

DOI: 10.20103/j.stxb.202409062148

刘宝迪, 白其格那, 赵利清, 辛玥, 要振宇, 扈凡斌, 杨延登, 清华, 张迎黎. 昆仑山不同海拔土壤养分及生态化学计量特征. 生态学报, 2025, 45(16):

Liu B D, Bai Q N, Zhao L Q, Xin Y, Yao Z Y, Hu F B, Yang Y D, Qing H, Zhang Y L. Soil nutrients and ecological stoichiometric characteristics at different altitudes in the Kunlun Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16):

昆仑山不同海拔土壤养分及生态化学计量特征

刘宝迪^{1,2}, 白其格那^{1,2}, 赵利清^{1,2}, 辛玥^{1,2}, 要振宇^{1,2}, 扈凡斌^{1,2}, 杨延登^{1,2}, 清华^{1,2,*}, 张迎黎³

1 内蒙古大学生态与环境学院省部共建草地生态学国家重点实验室培育基地, 呼和浩特 010021

2 内蒙古大学蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 呼和浩特 010021

3 乌兰察布市科学技术事业发展中心, 乌兰察布 012000

摘要: 昆仑山的高海拔梯度使该地区的气候和植被类型呈现出明显的垂直分布特征, 因此成为研究山地生态系统土壤养分和生态化学计量特征的重要区域。但关于昆仑山整体尺度上的不同海拔梯度的土壤养分和生态化学计量特征及其驱动因素的研究仍不充分。通过采集昆仑山 1916—4335 m 范围内不同海拔梯度的土壤样品, 分析 0—50 cm 土层土壤有机碳、全氮、全磷含量及其生态化学计量特征, 探讨昆仑山土壤有机碳、全氮、全磷含量和生态化学计量特征随海拔梯度的变化规律, 通过分析土壤全盐量、pH、坡向、坡度、植物群落盖度、群落高度及气候因子与土壤有机碳、全氮、全磷含量和生态化学计量特征的关系, 探讨昆仑山土壤有机碳、全氮、全磷含量和生态化学计量特征形成的驱动因素。研究结果表明: (1) 昆仑山地区土壤有机碳、全氮、全磷含量均随海拔梯度的上升呈显著增加趋势, 但全磷含量随海拔的变化较小, 上升趋势缓慢; 土壤碳氮比不随海拔梯度的变化而变化, 土壤碳磷比和氮磷比随海拔梯度的上升呈显著增加趋势。(2) 昆仑山地区土壤有机碳、全氮含量主要受最热月份最高温度、最干季度降水量、气温季节性变动系数和群落盖度的影响, 而土壤全磷含量主要受土壤全盐量、坡度、最湿季度均温和最热月份最高温度的影响。(3) 昆仑山地区土壤碳氮比主要受群落高度和最干季度降水量的影响, 土壤碳磷比、氮磷比主要受气温季节性变动系数、最干季度降水量和群落盖度影响。文中研究结果为进一步认识山地生态系统的土壤碳、氮、磷生物化学循环特征奠定基础, 有助于更准确地预测山地生态系统如何应对持续的气候变化。

关键词: 昆仑山; 土壤养分; 海拔梯度; 生态化学计量

Soil nutrients and ecological stoichiometric characteristics at different altitudes in the Kunlun Mountains

LIU Baodi^{1,2}, BAI Qigena^{1,2}, ZHAO Liqing^{1,2}, XIN Yue^{1,2}, YAO Zhenyu^{1,2}, HU Fanbin^{1,2}, YANG Yandeng^{1,2}, QING Hua^{1,2,*}, ZHANG Yingli³

1 Inner Mongolia Key Laboratory of Grassland Ecology, School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

2 Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

3 Ulanqab Science and Technology Development Center, Ulanqab 012000, China

Abstract: The high-altitude gradients of the Kunlun Mountains create distinct vertical zonation in climate and vegetation types, making this region a critical area for studying soil nutrients and ecological stoichiometry in mountain ecosystems. However, research on soil nutrients and ecological stoichiometry across different altitude gradients at the whole-scale of the Kunlun Mountains, as well as their driving factors, remains insufficient. This study collected soil samples from different

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0301)

收稿日期: 2024-09-06; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qinghua_515@126.com

altitude gradients (1916 m to 4335 m) in the Kunlun Mountains and analyzed the content of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in the 0—50 cm soil layer, as well as their ecological stoichiometric characteristics, the main objective was to explore how the contents of SOC, TN, TP, and their ecological stoichiometric characteristics varied with the altitude gradient in the Kunlun Mountains, aiming to reveal the underlying patterns of these changes across different elevations. Additionally, this study analyzed the relationships between total soil salinity content, pH, aspect, slope, plant community coverage, community height, and climate factors with SOC, TN, TP contents and ecological stoichiometric characteristics to investigate the driving factors for the formation of SOC, TN, TP contents and ecological stoichiometric characteristics in the Kunlun Mountains. The results showed that: (1) In the Kunlun Mountains region, SOC, TN, and TP contents significantly increased with altitude, although the change in TP content with altitude was relatively small, showing a slow increase. The soil C:N ratio remained stable with altitude, while the C:P and N:P ratios significantly increased as altitude rose. (2) In the Kunlun Mountains region, SOC and TN contents were primarily influenced by the maximum temperature in the hottest month, the precipitation of driest quarter, the seasonal temperature variation coefficient, and plant community coverage, while TP content was mainly affected by total soil salinity content, slope, the mean temperature of wettest quarter and the maximum temperature in the hottest month. (3) In the Kunlun Mountains region, The soil C:N ratio was mainly affected by plant community height and the precipitation of driest quarter, while the C:P and N:P ratios were primarily influenced by the seasonal temperature variation coefficient, the precipitation of driest quarter and plant community coverage. The findings establish an important scientific foundation for understanding carbon-nitrogen-phosphorus cycling processes in high-altitude environments and contribute to better predicting how these fragile mountain ecosystems might respond to ongoing climate change.

Key Words: Kunlun Mountains; soil nutrients; altitude gradient; ecological stoichiometry

生态系统中碳、氮、磷等元素的循环是全球变化研究的重要领域,其中碳与氮、磷等元素的循环过程相互耦合,因此,养分循环的改变将显著影响生态系统的碳循环过程^[1]。土壤生态化学计量学可以研究土壤中碳、氮、磷三种元素的比例关系,深入探讨土壤养分之间相互作用^[2]。在山地生态系统中,碳、氮、磷元素是重要的生态因子,不仅是土壤营养水平的重要指示物,还对山地生态系统的生产力具有重要影响^[3]。目前,国内外关于土壤养分含量及生态化学计量特征的研究主要集中在不同环境因素的影响上,如经纬度^[4-5]、海拔^[6]、土层深度^[7]、土地利用方式^[8]等。由于海拔梯度变化会导致土壤理化性质、植被特征和气候的变化,从而影响土壤养分^[9]。因此,研究土壤生态化学计量特征随海拔的变化非常必要。例如,李丹维等^[9]研究发现,太白山不同海拔的土壤有机碳与全氮含量随海拔梯度的升高先增后降,而土壤全磷含量的空间变异较小;并且在随海拔升高的过程中,阔叶林带的土壤碳氮比、碳磷比呈下降趋势,针叶林带则转变为增加趋势,而氮磷比随海拔梯度升高则表现为先升后降。赵云飞等^[6]对青藏高原东部山地草地不同海拔土壤的研究发现,土壤有机碳、全氮含量及碳磷比、氮磷比随海拔升高而增大,碳氮比随海拔升高先增加后降低,全磷含量的变异性则较小。然而,这些研究主要集中在植被类型丰富、气候类型多样的地区,而针对气候恶劣、海拔较高的荒漠区高山土壤养分的研究还相对缺乏。

昆仑山地处暖温带塔里木荒漠和柴达木荒漠^[10],是亚洲腹地最为干旱的高原高山地区之一,更是全球气候变化的敏感区域^[11]。其独特的地理条件使其拥有多样的动植物资源和生态系统,对于维持区域生物多样性和生态平衡起着重要作用。昆仑山的平均海拔超过 4000 m,海拔相对高差大,气候和植被类型呈现出明显的垂直分布特征,因此成为研究山地生态系统土壤养分和生态化学计量特征的重要区域。已有研究表明,海拔对昆仑山的植被分布起着决定性作用,在昆仑山中段北坡,随海拔梯度的升高土壤有机碳、全氮含量均显著增加,并且高海拔地区的土壤碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比与低海拔地区存在显著差异^[12]。然而,关于昆仑山整体尺度上不同海拔梯度的土壤碳、氮、磷分布特征、生态化学计量特征及其驱动因素的研究

仍不充分。

因此,本研究采集了昆仑山不同海拔梯度的土壤样品,测定了有机碳、全氮、全磷含量,并计算了生态化学计量比,旨在分析:(1)昆仑山土壤养分和生态化学计量比的垂直分布特征;(2)气候因子、土壤理化因子、地形因子以及植被因子对土壤碳、氮、磷元素含量及化学计量比的影响。研究结果对于理解气候变化对环境的影响具有重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区设在新疆且末县附近的昆仑山东部、策勒县附近的昆仑山中部以及叶城县附近的昆仑山西部地区,海拔高度为 1916—4335 m,地理坐标为 36.0949—38.6674 °N,74.9163—85.7605 °E。年平均气温 4.7 °C,极端最高温度为 30.4—34.0 °C,极端最低温度-23.7 °C,年降水量在 22—130 mm,主要集中在 7、8 月份^[3]并且降水分布不均,从西到东逐渐减少。受气候和地理位置影响,该地区有大面积荒漠,同时由于高山众多,孕育出荒漠草原、高寒草原、中生灌丛、山地针叶林、高山草甸,稀疏垫状植物等主要植被类型^[11]。

1.2 土壤样品采集及测定方法

于 2019 年 8 至 9 月、2021 年 8 月开展野外调查和土壤样品采集工作,根据在垂直方向上生长的不同植物群落为依据,沿海拔上升共布设 42 个样地(图 1),主要的植被类型包括荒漠、草原、灌丛、森林。具体采样点的海拔、经纬度及群落类型见表 1。

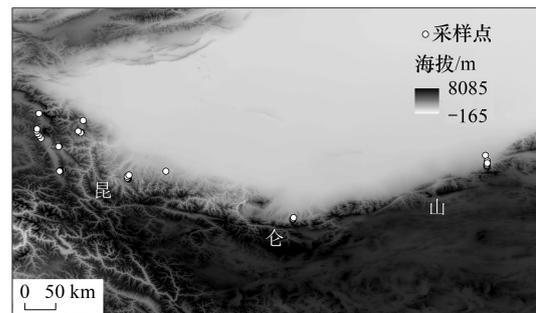


图 1 昆仑山土壤样品采样点图

Fig.1 Map of soil sampling points in Kunlun Mountain

表 1 昆仑山不同海拔梯度下的采样点和群落类型

Table 1 Sampling points and community types under different elevation gradients in the Kunlun Mountains

| 样地编号 Plot number | 群落类型 Community type | 经度 Longitude | 纬度 Latitude | 海拔 Altitude/m | 年降水量 MAP/mm | 年均温 AMT/°C |
|---------------------|--|-----------------|----------------|------------------|----------------|---------------|
| 1 | 红砂(<i>Reaumuria soongarica</i>)荒漠 | 85.7157° | 37.6558° | 1916.8 | 44 | 8.04 |
| 2 | 红砂(<i>Reaumuria soongarica</i>)荒漠 | 78.0257° | 37.2711° | 1978.9 | 22 | 10.10 |
| 3 | 宽苞水柏枝(<i>Myricaria bracteata</i>)灌丛 | 76.0334° | 38.5019° | 2192.2 | 57 | 7.13 |
| 4 | 驼绒藜(<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>) + 内蒙古旱蒿(<i>Artemisia xerophytica</i>)荒漠 | 85.7592° | 37.5129° | 2292.7 | 50 | 6.03 |
| 5 | 内蒙古旱蒿(<i>Artemisia xerophytica</i>)荒漠 | 85.7605° | 37.4662° | 2486.3 | 55 | 4.80 |
| 6 | 合头草(<i>Sympegma regelii</i>)荒漠 | 77.1352° | 37.1781° | 2537.4 | 29 | 7.30 |
| 7 | 纤细绢蒿(<i>Seriphidium gracilescens</i>) + 短花针茅(<i>Stipa breviflora</i>)草原 | 85.7504° | 37.4359° | 2662.8 | 57 | 4.11 |
| 8 | 纤细绢蒿(<i>Seriphidium gracilescens</i>)草原 | 77.0930° | 37.1478° | 2664.9 | 28 | 5.96 |
| 9 | 昆仑针茅(<i>Stipa roborowskyi</i>)草原 | 81.1004° | 36.1493° | 2741.9 | 29 | 5.18 |
| 10 | 纤细绢蒿(<i>Seriphidium gracilescens</i>)草原 | 77.0960° | 37.0998° | 2857.8 | 28 | 4.58 |
| 11 | 昆仑针茅(<i>Stipa roborowskyi</i>)群落 | 85.7479° | 37.4095° | 2867 | 61 | 2.86 |
| 12 | 西山羊茅(<i>Festuca olgae</i>)草原 | 81.0874° | 36.1184° | 2918.3 | 31 | 4.97 |
| 13 | 西山羊茅(<i>Festuca olgae</i>)草原 | 77.1074° | 37.0882° | 2950.5 | 32 | 3.83 |
| 14 | 短花针茅(<i>Stipa breviflora</i>)草原 | 77.1174° | 37.0896° | 3017.1 | 32 | 3.40 |
| 15 | 座花针茅(<i>Stipa subsessiliflora</i>) + 纤细绢蒿(<i>Seriphidium gracilescens</i>)草原 | 85.7488° | 37.4061° | 3020.7 | 66 | 1.85 |
| 16 | 昆仑方枝柏(<i>Juniperus centrasiatca</i>)林 | 77.1171° | 37.0900° | 3044.9 | 32 | 3.40 |

续表

| 样地编号 Plot number | 群落类型 Community type | 经度 Longitude | 纬度 Latitude | 海拔 Altitude/m | 年降水量 MAP/mm | 年均温 AMT/°C |
|---------------------|--|-----------------|----------------|------------------|----------------|---------------|
| 17 | 雪岭杉(<i>Picea schrenkiana</i>)林 | 77.1276° | 37.0875° | 3080.8 | 32 | 3.12 |
| 18 | 西山羊茅(<i>Festuca olgae</i>)草原 | 81.0810° | 36.0949° | 3114.8 | 31 | 3.83 |
| 19 | 寒生羊茅(<i>Festuca kryloviana</i>)草原 | 77.1195° | 37.0912° | 3121 | 32 | 3.40 |
| 20 | 西山羊茅(<i>Festuca olgae</i>)草原 | 85.7471° | 37.3964° | 3145.2 | 69 | 1.28 |
| 21 | 芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>) + 纤细绢蒿(<i>Seriphidium gracilescens</i>)草原 | 85.7484° | 37.4007° | 3219.7 | 66 | 1.85 |
| 22 | 合头草(<i>Sympegma regelii</i>)荒漠 | 74.4463° | 37.8716° | 3247 | 130 | -4.38 |
| 23 | 西山羊茅(<i>Festuca olgae</i>)草原 | 75.9841° | 38.2155° | 3304.2 | 60 | 1.10 |
| 24 | 荒漠镰芒针茅(<i>Stipa caucasica subsp. desertorum</i>) + 绢蒿(<i>Seriphidium</i>)草原 | 74.9685° | 38.6674° | 3320 | 80 | 1.30 |
| 25 | 合头草(<i>Sympegma regelii</i>)荒漠 | 75.0204° | 38.0682° | 3373 | 66 | 2.09 |
| 26 | 驼绒藜(<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>) + 合头草(<i>Sympegma regelii</i>)荒漠 | 75.4484° | 37.8716° | 3401 | 61 | 1.68 |
| 27 | 驼绒藜(<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>)荒漠 | 74.9784° | 38.1304° | 3562 | 68 | 0.70 |
| 28 | 驼绒藜(<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>)荒漠 | 75.4678° | 37.2740° | 3711 | 64 | 0.54 |
| 29 | 驼绒藜(<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>) + 合头草(<i>Sympegma regelii</i>)荒漠 | 74.9348° | 38.1834° | 3719 | 72 | -0.33 |
| 30 | 荒漠镰芒针茅(<i>Stipa caucasica subsp. desertorum</i>)草原 | 74.9258° | 38.2959° | 3748 | 76 | -1.05 |
| 31 | 东方针茅(<i>Stipa orientalis</i>)草原 | 75.4740° | 37.2846° | 3770 | 63 | 0.47 |
| 32 | 鬼箭锦鸡儿(<i>Caragana jubata</i>)灌丛 | 75.9783° | 38.2027° | 3776.4 | 63 | 0.12 |
| 33 | 高山绢蒿(<i>Seriphidium rhodanthum</i>)草原 | 75.4813° | 37.2885° | 3819 | 65 | 0.01 |
| 34 | 荒漠镰芒针茅(<i>Stipa caucasica subsp. desertorum</i>) + 高山绢蒿(<i>Seriphidium rhodanthum</i>)草原 | 75.4898° | 37.2909° | 3863 | 69 | -0.85 |
| 35 | 西山羊茅(<i>Festuca olgae</i>)草原 | 75.4902° | 37.2906° | 3872 | 69 | -0.85 |
| 36 | 荒漠镰芒针茅(<i>Stipa caucasica subsp. desertorum</i>)草原 | 75.9169° | 38.2385° | 3881 | 69 | -0.14 |
| 37 | 高山绢蒿(<i>Seriphidium rhodanthum</i>)荒漠 | 74.9163° | 38.2384° | 3897 | 79 | -1.46 |
| 38 | 座花针茅(<i>Stipa subsessiliflora</i>)草原 | 75.49195° | 37.2931° | 3925 | 69 | -1.25 |
| 39 | 东方针茅(<i>Stipa orientalis</i>)草原 | 75.4918° | 37.2931° | 3973.5 | 69 | -1.25 |
| 40 | 西山羊茅(<i>Festuca olgae</i>)草原 | 75.5062° | 37.2940° | 4057 | 75 | -1.72 |
| 41 | 羊茅(<i>Festuca ovina</i>)草原 | 75.5234° | 37.2954° | 4287 | 85 | -3.09 |
| 42 | 矮生蒿草(<i>Kobresia humilis</i>)草原 | 75.5253° | 37.2936° | 4335 | 92 | -4.03 |

MAP: 年降水量 Mean annual precipitation; AMT: 年均温 Annual mean temperature

森林群落共包括 2 个样地, 每个样地设置 1 个 20 m×20 m 的样方, 调查乔木层和灌木层的物种组成、高度和盖度, 并沿样方的对角线均匀设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方调查草本层的物种组成、高度和盖度。灌丛及荒漠群落共设置 14 个样地, 每个样地设置 3 个 10 m×10 m 的样方, 调查灌木层的物种组成、高度和盖度, 并在每个样方中心位置设置 1 个 1 m×1 m 的草本样方调查草本层物种组成、高度和盖度; 草本群落共包括 26 个样地, 每个样地直接设置 3 个 1 m×1 m 的样方, 记录群落的物种组成、高度和盖度。用 GPS 定位记录每个样点的坡度坡向。在每个样地中, 分别在每个 1 m×1 m 草本样方的中心位置, 使用土钻采集 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—50 cm 土层的土壤样品, 对每个样地内所有采样点的同层土壤样品进行混合、剔除石块、风干, 一部分过 2 mm 筛用于全盐量和 pH 的测定, 一部分研磨后过 100 目筛, 用于土壤有机碳、全氮、全磷含量的测定。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定; 土壤全氮含量采用重铬酸钾-硫酸消化法测定; 土壤全磷含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定; 土壤全盐量采用烘干残渣法测定; 土壤 pH 采用电位法测定。

1.3 气象数据的获取

本文采用的气象数据来源于全球气候数据网站 (<http://worldclim.org>), 通过研究区样点的经纬度, 获得

1970—2000 年的 30 年的平均气温日较差(MDR)、年平均气温(AMT)、气温季节性变动系数(TSI;计算方法:年均温标准差 $\times 100$)、气温年较差(TAR)、最热月份最高温度(MAT)、最冷月份最低温度(MIT)、最湿季度均温(MET)、最干季度降水量(PDQ)和年降水量(MAP)数据。

1.4 数据处理

使用 Origin 2021、SPSS 27.0、R 等软件对数据进行统计分析,采用一元线性回归分析分析土壤有机碳、全氮、全磷含量及碳氮比、碳磷比、氮磷比随海拔梯度的变化及其与气候因子、土壤理化性质(全盐量、pH)、地形因子(坡向、坡度)和植被因子(群落高度、群落盖度)之间的关系;采用全子集分析,基于赤池信息准则(AICc)和模型的 R^2 选择最优模型,筛选出气候因子、土壤理化因子、地形因子和植被因子中影响土壤养分及生态化学计量特征的主要因子。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳、全氮、全磷含量随海拔梯度的变化特征

昆仑山不同海拔下土壤的有机碳、全氮、全磷含量的变化趋势如图 2 所示。土壤有机碳含量在 0—10 cm 土层为 1.22—42.40 g/kg,均值为 9.56 g/kg;在 10—20 cm 土层为 0.96—32.98 g/kg,均值为 7.19 g/kg;在 20—30 cm 土层为 1.08—24.85 g/kg,均值为 6.34 g/kg;在 30—50 cm 土层为 1.45—41.52 g/kg,均值为 7.52 g/kg。

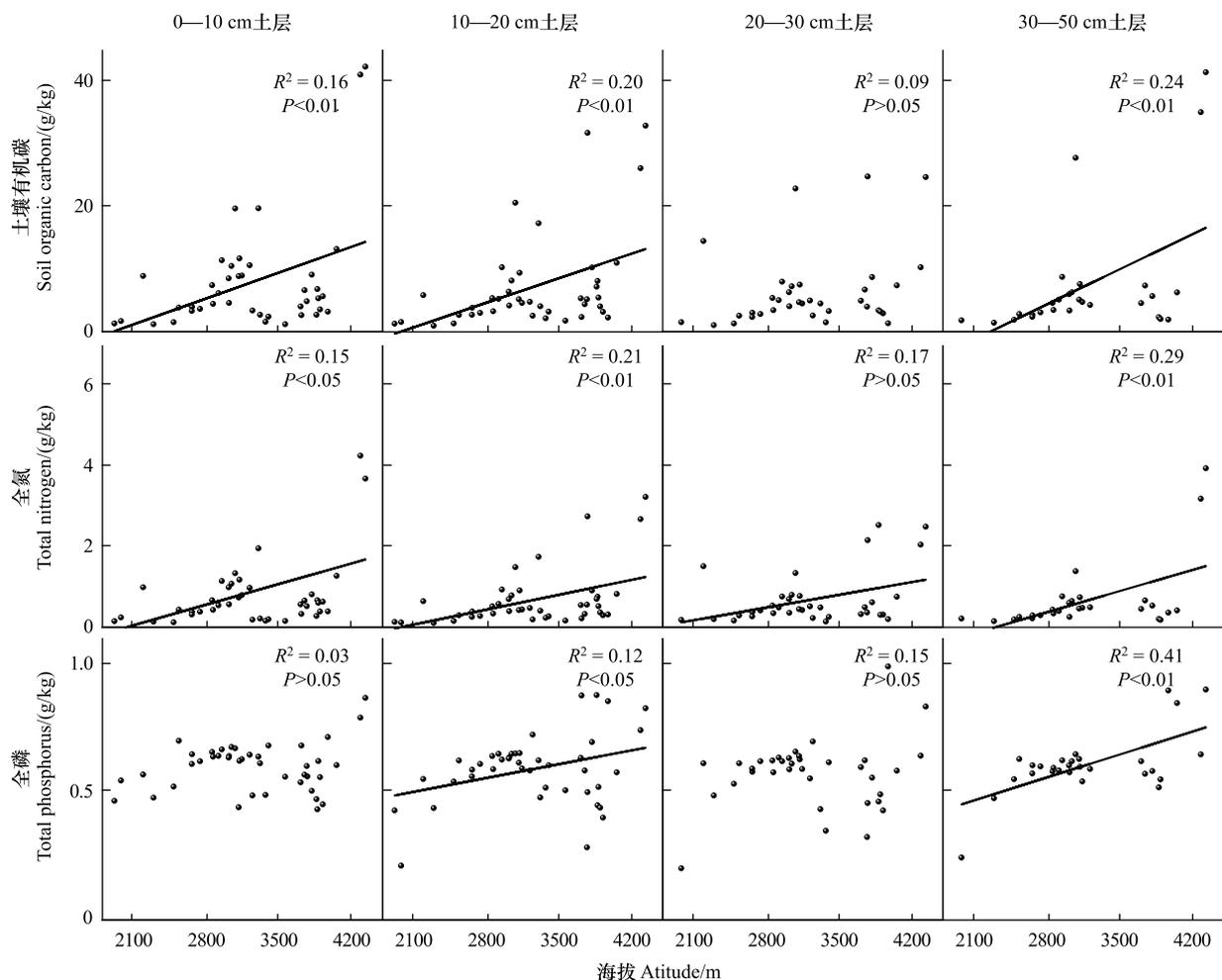


图 2 海拔对土壤养分含量的影响

Fig.2 Effect of elevation on soil nutrient content

黑色实线表示具有显著线性关系; $P < 0.05$ 呈显著相关性, $P < 0.01$ 呈极显著相关性

在 0—20 cm 和 30—50 cm 土层,土壤有机碳含量随海拔梯度的上升呈显著增加的趋势,而在 20—30 cm 土层,土壤有机碳含量并不随海拔梯度的变化而变化。

随着海拔梯度的升高,在 0—50 cm 各土层,土壤全氮含量均呈现显著增加趋势。全氮含量在 0—10 cm 土层为 0.13—5.91 g/kg,均值为 0.90 g/kg;在 10—20 cm 土层为 0.10—3.24 g/kg,均值为 0.68 g/kg;在 20—30 cm 土层为 0.14—2.55 g/kg,均值为 0.69 g/kg;在 30—50 cm 土层为 0.15—3.95 g/kg,均值为 0.67 g/kg。

土壤全磷含量随海拔梯度的变化趋势较为缓慢,在 0—10 cm 和 20—30 cm 土层,全磷含量并不随海拔梯度的变化而变化,在 10—20 cm 和 30—50 cm 土层中,土壤全磷含量随海拔梯度的上升呈现缓慢增加趋势。全磷含量在 0—10 cm 土层为 0.43—0.87 g/kg,均值为 0.60 g/kg;在 10—20 cm 土层为 0.21—0.88 g/kg,均值为 0.59 g/kg;在 20—30 cm 土层为 0.20—0.99 g/kg,均值为 0.57 g/kg;在 30—50 cm 土层为 0.24—0.90 g/kg,均值为 0.61 g/kg。

2.2 土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

土壤有机碳、全氮、全磷的生态化学计量特征分析结果显示(图 3),土壤碳氮比在 0—10 cm 土层为 7.03—18.03,均值为 10.20;10—20 cm 土层为 7.16—13.83,均值为 10.50;20—30 cm 土层为 1.35—16.99,均值为 9.80;30—50 cm 土层为 5.34—19.95,均值为 10.80。在 0—50 cm 各土层,土壤碳氮比随海拔梯度的上升并没有明显的变化趋势。

土壤碳磷比在 0—10 cm 土层为 2.19—135.36,均值为 15.31;10—20 cm 土层为 2.20—63.62,均值为

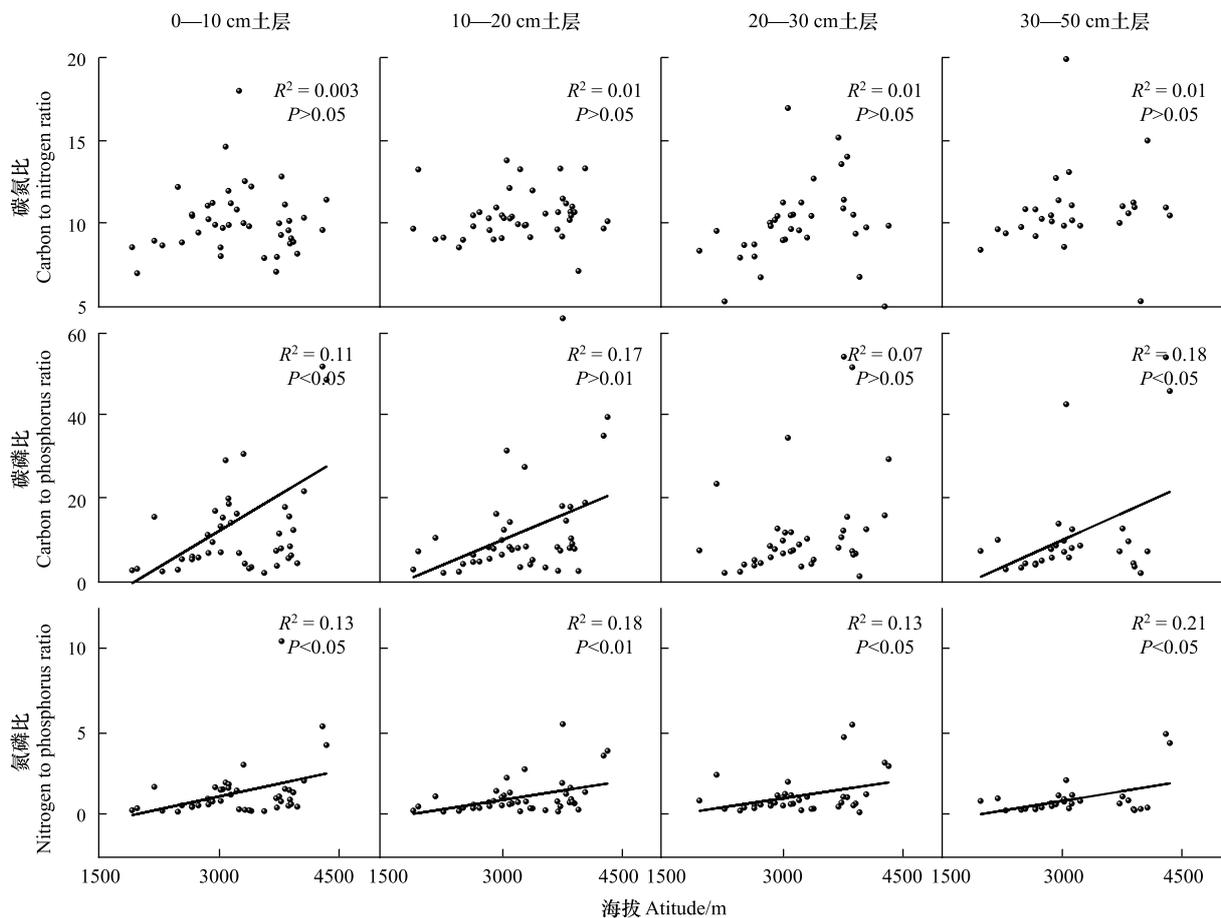


图 3 海拔对生态化学计量比的影响

Fig.3 Effect of elevation on ecological stoichiometric ratios

黑色实线表示具有显著线性关系; $P < 0.05$ 呈显著相关性, $P < 0.01$ 呈极显著相关性

12.00;20—30 cm 土层为 1.39—54.35,均值为 10.98;30—50 cm 土层为 2.17—54.24,均值为 11.54。在 0—20 cm 和 30—50 cm 土层,土壤碳磷比随海拔梯度的上升呈显著的增加趋势;而在 20—30 cm 土层,土壤碳磷比并不随海拔梯度的变化而变化。

土壤氮磷比在 0—10 cm 土层为 0.24—10.53,均值为 1.43;10—20 cm 土层为 0.24—5.52,均值为 1.13;20—30 cm 土层为 0.20—5.49,均值为 1.21;30—50 cm 土层为 0.32—4.94,均值为 1.03。在 0—50 cm 各土层,土壤氮磷比随海拔梯度的升高呈现显著的增加趋势。

2.3 土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征的影响因素分析

通过全子集筛选法,基于 AICc 及模型的 R^2 ,筛选出气候因子、土壤理化因子、地形因子以及植被因子中影响土壤有机碳、全氮、全磷及生态化学计量特征的主要因素(表 2)。0—30 cm 土层的土壤有机碳和全氮含量主要受 MAT、TSI 和群落盖度的影响,30—50 cm 土层的土壤有机碳和全氮含量受 PDQ 和群落盖度的影响;MAT、TSI 与土壤有机碳和全氮含量呈显著负相关关系,PDQ 和群落盖度与土壤有机碳和全氮含量呈显著正相关关系(图 4)。0—10 cm 土层全磷含量主要受土壤全盐量和群落盖度影响,10—30 cm 土层全磷含量仅受 MAT 的影响,30—50 cm 土层全磷含量受到 MET 和坡度的显著影响;MAT、MET 以及土壤全盐量均与土壤全磷含量呈显著负相关关系,群落盖度和坡度与土壤全磷含量呈显著正相关关系(图 4)。

表 2 土壤养分和生态计量特征的最佳影响因子组合

Table 2 Best impact factor combination for soil nutrient and measurement ratios

| 项目 Item | 土层/cm Soil layer | 最佳组合 The best combination | 赤池信息准则 AICc | R^2 | 显著性 Significance | 多元线性回归方程模型 Model of multiple linear regression equation |
|--|---------------------|---------------------------------|----------------|--------|---------------------|---|
| 土壤有机碳 Soil organic carbon | 0—10 | MAT+CC | 318.9184 | 0.4912 | $P < 0.01$ | $Y = -1.23X_1 + 0.34X_2 + 27.09$ |
| | 10—20 | MAT+CC | 318.9184 | 0.4912 | $P < 0.01$ | $Y = -0.84X_1 + 0.21X_2 + 19.84$ |
| | 20—30 | TSI+CC | 194.1681 | 0.7276 | $P < 0.01$ | $Y = -0.03X_1 + 0.20X_2 + 30.68$ |
| | 30—50 | PDQ+CC | 174.9266 | 0.7784 | $P < 0.01$ | $Y = 2.13X_1 + 0.28X_2 - 4.20$ |
| 全氮 Total nitrogen | 0—10 | MAT+CC | 110.1645 | 0.4951 | $P < 0.01$ | $Y = -0.11X_1 + 0.03X_2 + 2.54$ |
| | 10—20 | MAT+CC | 60.2266 | 0.6017 | $P < 0.01$ | $Y = -0.08X_1 + 0.02X_2 + 1.92$ |
| | 20—30 | TSI+CC | 54.0412 | 0.5183 | $P < 0.01$ | $Y = -0.01X_1 + 0.01X_2 + 5.58$ |
| | 30—50 | PDQ+CC | 42.5907 | 0.7381 | $P < 0.01$ | $Y = 0.22X_1 + 0.23X_2 + 1.99$ |
| 全磷 Total phosphorus | 0—10 | TSC+CC | -83.5200 | 0.2401 | $P < 0.01$ | $Y = -0.01X_1 + 0.02X_2 - 0.28$ |
| | 10—20 | MAT | -51.63281 | 0.2138 | $P < 0.01$ | $Y = -0.02X_1 + 1.02$ |
| | 20—30 | MAT | -42.2031 | 0.1499 | $P < 0.05$ | $Y = -0.02X_1 + 0.93$ |
| | 30—50 | MET+S | -51.6387 | 0.5507 | $P < 0.01$ | $Y = -0.02X_1 + 0.003X_2 + 0.81$ |
| 碳氮比 Carbon to nitrogen ratio | 0—10 | PDQ+CH | 172.1713 | 0.2874 | $P < 0.01$ | $Y = 0.30X_1 + 0.33X_2 + 9.31$ |
| | 10—20 | CH | 149.8075 | 0.0986 | $P < 0.05$ | $Y = 0.18X_1 + 10.34$ |
| | 20—30 | CH | 177.2891 | 0.1358 | $P < 0.05$ | $Y = 0.40X_1 + 9.40$ |
| | 30—50 | CH | 120.7638 | 0.4107 | $P < 0.01$ | $Y = 0.53X_1 + 10.20$ |
| 碳磷比 Carbon to phosphorus ratio | 0—10 | TSI+CC | 363.6997 | 0.4239 | $P < 0.01$ | $Y = -0.13X_1 + 0.49X_2 + 132.99$ |
| | 10—20 | TSI+CC | 363.6997 | 0.4239 | $P < 0.01$ | $Y = -0.13X_1 + 0.49X_2 + 132.99$ |
| | 20—30 | TSI+CC | 245.8945 | 0.5936 | $P < 0.01$ | $Y = -0.05X_1 + 0.29X_2 + 55.95$ |
| | 30—50 | PDQ+CC | 195.5668 | 0.7351 | $P < 0.01$ | $Y = 2.49X_1 + 0.38X_2 - 3.72$ |
| 氮磷比 Nitrogen to phosphorus ratio | 0—10 | TSI+CC | 151.8342 | 0.4311 | $P < 0.01$ | $Y = -0.01X_1 + 0.04X_2 + 11.10$ |
| | 10—20 | TSI+CC | 104.5089 | 0.5082 | $P < 0.01$ | $Y = -0.01X_1 + 0.03X_2 + 7.29$ |
| | 20—30 | TSI+CC | 105.5530 | 0.3808 | $P < 0.01$ | $Y = -0.01X_1 + 0.02X_2 + 10.80$ |
| | 30—50 | PDQ+CC | 59.7228 | 0.7021 | $P < 0.01$ | $Y = 0.26X_1 + 0.03X_2 - 0.16$ |

TSI:气温季节性变动系数 Temperature seasonality index; MAT:最热月份最高温度 Max temperature of warmest month; MET:最湿季度均温 Mean temperature of wettest quarter; PDQ:最干季度降水量 Precipitation of driest quarter; TSC:全盐量 Total soil salinity; CH:群落高度 Community height; CC:群落盖度 Community cover; S:坡度 Slope

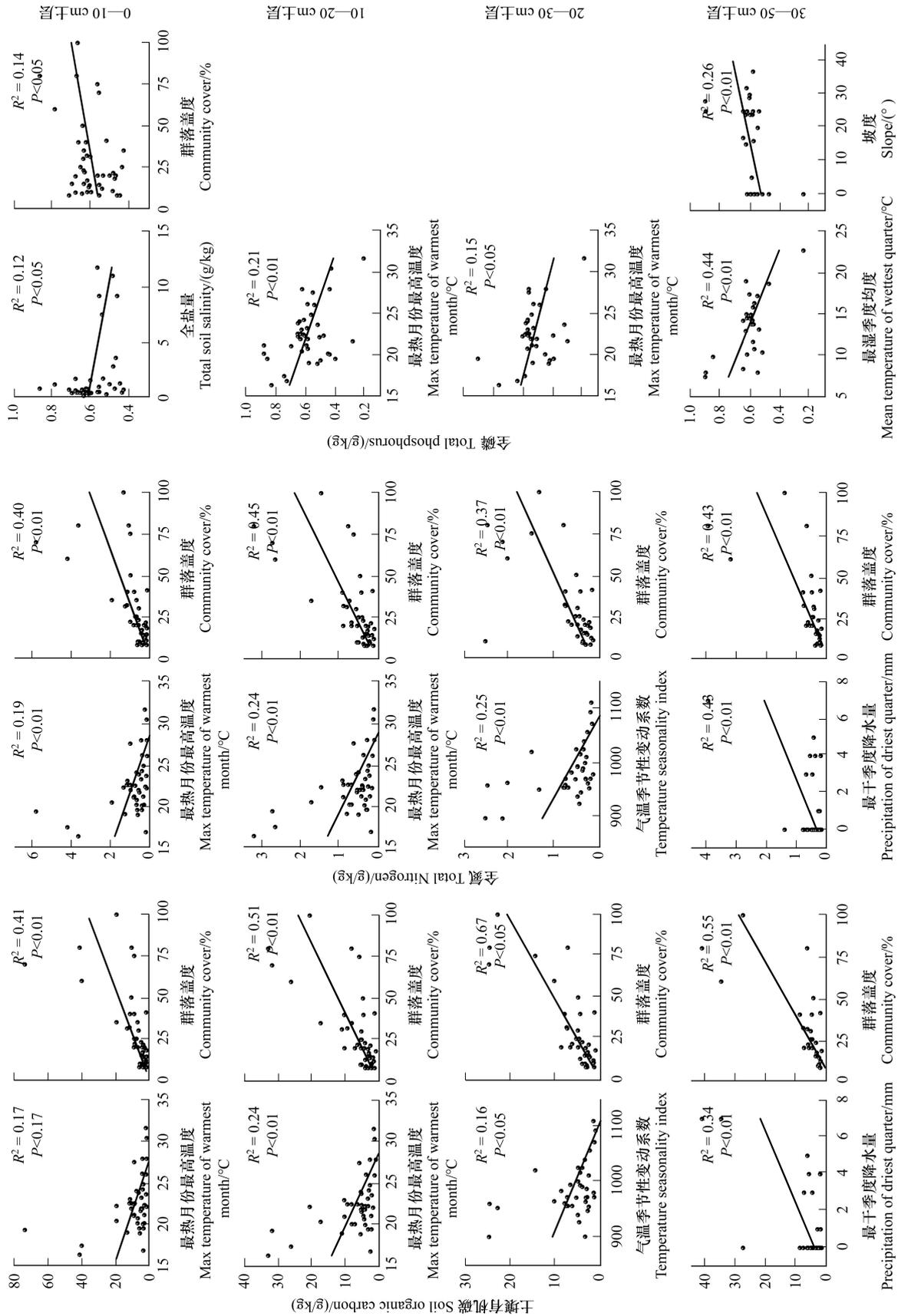


图4 最佳组合影响因子对土壤养分含量的影响
 Figure.4 Effect of the best combination influence factors on soil nutrient content
 黑色实线表示具有显著线性关系; $P < 0.05$ 呈显著相关性, $P < 0.01$ 呈极显著相关性

0—10 cm 土层碳氮比主要受 PDQ 和群落高度的影响,10—50 cm 土层碳氮比均只受群落高度的影响;PDQ 和群落高度均与土壤碳氮比呈显著正相关关系(图 5)。0—30 cm 土层碳磷比和氮磷比均受到 TSI 和群落盖度的影响,30—50 cm 土层的碳磷比和氮磷比均受 PDQ 和群落盖度的影响;TSI 与土壤碳磷比、氮磷比呈显著负相关关系,PDQ 和群落盖度与土壤碳磷比和氮磷比呈显著正相关关系(图 5)。

3 讨论

3.1 不同海拔土壤养分和生态化学计量特征

本研究表明,随着海拔的增加,有机碳和全氮的含量显著上升,这是由于高海拔区域的温度低,降水量大,微生物活性弱,有机物分解速率低,因此土壤有机碳和全氮含量积累量显著增加^[13]。这与李相楹等^[5]对梵净山不同海拔土壤碳、氮、磷的研究结果一致。此外,大气氮沉降可能也是一个重要因素,李茂楠等^[14]对云南亚热带常绿阔叶林的研究表明大气氮沉降显著增加了土壤全碳和全氮含量,而昆仑山高海拔地区降水量增加,促使大气中颗粒物及气体的沉降,将更多的氮和其他营养物质带入土壤,从而促进了土壤有机碳、全氮含量的增加。土壤全磷含量随海拔梯度的变化较小,含量分布较为均衡,这与李新星等^[2]对马街山土壤养分的研究结果一致。土壤全磷的含量在不同海拔高度的空间差异明显低于土壤有机碳和全氮,这是因为磷作为沉积元素,主要来源于岩石的风化,并且其迁移率较低,因此其分布相对稳定^[15-17]。有研究表明,草地^[18]、森林^[19-20]、灌丛^[21-22]等生态系统在同一海拔梯度下土壤有机碳、全氮、全磷含量均随土层深度的增加而降低,土壤养分更多的聚集在土壤表层。这是由于土壤碳、氮、磷等元素主要来源于动植物分泌物、排泄物及微生物残体,土层表面聚集的凋落物,经过微生物的分解作用,使得土壤中碳、氮、磷元素的输入增加^[5]。而在本研究中,随着土层深度的增加,土壤中的有机碳、全氮和全磷的含量并未表现出明显的变化趋势。与上述研究结果并不一致,这是由于荒漠生态系统植被稀疏,地表凋落物少,所以土壤养分的主要来源是植物根系与外界的交换作用,根系分泌物会增加土壤养分含量,而土壤植物根系分布在不同土层的集中区,致使荒漠生态系统的土壤养分含量随土层深度增加并无明显变化趋势^[23]。也有研究发现不同生态系统的地表植被对土壤碳、氮、磷元素累积速率的影响有着明显差异^[24-25],这也使本研究结果进一步得到了证实。

在土壤生态化学计量特征方面,海拔梯度的变化对 0—50 cm 土层土壤碳氮比并无显著影响,这与张广帅等^[26]在云南小江流域不同海拔梯度土壤碳氮比的研究结果一致。这可能是由于随着海拔的升高,环境因子的变化使得碳氮的增加速率保持一致^[6]。赵云飞等^[6]研究发现碳氮比也有相对稳定的结果,是因为碳、氮含量存在极显著正相关关系。海拔的变化会引起植被类型发生改变,而昆仑山地区不同海拔土壤的碳氮比变化并不明显,说明该地区的不同植被可以提供相似的有机质输入。土壤碳磷比和氮磷比随海拔梯度的升高呈现出显著增加趋势,这与庞金凤等^[3]对昆仑山中段北坡的土壤计量特征的研究结果一致。磷作为沉积元素,在土壤中的分布相对稳定^[20],并且在本研究中也发现磷随海拔梯度的变化较小,但是由于地表植被丰富,植被盖度较高,大量的根系以及植物凋落物的积累和分解,为高海拔区域土壤提供了更为丰富的碳源和氮源,从而使得本研究中碳氮含量随海拔梯度的升高而升高。因此,昆仑山地区的土壤碳磷比和氮磷比随着海拔高度的增加而有所上升。

3.2 土壤养分和生态化学计量特征的影响因素分析

土壤有机碳、全氮含量与 MAT、TSI 存在显著负相关关系、与 PDQ 呈显著正相关关系。这与赵云飞^[6]等和张鹏^[27]等对青藏高原东部山地以及祁连山北麓山体土壤的研究结果相同。但是温度因子 MAT、TS 对 0—30 cm 土层的土壤有机碳和全氮含量均有显著影响,降水因子 PDQ 仅对 30—50 cm 土层有显著影响,说明土壤有机碳和全氮含量对温度的响应比水分更为强烈。这是因为气温较低时,土壤微生物活动受到抑制,并阻碍土壤矿化的效率,促进了土壤养分的积累^[28],并且昆仑山地区气候干旱,降水量低,所以底层土壤湿度比表层大,促进植物根系吸收水分,进而影响养分含量。群落盖度与土壤有机碳、全氮含量呈显著正相关关系,这是因为植被覆盖面积大时可以为土壤表层提供大量的枯枝落叶和动物残体^[29],可有效加快植被凋落物分解

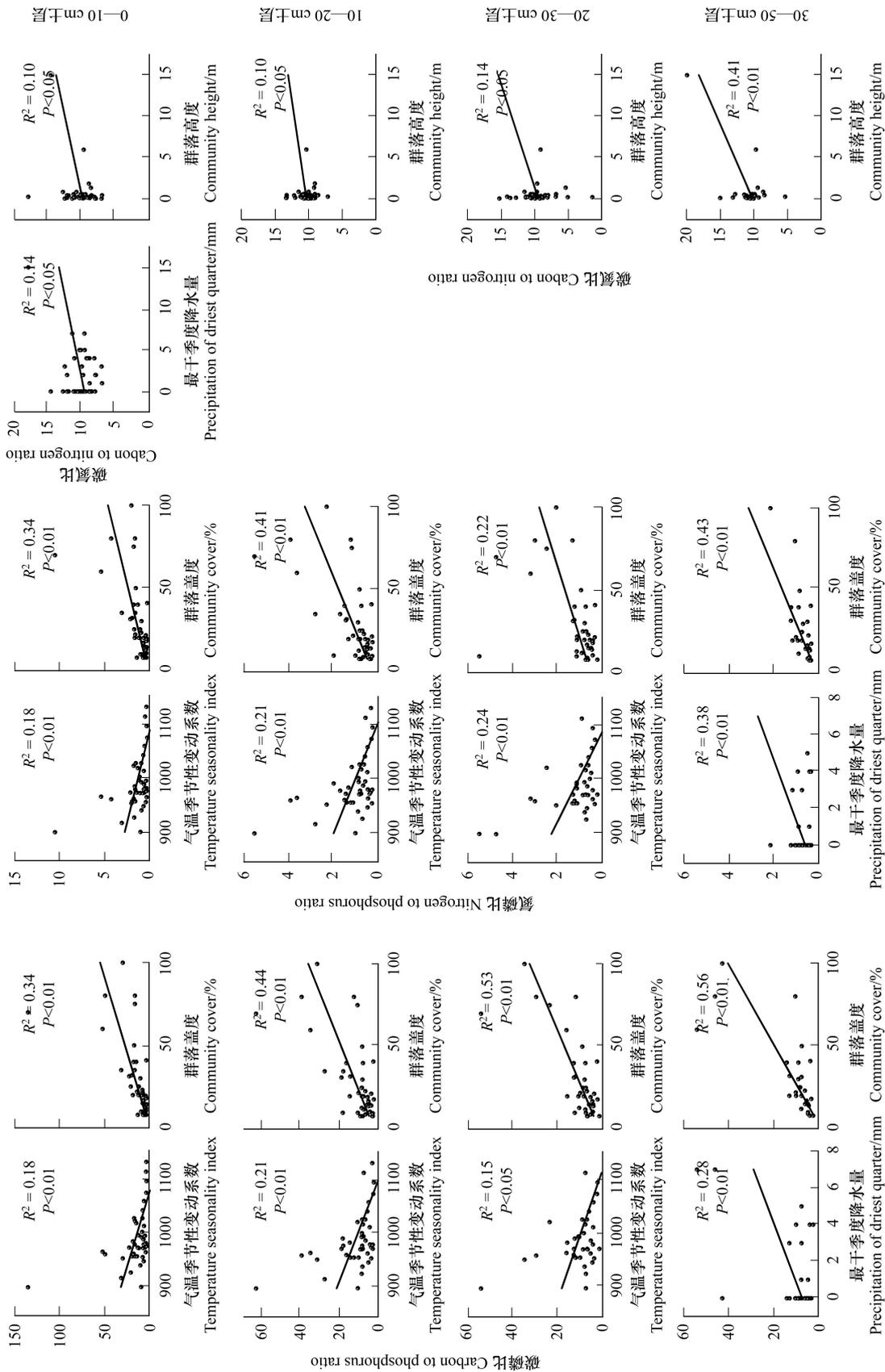


图5 最佳组合影响因子对土壤生态化学计量特征的影响
 Figure.5 Effects of the best combination impact factors on soil ecological stoichiometry
 黑色实线表示具有显著线性关系; $P < 0.05$ 呈显著相关性, $P < 0.01$ 呈极显著相关性

速率^[30], 促进养分的归还。MAT、MET、土壤全盐量与土壤全磷含量之间均存在显著负相关关系, 这与姜沛沛等^[30]对陕西省的土壤氮、磷的研究结果相似。卢平等^[31]在我国陆生生态化学计量学应用的研究中指出温度是制约氮、磷含量及氮磷比变异的重要因素。杨壹^[32]等对贺兰山的研究表明坡度对土壤养分的影响并不明显, 而本研究中坡度仅对 30—50 cm 土层全磷含量具有显著正向影响, 可能原因在于坡度影响水文过程、养分迁移和沉积、植被类型及其根系结构^[32]。陡坡促使雨水有效下渗, 在带走表层养分的同时将磷带入更深层土壤。同时, 较大的坡度促使植被根系需要更深入土壤以吸收磷, 从而导致全磷积累增加。土壤全盐量与全磷含量成显著负相关关系, 有研究表明土壤盐渍化会抑制一部分土壤微生物的生长繁殖, 减少微生物量和土壤酶的分泌从而影响土壤养分的转化^[33], 本研究结果进一步证实了这些结论。

群落高度与 0—50 cm 土层土壤的碳氮比均呈显著正相关关系, 主要是因为群落高度与根系的分布深度和生物量的大小显著相关, 更高的植物通常拥有更深的根系, 产生更多的根系分泌物, 促进土壤中有有机碳的累积^[23]。此外, 高生物量的植物会产生更多的枯落物, 增加土壤有机质的含量, 从而显著提高了土壤的碳氮比。0—30 cm 土层土壤的碳磷比、氮磷比均受 TSI 影响, 而 PDQ 仅影响 30—50 cm 底层土壤的碳磷比和氮磷比, 这可能与昆仑山的气候有关, 昆仑山气候干旱, 降雨量低, 所以降水对该地区的植被生长以及碳氮积累的影响相对有限, 另一方面高温能够增强土壤微生物活性, 提升养分转化能力, 所以土壤碳磷比和氮磷比对温度的响应要比对降水的响应更为强烈。群落盖度对 0—50 cm 层土壤的碳磷比、氮磷比均有显著正向影响, 这是由于群落盖度会显著影响土壤有机碳和氮含量的积累, 而磷属于沉积元素, 分布相对稳定^[20], 因此表现出显著的正相关关系^[34]。

4 结论

昆仑山地区土壤有机碳、全氮、全磷含量均随海拔梯度的上升呈显著增加趋势, 但全磷含量随海拔的变化较小, 上升趋势缓慢; 土壤碳氮比不随海拔梯度的变化而变化, 土壤碳磷比和氮磷比随海拔梯度的上升呈显著增加趋势。土壤有机碳、全氮含量主要受最热月份最高温度、气温季节性变动系数和群落盖度的影响, 而土壤全磷含量主要受土壤全盐量、坡度和最热月份最高温度的影响; 土壤碳氮比主要受群落高度的影响, 土壤碳磷比、氮磷比主要受气温季节性变动系数和群落盖度影响。昆仑山属于全球变化的敏感区域, 土壤中有有机碳的微小变化都会引起大气中 CO₂ 浓度的巨大变化, 因此, 在全球气候变暖的条件下, 半干旱地区的生态系统保护更需要加以重视。

参考文献 (References):

- [1] 肖焱, 商丽娜, 黄志刚, 张文广, 薛振山, 张仲胜, 吕宪国. 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, 2014, 34(8): 994-1001.
- [2] 李新星, 刘桂民, 吴小丽, 纪庚好, 李莉莎, 毛楠, 徐海燕, 吴晓东. 马衔山不同海拔土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征. 生态学杂志, 2020, 39(3): 758-765.
- [3] 庞金凤, 张波, 王波, 李梅梅, 曾凡江. 昆仑山中段北坡不同海拔梯度下土壤生态化学计量学特征. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 178-185.
- [4] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 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. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [5] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 张珍明, 何腾兵, 林昌虎. 不同海拔高度下梵净山土壤碳氮磷分布特征. 水土保持研究, 2016, 23(3): 19-24.
- [6] 赵云飞, 洪苗苗, 欧延升, 黄政, 张洋洋, 汪霞. 青藏高原东部山地草地土壤碳氮磷元素计量特征. 生态科学, 2018, 37(5): 25-32.
- [7] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. 环境科学学报, 2019, 39(3): 939-951.
- [8] 赵光影, 刘景双, 张雪萍, 齐少群, 王洋. CO₂ 浓度升高对三江平原湿地土壤碳氮含量的影响. 水土保持通报, 2011, 31(2): 6-9.
- [9] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和文祥, 耿增超. 长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, 2017, 54(1): 160-170.
- [10] Wang J L, Ou Y H, Wang Z H, Chang T J, Li P, Shen Z X, Zhong Z M. Distribution of soil active organic carbon of alpine grassland on Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7): 771-781.
- [11] 扈凡斌. 新疆南部山地典型垂直带植被及分布格局[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [12] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 江源, 穆桂金, 杨发相. 中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响. 草业学报, 2010, 19(3):

38-46.

- [13] 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华. 黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应. 环境科学, 2014, 35(6): 2358-2364.
- [14] 李茂楠, 刘宪斌, 杨亚丽, 张宝, 段恩省, 杨应忠. 云南亚热带常绿阔叶林土壤微生物量对大气氮沉降的响应. 安徽农业科学, 2024, 52(1): 39-44, 50.
- [15] 贾培龙, 安韶山, 李程程, 曾全超, 王宝荣, 白雪娟. 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征. 水土保持学报, 2020, 34(1): 315-321.
- [16] 张佳慧, 王兴昌, 王传宽. 帽儿山温带森林演替初期土壤碳氮磷计量特征的变化. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3189-3195.
- [17] 秦海龙, 付旋旋, 卢瑛, 韦翔华, 李博, 贾重建, 姜坤. 广西猫儿山不同海拔土壤碳氮磷生态化学计量特征. 应用生态学报, 2019, 30(3): 711-717.
- [18] 苟照君. 黄河上游高寒草地土壤碳、氮、磷、pH 值分布特征及影响因素[D]. 西宁: 青海师范大学, 2019.
- [19] 宋彦彦, 张言, 赵忠林, 管清成, 李英爱, 徐丽娜. 长白山西部不同林型土壤有机碳和全氮的分布特征. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 39-44.
- [20] 李丹, 范拴喜, 孙旻涵, 黄意成. 秦岭中段太白山以北不同海拔土壤碳·氮·磷生态化学计量特征. 安徽农业科学, 2023, 51(9): 49-52, 64.
- [21] 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. 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, 2022, 46(11): 1422-1431.
- [22] Wang L, Ouyang H, Zhou C P, Zhang F, Song M H, Tian Y Q. Soil organic matter dynamics along a vertical vegetation gradient in the Gongga mountain on the Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(4): 411-420.
- [23] 白其格那. 新疆南部山地不同海拔土壤养分及生态化学计量特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [24] 何高迅, 王越, 彭淑娟, 郭兆来, 刘嫦娥, 付登高, 段昌群. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征. 生态学报, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [25] 刘帅楠, 李广, 杨传杰, 杜佳圉, 徐万恒, 谢明君. 植被类型对黄土丘陵区土壤碳氮磷化学计量特征的季节变异. 水土保持学报, 2021, 35(6): 343-349, 360.
- [26] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 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, 2016, 36(3): 675-687.
- [27] 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.
- [28] Aponte C, Marañón T, García L V. Microbial C, N and P in soils of Mediterranean oak forests: influence of season, canopy cover and soil depth. *Biogeochemistry*, 2010, 101(1): 77-92.
- [29] 周沁. 闽楠杉木及其混交人工林土壤和凋落物养分季节动态变化特征[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- [30] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 赵一娉. 陕西省 3 种主要树种叶片、凋落物和土壤 N、P 化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(2): 443-454.
- [31] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 张文翔. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望. 土壤, 2016, 48(1): 29-35.
- [32] 杨壹, 邱开阳, 朱亚超, 谢应忠, 刘王锁, 黄业芸, 崔璐瑶, 王思瑶. 贺兰山中段不同海拔青海云杉林非根和根围土壤生态化学计量特征及影响因素. 生态学报, 2023, 43(19): 7974-7986.
- [33] Elgharably A, Marschner P. Microbial activity and biomass and N and P availability in a saline sandy loam amended with inorganic N and lupin residues. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(5): 310-315.
- [34] 张剑, 宿力, 王利平, 包雅兰, 陆静雯, 高雪莉, 陈涛, 曹建军. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响: 以敦煌阳关湿地为例. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.