.25±294.99 a	807.14±201.24 a	625±105.01 a

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 6 土壤化学计量特征与环境因子的相关性

Table 6 The relationship between soil C:N:P and environmental factors

项目		SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
Shannon-Winner 指数	总体	0.605**	0.648**	0.399**	-0.030	0.592**	0.563**
	灌木	0.600**	0.625**	0.398**	0.005	0.608**	0.556**
	草本	0.603**	0.602**	0.427**	-0.030	0.553**	0.498**
物种丰富度	总体	0.251*	0.262**	0.281**	-0.079	0.168	0.172
	灌木	0.171	0.237*	0.190	0.019	0.154	0.177
	草本	0.177	0.177	0.184	-0.136	0.111	0.114
林分密度		0.366**	0.393**	0.277**	-0.051	0.353**	0.340**
海拔		-0.626**	-0.671**	-0.462**	0.048	-0.586**	-0.560**
温度		0.205*	0.125	0.213*	-0.058	0.081	0.015
降水		0.361**	0.396**	0.166	-0.002	0.394**	0.405**
土壤含水率		0.642**	0.705**	0.450**	0.038	0.659**	0.609**
pH		-0.501**	-0.530**	-0.359**	0.019	-0.463**	-0.428**
容重		-0.469**	-0.539**	-0.361**	0.127	-0.454**	-0.444**

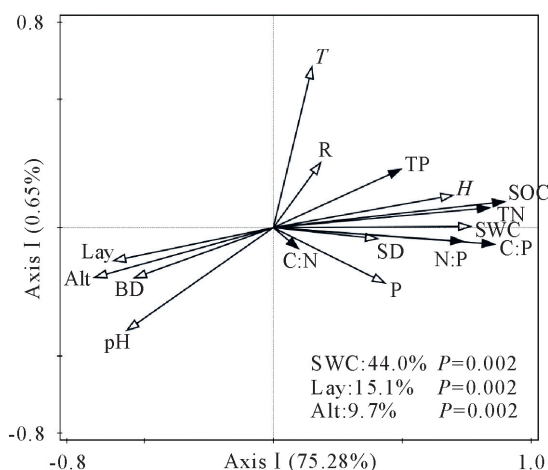
3.1 祁连圆柏天然林土壤 C、N、P 含量及化学计量的海拔变化规律及影响因素

本研究中土壤 SOC、TN 变异系数相近,表现出良好的协同变化特征,均随海拔的增加而减小,但与王艳丽等^[12]调查的青海森林土壤 SOC、TN 垂直分布规律不一致。可能的原因在于研究对象的差异。王艳丽等^[12]研究了随海拔梯度升高由落叶阔叶林过渡至针叶林的植被类型林地土壤生态化学计量特征的变化,而本研究的对象则为单一的祁连圆柏林。与阔叶林相比,针叶林土壤微生物胞外酶的活性显著降低^[23],针叶难易分解^[5,24],因此 2 900~3 100 m 海拔区域土壤 SOC、TN 含量并未增加。尽管土壤 C、N 含量存在较大的空间变异性,但是土壤 C、N 比在不同海拔梯度间却无显著变化。这是因为 C、N 作为土壤的结构成分,在积累与消耗过程中,对外

界环境变化的响应是一致的^[25]。

不同海拔梯度下土壤 SOC、TN 含量变化主要归因于气候、植被因素与土壤理化性质的变化(图 3,表 6)。较大尺度范围内气候是限制植被生长的重要因素^[25]。自然条件下,土壤 C、N 含量受生物作用的影响,主要由土壤有机质和 N 输入量与输出量的相对大小决定^[26]。研究区<2 900 m 海拔区域降雨量高、温度适宜,水温条件好使得群落多样性、物种丰富度与林分密度增加,进而使输入至林下凋落物含量增加,凋落物为土壤输送了更多的养分,从而促进了土壤 C、N 含量的积累。不同海拔梯度下土壤理化性质的变化也导致土壤 C、N 含量的变化。研究表明,土壤 SOC、TN 含量与容重、pH 呈极显著负相关($P<0.01$),这是由于较高的容重与 pH 不利于土壤通气,限制了土壤微生物活性和根系生

长,不适宜有机质分解与养分汇集^[27]。土壤 SOC、TN 含量与土壤含水率呈极显著正相关。已有研究表明,土壤湿度较高条件下,土壤微生物和酶的活性会提高^[32],有机质矿化分解加快^[28]。本研究中随海拔的升高,土壤含水率降低,微生物与酶活性降低,有机质分解与周转周期加长,因而,土壤 SOC、TN 含量降低。



注: H, Shannon-Winner 指数; S, 物种丰富度; SD, 林分密度; Alt, 海拔; T, 温度; P, 降水; SWC, 土壤含水率; BD, 容重; Lay, 土层。

图3 土壤 C、N、P 生态化学计量与环境因素的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis(RDA) of soil C : N : P and environmental factors

本研究中土壤 TP 变异系数为 16.13%, 显著低于 SOC 与 TN, 空间变异性低。这是因为土壤 P 主要来源于长期而稳定的岩石风化过程, 属沉积性元素, 迁移性差^[29]。另外, 土壤 TP 随海拔升高而逐渐增加。土壤 P 含量决定于岩石分化形成的土壤母质, 研究区祁连圆柏林下土壤多为山地灰褐土, 土壤母质主要为黄土及残积物^[15], P 来源有限; 同时, 高海拔地区, pH 增大, 氧化还原电位升高, 土壤中金属离子对 P 的吸附作用增强^[28]; 加之容重增加与含水率的降低削弱了土壤风化, 土壤母质中 P 的释放量减少^[30], 进而造成土壤 TP 含量的降低。就土壤 C/P 与 N/P 比而言, 随海拔的升高, C/P 与 N/P 均呈下降趋势。本研究中土壤 C : P 变化由 SOC 变化引起, TN 变化导致 N : P 的变化(表 3), 海拔升高土壤 C、N 含量的下降解释了这一变化。

3.2 土壤化学计量比的指示作用

土壤环境中 C、N、P 化学计量比值决定着植物和微生物对养分的可利用性与限制性。N、P 通常是陆地生态系统常见的限制性元素。一般认为土壤 C : P 是土壤 P 有效性的标志, 低的 C : P 有利于微生物通过分解过程释放养分, 促进土壤有效 P 的增加。反之, 较高的 C : P 使土壤微生物对有机质的

分解受限, 同时还会与植物竞争土壤无机磷^[31]。土壤 N : P 可用作 N 饱和的指标, 反映植被生长过程中土壤养分元素的有效性, 并用来确定养分限制的阈值^[4]。研究区土壤 C : P、N : P 平均值为 57.96 与 5.43, 高于中国土壤平均水平^[29], 说明青海祁连圆柏天然林土壤 P 有效性低, N 有效性高。同时, 本研究土壤 TP 含量(0.62 g · kg) 低于中国土壤平均水平(0.78 g · kg⁻¹)^[29], 从另一个方面验证了研究区土壤的 P 限制。冗余分析单独效应表明土壤含水率解释了土壤化学计量比变化的 44.0%, 占有环境因子总解释率的 58%。有研究指出随着全球气候变暖, 土壤水分因蒸发量变多而变得比以前更加干旱^[32]。本研究中土壤 TP 与含水率呈极显著正相关关系, 青海地处青藏高原东北部, 对气候变化敏感, 未来在全球气候变暖的背景下, 土壤水分下降会进一步加剧土壤 P 限制。因此, 在天然林经营与管理中应注重缓解土壤 P 限制, 如 P 肥的施用。

参考文献:

- [1] ELSER J. Biological stoichiometry: a chemical bridge between ecosystem ecology and evolutionary biology[J]. American Naturalist, 2006, 168(6): S25-S35.
- [2] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2010, 3(6): 540-550.
- [3] ELSER J J, DOBBERFUHL D R, MACKAY N A, et al. Organism size, life history, and N : P stoichiometry[J]. Bioscience, 1996, 46(9): 674-684.
- [4] 王邵强, 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.
- [5] WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947. (in Chinese)
- [6] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 160-170.
- [7] LI D W, WANG Z Q, TIAN H X, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 160-170. (in Chinese)
- [8] 王平安, 宫渊奇, 王琪武, 等. 不同林龄华北落叶松人工林针叶凋落叶-土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 1-9.
- [9] WANG P A, GONG Y Q, WANG Q W. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of needle leaf-litter-soil from *Larix principis-rupprechtii* plantation with different stand ages[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 1-9. (in Chinese)
- [10] 程欢, 宫渊波, 吴强, 等. 川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 自然资源学报, 2018, 33(1): 161-172.
- [11] CHENG H, GONG Y B, WU Q, et al. Content and ecological

- stoichiometry characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus of typical soils in sub-alpine/alpine mountain of Western Sichuan[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(1):161-172. (in Chinese)
- [8] 秦海龙,付旋旋,卢瑛,等. 广西猫儿山不同海拔土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3):711-717.
QIN H L, FU X X, LU Y, *et al.* Soil C : N : P stoichiometry at different altitudes in Mao'er Mountain, Guangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3):711-717. (in Chinese)
- [9] 张莎莎,李爱琴,王会荣,等. 不同海拔杉木人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1):97-104.
ZHANG S S, LI A Q, WANG H R, *et al.* Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in *Cunninghamia lanceolata* plantation across an elevation gradient[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(1):97-104. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] MULLER M, 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.
- [12] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(11):4096-4105.
WANG Y L, ZI H B, CHENG R X, *et al.* Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11):4096-4105. (in Chinese)
- [13] 李新星,刘桂民,吴小丽,等. 马衔山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3):758-765.
- [14] 刘贤德,王清忠,孟好军. 祁连圆柏[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2006.
- [15] 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 1997.
- [16] WANG W, LIU X, SHAO X, *et al.* Differential response of *Qilian juniper* radial growth to climate variations in the middle of Qilian Mountains and the Northeastern Qaidam Basin[J]. Climatic Change, 2015, 133(2):237-251.
- [17] ZHANG Q, CHIANG T Y, GEORGE M, *et al.* Phylogeography of the Qinghai-Tibetan Plateau endemic *Juniperus przewalskii* (Cupressaceae) inferred from chloroplast DNA sequence variation[J]. Molecular Ecology, 2005, 14(11):3513-3524.
- [18] 刘喜梅,李海朝. 2个地区祁连圆柏叶挥发油化学成分分析[J]. 林业科学, 2013, 49(10):149-154.
LIU X M, LI H C. Analysis of the Chemical constituents in the volatile oils from leaves of *Sabina przewalskii* in two different regions[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(10):149-154. (in Chinese)
- [19] WANG F, GOU X, ZHANG F, *et al.* Variations in leaf traits of *Juniperus przewalskii* from an extremely arid and cold environment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 689:434-443.
- [20] 宋文琦,朱良军,张旭,等. 青藏高原东北部不同降水梯度下高山林线祁连圆柏径向生长与气候关系的比较[J]. 植物生态学报, 2018, 42(1):66-77.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
- [22] 孙儒泳,李庆芬,牛翠娟,等. 基础生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [23] HE Q, WU Y, BING H, *et al.* Vegetation type rather than climate modulates the variation in soil enzyme activities and stoichiometry in subalpine forests in the Eastern Tibetan Plateau[J]. Geoderma, 2020, 374:114424.
- [24] 孟庆权,葛露露,林宇,等. 格氏栲天然林及人工林和杉木人工林生活叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6):8-15.
MENG Q Q, GE L L, LIN Y, *et al.* Ecological stoichiometric characteristic of leaf-litter-soil in natural and planted forests of *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6):8-15. (in Chinese)
- [25] 王丽华,薛晶月,谢雨,等. 不同气候类型下四川草地土壤有机碳空间分布及影响因素[J]. 植物生态学报, 2018, 42(3):297-306.
- [26] FANG Z, LI D D, JIAO F, *et al.* The latitudinal patterns of leaf and soil C : N : P stoichiometry in the Loess Plateau of China[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10:85.
- [27] ZHANG W, QIAO W, GAO D, *et al.* Relationship between soil nutrient properties and biological activities along a restoration chronosequence of *Pinus tabulaeformis* plantation forests in the Ziwuling Mountains, China[J]. Catena, 2018, 16:85-95.
- [28] 丁小慧,罗淑政,刘金巍,等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. 生态学报, 2012, 32(11):3467-3476.
DING X H, LUO S Z, LIU J W, *et al.* Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11):3467-3476. (in Chinese)
- [29] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, *et al.* 2010. 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.
- [30] ZHANG Y, CONG J, LU H, *et al.* Soil bacterial diversity patterns and drivers along an elevational gradient on Shennongjia Mountain, China[J]. Microbial Biotechnology, 2015, 8(4):739-746.
- [31] BING H J, WU Y H, ZHOU J, *et al.* Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of Eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(2):405-416.
- [32] CHE R, WANG S, WANG Y, *et al.* Total and active soil fungal community profiles were significantly altered by six years of warming but not by grazing[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2019, 139:107611.