

排露沟流域不同海拔灌丛土壤碳氮磷化学计量特征

牟文博¹ 徐当会^{1*} 王谢军¹ 敬文茂² 张瑞英¹ 顾玉玲¹ 姚广前¹ 祁世华¹
张 龙¹ 苟亚飞¹

¹兰州大学生态学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000; ²甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃张掖 734099

摘 要 研究海拔梯度上土壤养分化学计量特征的空间分布格局, 有助于明确山地生态系统的土壤养分限制状况, 揭示其潜在的影响因素, 为区域生态环境保护和植被恢复调控工作提供科学依据。该研究选取祁连山排露沟流域海拔3 100–3 700 m的灌丛样地, 采集0–10和10–20 cm层土壤样品, 分析有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量比在不同海拔、不同土层间的分布规律及其与气候因子、灌丛地上生物量和土壤pH的相关性。结果表明: (1)土壤养分更多地聚集在土壤表层, 各土层土壤SOC、TN含量均随海拔升高先增加后降低, TP含量持续增加。(2)土壤N:P在海拔3 100–3 400 m呈上升趋势, 于3 400 m处达到最大值, 之后呈下降趋势且N:P < 14, 说明土壤N限制增加。高海拔地区的土壤C:P明显低于中低海拔处, C:N则在海拔梯度上总体呈下降趋势。(3) SOC与TN含量呈极显著正相关关系, 与TP含量呈显著负相关关系, TN与TP含量之间无显著相关性。(4)土壤TN含量不受年平均气温和生长季降水量的影响。SOC含量及C:N:P均与气温和生长季降水量显著正相关, 而TP含量与其负相关。土壤SOC、TN含量与灌丛地上生物量呈正相关关系。土壤pH与TP含量存在负相关关系, 而对SOC和TN含量无显著影响。研究显示流域内高寒灌丛植物生产力受N制约严重, 适量增施氮肥有助于缓解高寒地区土壤N的限制性作用。
关键词 海拔梯度; 土壤养分; 化学计量; 气候因子; 祁连山; 排露沟流域

牟文博, 徐当会, 王谢军, 敬文茂, 张瑞英, 顾玉玲, 姚广前, 祁世华, 张龙, 苟亚飞 (2022). 排露沟流域不同海拔灌丛土壤碳氮磷化学计量特征. 植物生态学报, 46, 1422-1431. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0082

Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry along an altitude gradient in shrublands in Pailugou watershed, China

MOU Wen-Bo¹, XU Dang-Hui^{1*}, WANG Xie-Jun¹, JING Wen-Mao², ZHANG Rui-Ying¹, GU Yu-Ling¹, YAO Guang-Qian¹, QI Shi-Hua¹, ZHANG Long¹, and GOU Ya-Fei¹

¹State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, School of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; and ²Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734099, China

Abstract

Aims The study of the spatial distribution pattern of soil nutrient stoichiometry along the altitude gradient is helpful to clarify the status of nutrient limitation in the mountainous ecosystems, to reveal the potential influencing factors to nutrient limitation, and to provide a scientific basis for regional ecological protection and vegetation restoration.

Methods The sampling plots were established along an altitude gradient from 3 100 m to 3 700 m in Pailugou watershed of the Qilian Mountains. Soil samples from 0–10 and 10–20 cm layers were collected separately to analyze the distribution of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents, and stoichiometric characteristics among different altitude and soil layers. Correlations between these nutrient characteristics and climatic factors, aboveground biomass, and soil pH were analyzed.

Important findings Results showed that: (1) Soil nutrients were concentrated on the soil surface and decreased with soil depth. The SOC and TN contents increased initially and then decreased as altitude increased. Soil TP content increased with increasing altitude. (2) Soil N:P increased from 3 100 m to 3 400 m, reached the maximum value at 3 400 m, and then decreased with increasing altitude and soil N:P was less than 14, suggesting an increase in N limitation along the altitude gradient. The C:P in soil was lower at high altitude than that at medium or low

收稿日期Received: 2022-03-07 接受日期Accepted: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(32171611)、甘肃省自然科学基金(22JR5RA454)和第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0301)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (32171611), the Natural Science Foundation of Gansu Province (22JR5RA454), and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP)(2019QZKK0301).

* 通信作者Corresponding author (dhxu@lzu.edu.cn)

altitude, while C:N decreased with increasing altitude. (3) SOC content was positively correlated with TN content and negatively correlated with TP content. TN and TP content had no significant correlation. (4) Mean air temperature and total precipitation in the growing season showed positive correlation with SOC content and C:N:P, negative correlation with TP content, and no correlation with TN content. SOC and TN content had positive correlations with the aboveground biomass of shrublands. Soil pH was negatively correlated with TP content, but did not affect SOC and TN content significantly. Our results indicate that the productivity of alpine shrublands in the watershed was mainly limited by N and an appropriate amount of N application could alleviate the limitation.

Key words altitude gradient; soil nutrient; stoichiometry; climatic factor; Qilian Mountains; Pailugou watershed

Mou WB, Xu DH, Wang XJ, Jing WM, Zhang RY, Gu YL, Yao GQ, Qi SH, Zhang L, Gou YF (2022). Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry along an altitude gradient in shrublands in Pailugou watershed, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 1422-1431. DOI: 10.17521/cjpe. 2022.0082

土壤是生态系统诸多生态过程的载体, 是植物赖以生存的环境条件。全球土壤有机碳(SOC)库约为25 000亿t, 接近生物碳库的4.5倍和大气碳库的3.3倍, SOC含量的小波动可能会影响生态系统的可持续性(Lal, 2004)。土壤氮(N)和磷(P)是陆地生态系统中限制植物生长和不同生物过程的最重要的营养物质。碳(C)、N和P作为土壤养分的重要组成元素, 不仅是探索土壤养分化学计量比空间分布的重要支撑, 还是自然生态系统中植物群落组成、演替和稳定的主要驱动因素(Tsunoda *et al.*, 2014)。因此, 分析土壤C、N、P的化学计量特征及其影响因子, 有助于更好地认识养分有效性及其对植物生长的限制, 并为阐明C、N、P的循环过程与平衡机制提供关键信息(Mooshammer *et al.*, 2014; 曾昭霞等, 2015)。

已有研究表明气候(尤其是降水和温度)在土壤发育中扮演着重要角色, 通过影响土壤有机质的形成、分解和储存, 从而间接地调节养分循环和有效性(Mooshammer *et al.*, 2014; Ren *et al.*, 2017)。故了解土壤养分含量及化学计量特征对气候因子的响应, 有助于预测全球气候变化下的养分平衡。海拔梯度是可模拟气温和降水变化的自然梯度(Müller *et al.*, 2017), 研究不同海拔条件下的土壤C:N:P化学计量比对探索气候变化导致的养分限制模式具有重要意义(邬畏等, 2010)。

祁连山作为我国西北半干旱区内陆河流域重要的地表水资源形成区, 在涵养水源、水资源利用和整个西北地区的生态环境保护、经济社会的可持续发展等方面, 有着不可或缺的作用(马剑等, 2021)。高寒灌丛占祁连山总面积(25.9万km²)的17.57%, 占祁连山保护区林业用地面积的68%, 其有效蓄水量在3亿m³以上, 与云杉(*Picea* spp.)林相比是更大的

“绿色水库”, 对祁连山的水土保持、生物多样性保护和生态系统安全极为重要。近些年来由于更加频繁的人类活动和气候变化, 灌丛生态系统遭受了较为严重的破坏, 部分地区出现退化状况, 生态服务功能明显下降(马剑等, 2021; 王小娜等, 2022)。然而目前关于该地区高寒灌丛土壤沿海拔梯度的养分限制状况及其与气候之间的关系方面的研究较少。

Nottingham等(2015)和Hu等(2016)指出热带森林中土壤SOC、全氮(TN)、全磷(TP)、速效氮和速效磷含量随海拔升高而增加。Shan等(2014)的研究表明森林土壤SOC、TN和速效氮含量与海拔高度无关。Müller等(2017)对尼泊尔地区高山林线交错带的土壤养分进行研究, 发现随海拔升高土壤N、P有效性和N:P、C:P下降, 而C:N呈增加趋势。高海宁等(2021)指出随着海拔升高土壤C、N、P含量在中海拔地区达到最高, 土壤C:P与C:N总体呈下降趋势。李丹维等(2017)对太白山阔叶林带的研究指出土壤C:N随海拔增高呈现降低趋势, N:P先上升后下降。谢锦等(2016)发现, 天山北坡土壤C:P和N:P随海拔上升均先增高后降低, 且随植被类型的变化而变化。基于此, 本研究作出假设: (1) SOC、TN含量随海拔上升先增加后降低, 土壤TP含量持续增加; (2)较高海拔处土壤N:P呈下降趋势, 植被生长主要受N限制; (3)土壤C:N:P化学计量特征受环境因子综合作用的影响。

1 材料和方法

1.1 样地概况

研究样地位于甘肃省肃南裕固族自治县祁连山中段的排露沟流域(38.53° N, 100.30° E), 海拔

2 300–3 800 m, 流域面积2.71 km², 属大陆性高寒山地气候。过去30年的平均年降水量约416 mm (近80%的降水事件发生在5–10月), 年潜在蒸发量1 011.3 mm, 年平均气温0.4 °C, 年日照时间1 562.6 h (Feng *et al.*, 2022)。灌木层优势种有鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)等, 草本层主要有莎草、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、珠芽蓼(*Bistorta vivipara*)等。

1.2 样品采集与测定

于2021年8月上旬赴排露沟流域进行野外调查, 选择海拔3 100–3 700 m坡度和坡向基本一致的区域, 以100 m为间隔, 在7个海拔高度设置灌丛群落研究样地, 并确保群落内部具有相对均匀的物种组成。记录各样地经度、纬度、坡度及坡向, 具体信息见表1。每个样地设置3个5 m × 5 m的灌丛样方(缓冲带为5–10 m), 采用收获法测定灌丛地上生物量(表1), 在各样方的对角线上至少取3个点, 除去未分解及半分解的凋落物, 分0–10和10–20 cm层采集土壤样品, 经混合密封后带回实验室。

土壤样品经自然风干后去除枯叶、砾石等杂物, 研磨过100目筛。土壤pH利用pH仪测定, SOC含量采用重铬酸钾容量法测定。TN用H₂SO₄-K₂SO₄:CuSO₄:Se催化法进行消煮, TP用H₂O₂-H₂SO₄法消煮, 消煮得到的溶液经定容、静置过夜和稀释后使用Smart-Chem200 (WestCo, Brookfield, USA)化学分析仪测定含量。

1.3 数据处理

采用Excel 2019、SPSS 25、Origin 8.5软件对数据进行处理、统计分析并作图。对不同海拔和不同土层间的C、N、P含量及化学计量比采取双因素方差分析和最小显著差异(LSD)法多重比较, 运用

Person相关分析对土壤C、N、P及化学计量特征和灌丛地上生物量、土壤pH及气候因子之间进行了相关性对比。

2 结果和分析

2.1 不同海拔土壤养分含量分布特征

排露沟流域各海拔灌丛0–10 cm层土壤SOC、TN、TP含量均高于10–20 cm层。SOC含量在0–10 cm土层为81.68–121.07 g·kg⁻¹, 平均值为100.27 g·kg⁻¹ (图1A); 在10–20 cm层为67.92–110.62 g·kg⁻¹, 平均值86.45 g·kg⁻¹ (图1G), 随海拔升高呈先增加后降低趋势, 于3 300 m处达到最高值。土壤TN含量在海拔梯度上表现出与SOC相似的分布规律, 0–10 cm层变化区间为6.72–9.27 g·kg⁻¹, 平均值为7.95 g·kg⁻¹ (图1B); 10–20 cm层为6.06–8.13 g·kg⁻¹, 平均值6.96 g·kg⁻¹ (图1H), 最高值出现在3 400 m高山灌丛处。土壤TP含量随海拔升高显著增加, 其中0–10 cm层为0.50–0.71 g·kg⁻¹, 平均值0.59 g·kg⁻¹ (图1C); 10–20 cm层为0.45–0.69 g·kg⁻¹, 平均值0.55 g·kg⁻¹ (图1I)。双因素方差分析(表2)表明, 海拔和土层均对土壤SOC、TN和TP含量有极显著影响, 但海拔与土层的交互效应对土壤养分含量无显著影响。

2.2 不同海拔土壤养分化学计量比分布特征

各海拔土壤C:N:P的垂直分布呈现随土层加深而减小的规律, C:P和N:P下降幅度较大, C:N的变化幅度较小, 各土层间差异不显著($p > 0.05$)(表2)。土壤C:N在0–10 cm层为10.94–13.96、平均值为12.60 (图1F), 在10–20 cm层为10.93–14.63, 平均值12.42 (图1L), 且沿海拔升高总体呈下降趋势。土壤C:P随海拔升高先增加后降低, 在3 300 m高山灌丛处远高于其他海拔(图1D、1J), 主要是由SOC含量偏高所致。土壤N:P表现出与C:P相似的变化规律, 在0–10

表1 排露沟流域不同海拔灌丛群落样地概况
Table 1 Basic information of the sampling plots in Pailugou watershed at different altitudes

样地 Sampling plot	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Slope aspect (°)	生长季总降水量 Total precipitation of the growing season (mm)	生长季平均气温 Mean air temperature of the growing season (°C)	灌丛地上生物量(平均值±标准误) Aboveground biomass of shrublands (mean ± SE, g·m ⁻²)
1	3 100	21	27	425.05	9.80	41.61 ± 5.96
2	3 200	34	15	418.97	9.60	51.37 ± 3.92
3	3 300	36	9	411.47	8.83	73.20 ± 5.06
4	3 400	33	41	406.21	8.97	80.94 ± 12.15
5	3 500	36	56	388.11	8.26	75.98 ± 8.62
6	3 600	35	10	374.89	7.39	62.76 ± 5.40
7	3 700	33	34	358.00	6.99	44.23 ± 4.38

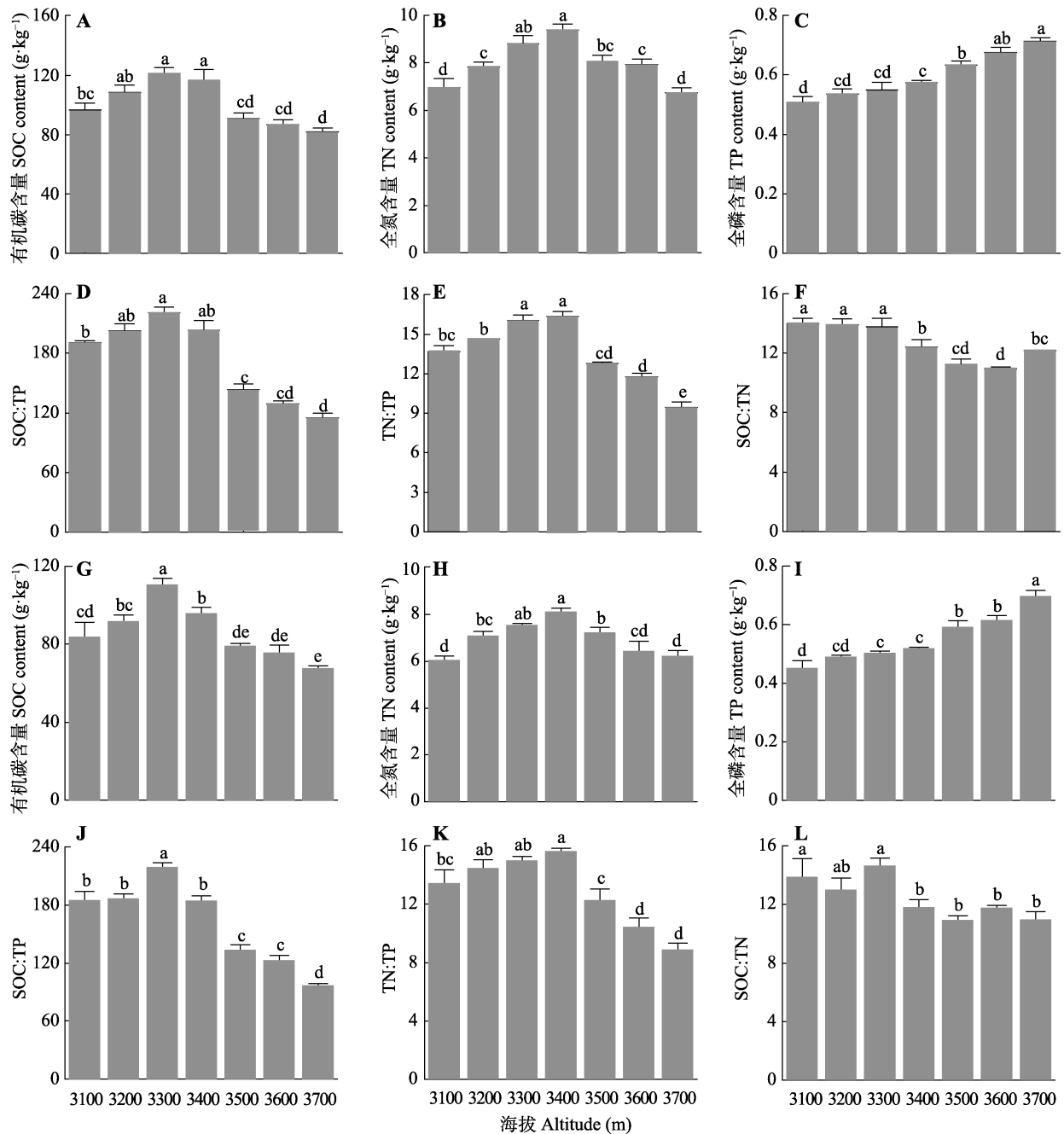


图1 排露沟流域0–10 cm (A–F)和10–20 cm (G–L)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量与计量比沿海拔梯度分布状况(平均值 \pm 标准误)。不同小写字母表示不同海拔高度的同一指标差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 1 Variations of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents and stoichiometry for the 0–10 cm (A–F) and 10–20 cm (G–L) soil layer across the altitude gradient (mean \pm SE) in Pailugou watershed. Different lowercase letters indicate significant difference of the same indicator among different altitudes ($p < 0.05$).

表2 海拔和土层对排露沟流域土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及化学计量特征的影响

Table 2 Effects of altitude and soil layer on the contents and stoichiometry of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) in Pailugou watershed

因素 Factor	SOC		TN		TP		SOC:TP		TN:TP		SOC:TN	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
土层 Soil layer	38.143	0.000	51.785	0.000	24.710	0.000	12.338	0.002	6.329	0.018	0.426	0.519
海拔 Altitude	24.538	0.000	21.395	0.000	48.513	0.000	113.000	0.000	52.962	0.000	11.022	0.000
土层 \times 海拔 Soil layer \times altitude	0.377	0.887	0.899	0.509	0.411	0.865	0.695	0.656	0.408	0.868	1.025	0.430

加粗字体表示存在显著影响($p < 0.05$)。

Bold font indicates significant impact ($p < 0.05$).

和10–20 cm层平均值分别为13.52、12.89, 且10–20 cm层土壤N:P在各海拔均小于16 (图1E、1K), 意味着该研究区深层土壤始终受N限制。经双因素方差分析(表2)表明, 土壤C:P、N:P和C:N均受海拔梯度的极显著影响; 土层对C:P和N:P也存在极显著影响, 但对C:N影响不明显; 土壤C:N:P化学计量特征不受土层和海拔交互效应的影响。

2.3 不同海拔土壤养分含量及化学计量比的相关性

各海拔0–10 cm和10–20 cm层土壤SOC与TN含量之间存在显著正相关关系($r = 0.54, p < 0.001$; $r = 0.33, p < 0.01$)(图2A), 与TP含量呈显著负相关关系($r = -0.26, p < 0.01$; $r = -0.30, p < 0.01$)(图2B), 而TN与TP之间的相关性不显著(图2C; 表3)。土壤C:P与TN含量呈正相关关系($r = 0.23, p < 0.05$; $r = 0.19, p < 0.05$)(图2E), C:N与TP含量呈负相关关系($r = -0.45, p < 0.01$; $r = -0.23, p < 0.05$)(图2F), N:P与SOC含量呈极显著正相关关系($r = 0.74, p < 0.001$; $r = 0.51, p < 0.001$)(图2D; 表2)。表明祁连山灌丛土壤0–10 cm和10–20 cm层SOC、TN、TP在空间分布上相互耦合。

2.4 不同海拔土壤养分化学计量特征与环境因子的相关性

排露沟流域的气象监测结果显示该地区生长季

总降水量及平均气温随海拔升高呈降低趋势(表1)。土壤pH在海拔梯度上持续减小, 且表层土壤pH普遍高于深层土壤, 在0–10 cm土层为6.73–7.01、平均值6.89, 10–20 cm土层为7.02–7.18, 平均值7.09。野外调查数据显示灌丛地上生物量沿海拔梯度呈先增加后减小趋势, 于3 400 m处达到最大值(80.94 ± 12.15) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (表1)。

环境因子与土壤C、N、P含量及化学计量特征的相关性分析(表3)表明生长季总降水量和平均气温均与SOC含量呈显著正相关关系, 与TP含量呈极显著负相关关系, 与TN含量则不存在相关关系。此外, 生长季总降水量和气温还与C:P、N:P呈极显著正相关关系, 与C:N的关系表现为在0–10 cm层呈极显著正相关关系, 在10–20 cm层呈显著正相关关系。

土壤pH与SOC、TN含量之间没有显著相关性, 与TP含量在0–10 cm土层呈显著负相关关系, 在10–20 cm层呈极显著负相关关系。此外, 10–20 cm层土壤pH与C:P和N:P之间存在显著正相关关系。灌丛地上生物量对表层土壤养分化学计量特征的影响强于深层土壤, 具体表现为在0–10 cm层与土壤SOC含量及N:P呈显著正相关关系, 与TN含量呈极显著正相关关系。在10–20 cm层, 灌丛地上生物量只与土壤TN含量呈显著正相关关系, 与其他指标

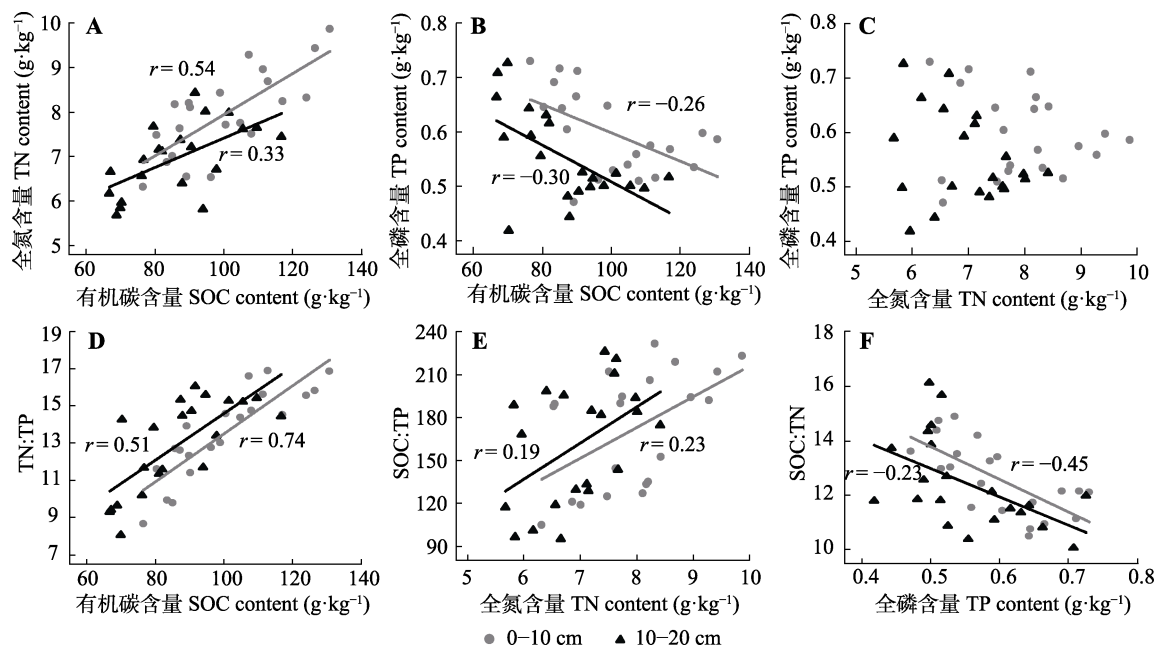


图2 排露沟流域土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量比的相关性。虚线和实线分别代表0–10 cm和10–20 cm养分指标拟合线。

Fig. 2 Correlations between soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents and their stoichiometry in Pailugou watershed. Dashed line and solid line represents the nutrient indicator fitting line of 0–10 cm and 10–20 cm, respectively.

表3 排露沟流域0–10 cm、10–20 cm层土壤养分化学计量特征和环境因子的相关分析**Table 3** Correlation analysis between soil nutrient stoichiometry and environmental factors for both 0–10 cm and 10–20 cm soil layers in Pailugou watershed

土壤养分 Soil nutrient	土层 Soil layer (cm)	SOC	TN	TP	SOC:TP	TN:TP	SOC:TN
TN	0–10	0.734***					
	10–20	0.570**					
TP	0–10	–0.568**	–0.140				
	10–20	–0.581**	–0.277				
SOC:TP	0–10	0.901***	0.516*	–0.846***			
	10–20	0.911***	0.457*	–0.857***			
TN:TP	0–10	0.866***	0.746***	–0.758***	0.915***		
	10–20	0.730***	0.728***	–0.846***	0.864***		
SOC:TN	0–10	0.591**	–0.065	–0.684**	0.755***	0.438*	
	10–20	0.734***	–0.123	–0.520*	0.739***	0.305	
pH	0–10	0.183	–0.154	–0.661**	0.419	0.331	0.410
	10–20	0.342	0.187	–0.696***	0.561**	0.601**	0.259
生长季总降水量 Total precipitation of the growing season	0–10	0.660**	0.271	–0.943***	0.885***	0.798***	0.717***
	10–20	0.666**	0.280	–0.957***	0.893***	0.823***	0.625**
生长季平均气温 Mean air temperature of the growing season	0–10	0.600**	0.202	–0.929***	0.838***	0.742***	0.709***
	10–20	0.581**	0.250	–0.933***	0.829***	0.792***	0.553**
灌丛地上生物量 Aboveground biomass of shrubs	0–10	0.509*	0.786***	0.064	0.245	0.452*	–0.201
	10–20	0.383	0.590**	–0.042	0.214	0.338	–0.060

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$. SOC, 土壤有机碳含量; TN, 土壤全氮含量; TP, 土壤全磷含量。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$. SOC, soil organic carbon content; TN, soil total nitrogen content; TP, soil total phosphorus content.

不存在相关性。这也反映了土壤C、N、P的形成和储存的机制,即SOC和TN含量主要与植被生长有关,而TP主要受土壤性质的影响。

3 讨论

3.1 海拔对土壤C、N、P含量的影响

土壤养分的空间分布表现出一定的海拔梯度特征。本研究区灌丛土壤SOC、TN含量随海拔升高呈“单峰”趋势,于中海拔段达到峰值,和Zhang等(2019)和Xiao等(2019)研究结果类似,这可能是土壤温度、湿度、微生物和植被等因素综合作用的结果。野外调查发现流域内中海拔段灌丛地上生物量远高于其他海拔,植物凋落物及根系分泌物等有机质的输入能力增强,土壤C、N的来源增多,此外,海拔升高,降水量减少,温度降低,逐渐形成有利于土壤微生物生存的最适水热环境,中海拔处较高的微生物生物量及活性提高了植被凋落物被分解的速率(Miki, 2012; Ren *et al.*, 2018),从而使该地区土壤具有相对丰富的C、N含量(He *et al.*, 2016; 董廷发, 2021),而低海拔地区土壤养分含量并不高,可能是由于该区域较高的温度导致土壤微生物消耗了大量养分(Su

et al., 2020)。高海拔地区的低温环境会影响水的黏度与膜的渗透性,通常会抑制微生物的活性,最终降低C和N的有效性(Reich & Oleksyn, 2004)。与SOC和TN相反,随海拔上升TP在土壤中的含量持续增加,表明高海拔地区能够比低海拔地区维持更多的P。一方面,低海拔处的高降水量加剧了土壤P的流失,不利于P储存。另一方面,高海拔处较冷的温度和较低的降水量会导致微生物多样性与丰度的降低,进而限制磷库的分解,有助于土壤P的积聚(Tan & Wang, 2016; Zhang *et al.*, 2019)。

各海拔灌丛土壤SOC、TN、TP含量都表现出随土层加深而减少的垂直分布特征,与姜哲浩等(2019)对三江源区土壤养分的研究结果一致。这是因为表层土壤含有大量的腐殖质,而且是植物根系分布集中区,受外界环境因素及植被凋落物养分归还的影响,养分在土壤表层聚集(张莎莎等, 2020),同时,植物生长对养分的吸收与富集作用也使得0–10 cm层土壤TN和TP含量更高。前人研究发现土壤深度增加导致的土壤密度变化也与土壤养分含量之间具有显著相关性(吴昊等, 2019)。土层加深,土壤密度增大,土壤板结程度也相应增强,植物根系

数量减少, 有机质积累量随之下降; 此外, 土层加深还会造成土壤孔隙度的减小, 以及通透性的下降, 进而导致参与分解有机质的微生物数量和活性降低(邱新彩等, 2018)。这些因素的共同作用使得研究区表层土壤C、N、P含量高于深层土壤。

3.2 海拔对土壤C:N:P化学计量特征的影响

不同海拔土壤C、N、P化学计量比是揭示其耦合机制和养分限制的有力指标(Hobbie & Gough, 2002)。本研究得到的土壤C:P、N:P、C:N均值分别为166.71、13.20、12.51, 均高于中国陆地土壤C:P、N:P、C:N均值 61.0 ± 0.9 、 5.2 ± 0.1 和 11.9 ± 0.1 (Tian *et al.*, 2010)。

C:N是氮矿化能力的标志, 可反映土壤有机质的分解状况。C:N与SOC分解速率成反比, 低C:N (<25)表明有机质分解速度大于积累速度, 土壤C释放, 进而导致土壤质量降低(Bui & Henderson, 2013)。该研究发现排露沟流域高海拔地区灌丛土壤C:N远低于中低海拔地区, 说明高海拔处的低温低降水等条件使得土壤肥力下降, 不利于植被的生长发育。土壤C:P和N:P随海拔上升均呈先增加后减小趋势, 和赵维俊等(2016)的研究结果一致, 这可能与酸性磷酸酶和低分子有机酸等根系分泌物有关, 它们可以使土壤酸化, 进而改变土壤养分的溶解。Hou等(2014)指出较低的C:P表明土壤在有机质分解过程中有释放磷的倾向, 促进土壤有效磷含量增加。该流域高海拔地区的C:P显著低于其他海拔, 意味着高海拔处土壤P含量相对丰富。N:P可用作养分限制阈值的诊断指标, 一般定义为 $N:P > 16$ 时, P供应不足; $N:P < 14$ 时, N供应不足(Tessier & Raynal, 2003)。该研究发现3 400 m处0–10 cm层土壤N:P达到最大值(16.34 ± 0.37) $g \cdot kg^{-1}$, 表明中海拔地区对植物生长和养分循环的P限制最大; 此后呈现下降趋势, 这是因为高海拔处的低温可能会抑制有机质的矿化和分解作用, 从而降低N的有效性(Hobbie *et al.*, 2000; Reich & Oleksyn, 2004), 同时也说明排露沟流域高寒灌丛在较高海拔处的N限制随海拔的升高而增强。此外, 该流域各海拔10–20 cm层土壤N:P始终低于0–10 cm层, 意味着深层土壤受N制约更为严重。

3.3 土壤C、N、P含量与化学计量比之间的相关性

对土壤养分含量与生态化学计量比之间的相关性进行分析检测, 有助于阐明C:N:P在不同海拔下各指标变量间的平衡机制, 合理解释土壤养分之间

的耦合过程(牛瑞龙等, 2016)。本研究发现SOC含量与TN含量、TP含量及C:N:P计量比之间均具有显著正相关性, 这一分析结果证明了土壤有机质在促进土壤养分循环、维持土壤养分平衡方面占据着主导地位。此外, 土壤N:P和C:P的变化受SOC、TN、TP含量的共同影响, 这与以往大多研究结果(He *et al.*, 2016; 张广帅等, 2016; 张莎莎等, 2020)类似, 从一定程度上揭示了土壤养分之间的相互耦合(Wu *et al.*, 2013)。

3.4 土壤C:N:P化学计量特征与环境因子在海拔梯度上的相关性

降水量、气温等气候因子是制约土壤养分含量高低和影响土壤C、N、P化学计量比的重要因素(Famiglietti *et al.*, 1998)。土壤P主要来自岩石风化作用(Jiang *et al.*, 2019), 相比于SOC和TN, 受气候因子的影响更强。本研究结果显示生长季平均气温与土壤C:N、C:P和N:P之间均存在正相关关系, 这与Zhang等(2019)对长白山不同海拔土壤养分化学计量特征的研究结果有所区别, 他们的研究结果显示土壤温度与C:N显著负相关, 与C:P和N:P正相关, 这可能是受降水和土壤水分的影响(肖烨等, 2014)。土壤水分是土壤元素迁移与循环的重要载体, 可以直接影响土壤养分含量和植物生长。Aponte等(2010)研究发现, 较低的土壤含水率不利于植被生长, 土壤SOC的积累受到遏制, 从而导致高海拔地区的土壤C:N较低。另一方面, 在更高的降水和湿度条件下, 土壤风化严重, P从母质中快速释放并大量淋失造成土壤P浓度低, 从而使得中低海拔地区的C:P和N:P远高于较高海拔(Manzoni *et al.*, 2010)。不同母质发育的土壤pH间具有显著差异(王珏等, 2022), 各土层土壤pH与TP含量呈显著正相关关系, 通过影响土壤P的来源和储存, 进而调控深层土壤C:P与N:P。土壤SOC和TN含量不受土壤pH的影响, 在0–10 cm层与灌丛地上生物量呈正相关关系, 这是因为土壤SOC、TN含量主要源于植被凋落物和根系分泌物等有机质的输入(Yu & Chi, 2020; Zhang *et al.*, 2021), 但随土壤深度增加, 有机质的输入能力减小, 使得该研究区土壤SOC、TN含量与灌丛地上生物量的相关性沿土层加深而减弱。研究区各海拔10–20 cm层土壤N:P均小于16, 意味着灌丛生长始终受N的制约, 故其地上生物量与深层土壤TN含量之间仍存在显著相关性, 而与SOC含量不相关。土壤P是

一种沉积元素, 其含量主要受成土母质的影响 (Jiang *et al.*, 2019), 因而灌丛地上生物量在各土层间均与TP含量无相关性。除以上因素外, 土壤C、N、P生态化学计量特征还受到人类活动、坡度、坡向及植被类型等多种因素的影响, 可在今后进行更加深入地探究。

4 结论

研究发现, 祁连山排露沟流域土壤C、N、P含量及化学计量特征在海拔梯度上变化显著。随着海拔升高, 各土层土壤SOC、TN含量均先增后降, TP含量则一直增加。C:P和N:P在中海拔处达到最高值, 表明中海拔地区对植物生长和养分循环的P限制最大, C:N随海拔升高总体呈下降趋势反映了土壤质量的降低。各海拔土壤养分聚集在土壤表层, C:P和N:P随土壤深度增加而减小, C:N在土层间变化不明显。土壤SOC、TN和TP含量与C:N:P之间普遍存在相关性, 说明排露沟流域灌丛土壤的养分之间存在一定的耦合机制。灌丛地上生物量与TP含量间不存在相关关系, 在0–10 cm层和土壤SOC、TN含量呈正相关关系, 土壤pH仅与TP含量呈显著负相关关系, 反映了土壤C、N、P形成和储存的机制, 即SOC、TN含量主要与植被生长有关, 而TP主要受土壤性质的影响。除TN外, 土壤SOC含量、TP含量和C:N:P均受降水量、气温的显著影响。

参考文献

- Aponte C, Mara  n T, García LV (2010). Microbial C, N and P in soils of Mediterranean oak forests: influence of season, canopy cover and soil depth. *Biogeochemistry*, 101, 77–92.
- Bui EN, Henderson BL (2013). C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 373, 553–568.
- Dong TF (2021). Soil nutrients and their ecological stoichiometry of *Pinus yunnanensis* forest along an elevation gradient. *Chinese Journal of Ecology*, 40, 672–679. [董廷发 (2021). 不同海拔云南松林土壤养分及其生态化学计量特征. 生态学报, 40, 672–679.]
- Famiglietti JS, Rudnicki JW, Rodell M (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 210, 259–281.
- Feng XY, Lin PF, Zhao WZ (2022). The physiological constraints of alpine treeline in Qilian Mountains. *Forest Ecology and Management*, 503, 119761. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119761.
- Gao HN, Li CX, Sun XM, Zhang Y, Chen NL (2021). Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains. *Journal of Desert Research*, 41, 219–227. [高海宁, 李彩霞, 孙小妹, 张勇, 陈年来 (2021). 祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征. 中国沙漠, 41, 219–227.]
- He XJ, Hou EQ, Liu Y, Wen DZ (2016). Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China. *Scientific Reports*, 6, 24261. DOI: 10.1038/srep24261.
- Hobbie SE, Gough L (2002). Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska. *Oecologia*, 131, 453–462.
- Hobbie SE, Schimel JP, Trumbore SE, Randerson JR (2000). Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils. *Global Change Biology*, 6, 196–210.
- Hou EQ, Chen CR, Wen DZ, Liu X (2014). Relationships of phosphorus fractions to organic carbon content in surface soils in mature subtropical forests, Dinghushan, China. *Soil Research*, 52, 55–63.
- Hu L, Xiang ZY, Wang GX, Rafique R, Liu W, Wang CT (2016). Changes in soil physicochemical and microbial properties along elevation gradients in two forest soils. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31, 242–253.
- Jiang L, He ZS, Liu JF, Xing C, Gu XG, Wei CS, Zhu J, Wang XL (2019). Elevation gradient altered soil C, N, and P stoichiometry of *Pinus taiwanensis* forest on Daiyun Mountain. *Forests*, 10, 1089. DOI: 10.3390/f10121089.
- Jiang ZH, Zhou Z, Chen JZ, Zhang DG, Chen JG, Liu XN (2019). Soil nutrient and stoichiometry of alpine steppe under different altitudes in the Three-River Headwaters Region. *Acta Agrestia Sinica*, 27, 1029–1036. [姜哲浩, 周泽, 陈建忠, 张德罡, 陈建纲, 柳小妮 (2019). 三江源区不同海拔高寒草原土壤养分及化学计量特征. 草地学报, 27, 1029–1036.]
- Lal R (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623–1627.
- Li DW, Wang ZQ, Tian HX, He WX, Geng ZC (2017). Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation. *Acta Pedologica Sinica*, 54, 160–170. [李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和文祥, 耿增超 (2017). 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征. 土壤学报, 54, 160–170.]
- Ma J, Liu XD, Jin M, Zhao WJ, Jing WM, Wang RX (2021). Soil ecological stoichiometry of five typical shrubs in Qilian Mountain. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 41, 1391–1400. [马剑, 刘贤德, 金铭, 赵维俊, 敬文茂, 王荣新 (2021). 祁连山5种典型灌丛土壤生态化学计量特征. 西北植物学报, 41, 1391–1400.]
- Manzoni S, Trofymow JA, Jackson RB, Porporato A (2010). Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecological Monographs*, DOI: 10.17521/cjpe.2022.0082

- 80, 89-106.
- Miki T (2012). Microbe-mediated plant-soil feedback and its roles in a changing world. *Ecological Research*, 27, 509-520.
- Mooshammer M, Wanek W, Zechmeister-Boltenstern S, Richter A (2014). Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources. *Frontiers in Microbiology*, 5, 22. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00022.
- Müller M, Oelmann Y, Schickhoff U, Böhner J, Scholten T (2017). Himalayan treeline soil and foliar C:N:P stoichiometry indicate nutrient shortage with elevation. *Geoderma*, 291, 21-32.
- Niu RL, Gao X, Xu FL, Wang WL, Wang LL, Sun PY, Bai XF (2016). Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of soil and leaves from young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* growing in a Qinling Mountain plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 7384-7392. [牛瑞龙, 高星, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 孙鹏跃, 小白芳 (2016). 秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 36, 7384-7392.]
- Nottingham AT, Turner BL, Whitaker J, Ostle NJ, McNamara NP, Bardgett RD, Salinas N, Meir P (2015). Soil microbial nutrient constraints along a tropical forest elevation gradient: a belowground test of a biogeochemical paradigm. *Biogeosciences*, 12, 6071-6083.
- Qiu XC, Peng DL, Li WL, Jiang HC (2018). Soil physicochemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantations of different ages in Yanqing, Beijing. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 24, 221-229. [邱新彩, 彭道黎, 李伟丽, 姜昊辰 (2018). 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质. 应用与环境生物学报, 24, 221-229.]
- Reich PB, Oleksyn J (2004). Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 11001-11006.
- Ren CJ, Zhang W, Zhong ZK, Han XH, Yang GH, Feng YZ, Ren GX (2018). Differential responses of soil microbial biomass, diversity, and compositions to altitudinal gradients depend on plant and soil characteristics. *Science of the Total Environment*, 610-611, 750-758.
- Ren CJ, Zhao FZ, Shi Z, Chen J, Han XH, Yang GH, Feng YZ, Ren GX (2017). Differential responses of soil microbial biomass and carbon-degrading enzyme activities to altered precipitation. *Soil Biology & Biochemistry*, 115, 1-10.
- Shan S, Coleman M, Kimsey Jr M (2014). Soil soluble nitrogen availability across an elevation gradient in a cold-temperate forest ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 78, S217-S224.
- Su YQ, Wu ZL, Xie PY, Zhang L, Chen H (2020). Warming effects on topsoil organic carbon and C:N:P stoichiometry in a subtropical forested landscape. *Forests*, 11, 66. DOI: 10.3390/f11010066.
- Tan QQ, Wang GA (2016). Decoupling of nutrient element cycles in soil and plants across an altitude gradient. *Scientific Reports*, 6, 34875. DOI: 10.1038/srep34875.
- Tessier JT, Raynal DJ (2003). Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 40, 523-534.
- Tian H, Chen G, Zhang C, Melillo JM, Hall CAS (2010). Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 98, 139-151.
- Tsunoda T, Kachi N, Suzuki JI (2014). Interactive effects of soil nutrient heterogeneity and belowground herbivory on the growth of plants with different root foraging traits. *Plant and Soil*, 384, 327-334.
- Wang J, Zhou WJ, Shang GD, Tan J, Tang D, Cao S (2022). Comprehensive evaluation of soil nutrient characteristics and fertility of citrus orchard with different parent materials. *Chinese Journal of Ecology*, 41, 933-940. [王珏, 周卫军, 商贵铎, 谭洁, 唐豆, 曹胜 (2022). 不同母质柑橘园土壤养分特征及肥力综合评价. 生态学杂志, 41, 933-940.]
- Wang XN, Xu DH, Wang XJ, Fang XW (2022). Changes of shrub community structure with altitudinal gradient and longitude in Qilian Mountains. *Ecology and Environmental Sciences*, 31, 231-238. [王小娜, 徐当会, 王谢军, 方向文 (2022). 祁连山灌丛群落结构特征随海拔梯度和经度的变化. 生态环境学报, 31, 231-238.]
- Wu H, Zou MR, Wang SQ, Wan HX (2019). Eco-stoichiometry characteristics of soil within pine and oak mixed forest and their responses to elevation gradient in Qinling Mountains. *Ecology and Environmental Sciences*, 28, 2323-2331. [吴昊, 邹梦茹, 王思芊, 万洪秀 (2019). 秦岭松栎林土壤生态化学计量特征及其对海拔梯度的响应. 生态环境学报, 28, 2323-2331.]
- Wu JX, Wang YX, Chen QB, Tong ZL (2013). Soil improvement of *Pinus yunnanensis* forest at different age in central Yunnan Plateau. *Advanced Materials Research*, 864-867, 2565-2568.
- Wu W, He XD, Zhou QX (2010). Review on N:P stoichiometry in eco-system. *Journal of Desert Research*, 30, 296-302. [郭畏, 何兴东, 周启星 (2010). 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展. 中国沙漠, 30, 296-302.]
- Wu YH, Zhou J, Yu D, Sun SQ, Luo J, Bing HJ, Sun HY (2013). Phosphorus biogeochemical cycle research in mountainous ecosystems. *Journal of Mountain Science*, 10, 43-53.
- Xiao L, Li P, Shi P, Liu Y (2019). Soil nutrient stoichiometries and enzymatic activities along an elevational gradient in the dry-hot valley region of southwestern China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65, 322-333.
- Xiao Y, Shang LN, Huang ZG, Zhang WG, Xue ZS, Zhang ZS,

- Lü XG (2014). Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mountain swamps of eastern Jilin Province. *Scientia Geographica Sinica*, 34, 994-1001. [肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 张文广, 薛振山, 张仲胜, 吕宪国 (2014). 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征. 地理科学, 34, 994-1001.]
- Xie J, Chang SL, Zhang YT, Wang HJ, Song CC, He P, Sun XJ (2016). Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the middle Tianshan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 4363-4372. [谢锦, 常顺利, 张毓涛, 王慧杰, 宋成程, 何平, 孙雪娇 (2016). 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性. 生态学报, 36, 4363-4372.]
- Yu YH, Chi YK (2020). Ecological stoichiometric characteristics of soil at different depths in a karst plateau mountain area of China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29, 969-978.
- Zeng ZX, Wang KL, Liu XL, Zeng FP, Song TQ, Peng WX, Zhang H, Du H (2015). Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of Northwest Guangxi. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 682-693. [曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎 (2015). 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征. 植物生态学报, 39, 682-693.]
- Zhang AL, Li XY, Wu SX, Li L, Jiang Y, Wang RZ, Ahmed Z, Zeng FJ, Lin LS, Li L (2021). Spatial pattern of C:N:P stoichiometry characteristics of alpine grassland in the Altunshan Nature Reserve at North Qinghai-Tibet Plateau. *CATENA*, 207, 105691. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105691.
- Zhang GS, Deng HJ, Du K, Lin YM, Ma RF, Yu W, Wang DJ, Wu CZ, Hong W (2016). Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: a case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 675-687. [张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟 (2016). 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例. 生态学报, 36, 675-687.]
- Zhang SS, Li AQ, Wang HR, Wang JJ, Xu XN (2020). Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in *Cunninghamia lanceolata* plantation across an elevation gradient. *Ecology and Environmental Sciences*, 29, 97-104. [张莎莎, 李爱琴, 王会荣, 王晶晶, 徐小牛 (2020). 不同海拔杉木人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征. 生态环境学报, 29, 97-104.]
- Zhang Y, Li C, Wang ML (2019). Linkages of C:N:P stoichiometry between soil and leaf and their response to climatic factors along altitudinal gradients. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 1820-1829.
- Zhao WJ, Liu XD, Jin M, Zhang XL, Che ZX, Jing WM, Wang SL, Niu Y, Qi P, Li WJ (2016). Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains. *Acta Pedologica Sinica*, 53, 477-489. [赵维俊, 刘贤德, 金铭, 张学龙, 车宗玺, 敬文茂, 王顺利, 牛赞, 齐鹏, 李雯靖 (2016). 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. 土壤学报, 53, 477-489.]

责任编辑: 程晓莉 编辑: 赵航