

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*

庞金凤^{1 2 3}, 张波^{1 2}, 王波^{1 2 3}, 李梅梅^{1 2 3}, 曾凡江^{1 2 3}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
2. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 策勒 848300; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

提 要: 为探究昆仑山中段北坡不同海拔梯度下土壤养分含量垂直分布特征, 阐明土壤 C、N、P、K 生态化学计量特征对海拔变化的响应, 在昆仑山中段北坡沿策勒河流域, 采集 1706m 至 3576m 六个海拔梯度的土壤样品, 测定各海拔梯度范围内 0-5cm、5-10cm、10-30cm 土壤的有机碳、全氮、全磷、全钾含量, 分析不同海拔梯度土壤养分含量变化、化学计量比的垂直分布特征及其与环境因子的关系。结果表明: (1) 随海拔梯度的增加, 昆仑山中段北坡土壤有机碳和全氮含量逐渐增加, 且与海拔高度显著正相关 ($p < 0.05$)。在不同海拔梯度下, 随着土壤层次的加深, 有机碳和全氮含量有显著变化。土壤磷表现为净矿化, 具有较高的有效性。土壤钾无明显变化。(2) 土壤碳氮比均值 8.52、碳磷比均值 7.24、氮磷比 0.76, 均低于全球或中国土壤平均水平。高海拔梯度 (>3576m) 不同土壤深度间土壤碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比与低海拔地区 (1706-3247m) 差异性显著 ($p < 0.05$)。(3) 昆仑山中段北坡各环境因子对土壤 C、N、P、K 化学计量特征影响最大的为土壤含水量, 贡献率高达 84.4%, 其次为海拔高度及 pH。文中研究结果可为昆仑山中段北坡草地生态系统的保护和恢复等提供科学依据。

关键词: 昆仑山中段北坡; 海拔梯度; 土壤化学计量学; 土壤层次
中图分类号: S153 **文献标识码:** A

生态化学计量学综合了生物学、化学和物理学等基本原理, 研究生态系统能量平衡, 多重化学元素平衡和元素平衡对生态交互作用的影响, 是认识生物体和环境之间能量和物质流动新兴研究工具^[1-3]。目前, 生态化学计量学已广泛应用于营养动态和生物化学循环^[4]、养分利用效率^[5]、资源比例竞争理论^[6]、群落结构^[7]。土壤养分直接影响地上生产力水平、群落结构, 是生态系统结构和功能的关键性因素^[3]。土壤生态化学计量比是反映土壤内部 C、N、P 等元素循环的主要指标, 结合生态系统功能的变异性, 有助于确定生态过程对全球变化的响应^[2, 8]。近年来, 国内对土壤生态化学计量学进行了大量的研究, 然而, 这些研究一般针对的是不同植被类型土壤或不同纬度土壤的生态化学计量学特征^[2, 9-11], 围绕不同海拔高度下土壤养分分布和变化等研究还比较少, 海拔梯度变化作为一种自然地理变化, 对土壤养分、植被分布等均有较大影响^[12], 因此, 研究不同海拔梯度下土壤养分及其化学计量学特征变化非常有必要。

Müller 等^[13] 研究发现, 在喜马拉雅山脉的高山森林交错带, 土壤有效氮、有效磷、碳磷比和氮磷比随着海拔的升高而显著下降。在天山山脉, 谢锦等^[14] 研究发现, 不同海拔梯度下植物 C、N、P 含量及化学计量比变化特征各不相同, 且在垂直地带性上, 植物生长主要受土壤生态化学计量比影响。昆仑山北坡濒临亚洲大陆中心, 北临青藏高原, 南接塔里木盆地, 是这两大自然地域之间的天然分界线^[15-17]。昆仑山平均海拔 5500-6000m, 海拔相对高差大, 气候和植被类型垂直特征非常明显。在昆仑山海拔 1960-4100m, 桂东伟等^[15] 利用数量生态学方法揭示了海拔是环境因子中对植被群落分布起决定作用的因子; 在昆仑山北坡前山带, 朱军涛等^[18] 研究了不同海拔高度塔里木沙拐枣的光合生理生态特性, 结果表明塔里木沙拐枣对山地荒漠草地自然环境变化的温度和光照有很好的生态适应性; 李磊等^[19] 发现了昆仑山北坡两种生境下 6 种牧草叶绿素含量及荧光参数变化幅度不同, 海拔较高的前山牧场比较适宜牧草生长。但这些研

* 收稿日期: 2019-2-1; 修回日期: 2019-6-17。

基金项目: 新疆联合基金重点支持项目(U1603233); 中国科学院"西部青年学者"B类(2018-XBQNXZ-B-018)资助。
作者简介: 庞金凤(1994-), 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事微生物生态研究。E-mail: mengyangyx@126.com
通讯作者: 曾凡江(1966-), 男, 河南南阳人, 研究员, 主要从事植物生态研究。E-mail: zengfj@ms.xjb.ac.cn

究仅针对该地区植被光合、群落等特征,土壤作为植物生长环境的载体,目前还缺乏更加深入的研究。因此揭示昆仑山北坡不同海拔梯度土壤 C、N、P 等各组份及化学计量特征及相互关系,有助于为深入认识土壤 C、N、P 生态化学循环特征。

文中通过采集昆仑山中段北坡 1706–3576m 范围内不同海拔高度的土壤样品,测定不同深度土壤 C、N、P 等养分的生态化学计量学特征,探讨不同海拔高度下的土壤养分垂直分布特征,分析土壤养分含量在海拔梯度上的变化特征,为昆仑山中段北坡草地生态系统资源的合理利用和生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昆仑山中段北坡地处蒙古–西伯利亚干燥反气旋控制范围内,属于暖温带塔里木荒漠和柴达木荒漠^[15,16,18],海拔高度为 1707–3576m,地理坐标为 36°12′13.16″–36°46′48.82″N,80°15′46.56″–80°47′59.49″E,全年平均气温 4.7℃,极端最高温度 30.4–34℃,极端最低温度–25℃,年降水量小于 100mm,主要集中在 7、8 月份^[16,20,21]。沿策勒河自北向南逐渐升高,山势平缓,1350–1500m 是策勒沙漠–绿洲过渡带,1500–1960m 是戈壁分布区域,过渡带及戈壁范围内降水量极少,绿洲平原区年平均降水量仅 35.1mm,1960m 以上开始有自然植被出现,依次是山地荒漠、山地荒漠草原、山地典型草原、高寒草原等植被类型^[15,17]。

1.2 土壤样品采集

2016 年 9 月沿策勒河流域,在昆仑山中段北坡 1706–3576m 之间的 6 个海拔梯度设置三个 10*10 m 样方。在每个样方内,随机选取 9 个点取样,每 3 个点土样混合后按“四分法”取土,算一个重复,取样时先去除地表枯枝落叶等杂物,利用土钻采集 0–5cm、5–10cm、10–30cm 三个土层的土壤,共计 54 个样品,装入自封袋带回实验室。

1.3 测定方法

土壤自然风干前后称重计算含水量,过 100 目筛,实验待用。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法–外加热法;全磷采用浓硫酸高氯酸消化–AA3 流动分析仪测试;全氮采用浓硫酸高氯酸消化–凯氏定氮仪测试;pH 采用 PH–3C(雷磁牌)测定。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理和统计分析,Origin 8.5 和 Canoco 5.0 作图,利用方差分析的 Tukey 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤养分含量垂直分布特征及其相关性

对每个海拔梯度的 0–30cm 土壤养分含量平均值进行比较分析(表 1),可知随着海拔高度上升,有机碳和全氮含量逐渐增加,全磷、全钾含量和土壤含水量无明显变化趋势,但全磷和全钾随海拔变化而出现不同的变化,含水量则与全磷、全钾含量变化相反。其中,有机碳含量的变化范围为 0.81–14.94g·kg⁻¹,全氮含量的变化范围为 0.12–1.43g·kg⁻¹,全磷含量变化范围为 0.35–0.67g·kg⁻¹,全钾含量变化范围为 22.35–29.72g·kg⁻¹。

表 1 昆仑山北坡不同海拔高度土壤养分含量

Table 1 Soil nutrient concentration at different altitudes on the northern slope of the middle section of Kunlun mountains

测量指标	有机碳 (g·kg ⁻¹)	全氮 (g·kg ⁻¹)	全磷 (g·kg ⁻¹)	全钾 (g·kg ⁻¹)	pH	含水量 (%)
1707m	0.81±0.21c	0.12±0.04d	0.35±0.09b	22.35±6.81a	5.82±0.08e	8.63±4.14ede
1942m	0.85±0.05c	0.14±0.01d	0.64±0.01a	27.39±0.21a	6.22±0.14d	4.59±1.14e
2438m	1.79±0.32c	0.22±0.03c	0.37±0.04b	25.14±4.29a	6.32±0.10d	12.85±2.07bd
2900m	2.85±0.10bc	0.29±0.02c	0.67±0.03a	29.22±0.55a	7.38±0.14c	10.89±2.27bc
3247m	4.94±0.47b	0.51±0.03b	0.67±0.00a	29.72±0.19a	7.03±0.03b	15.25±0.27b
3576m	14.94±2.46a	1.43±0.03a	0.64±0.03a	22.72±5.11a	6.70±0.06a	27.88±1.34a
平均值	4.36	0.45	0.56	26.09	6.58	13.35

注: 同列不同字母表示变化显著(p<0.05),下同;n=3

随着海拔梯度的变化,不同深度土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量的垂直分布差异明显。海拔升高过程中,不同深度土壤有机碳、全氮含量明显增加,在海拔 1707-1942m 间,总体变化幅度较小,在 3576m 处急剧升高,变化显著;土壤全磷含量在 1707m 和 2438m 处含量较低,与其它海拔高度全磷含量相比变化显著;不同海拔高度土壤全钾含量趋于稳定,0-5cm 土壤全钾含量在 1707-3247m 间逐渐增加,在 3576m 时下降,变化不显著,而 5-10cm、10-30cm 全钾含量在 1707m、2438m、3576m 海拔高度下略低,总体变化不显著。

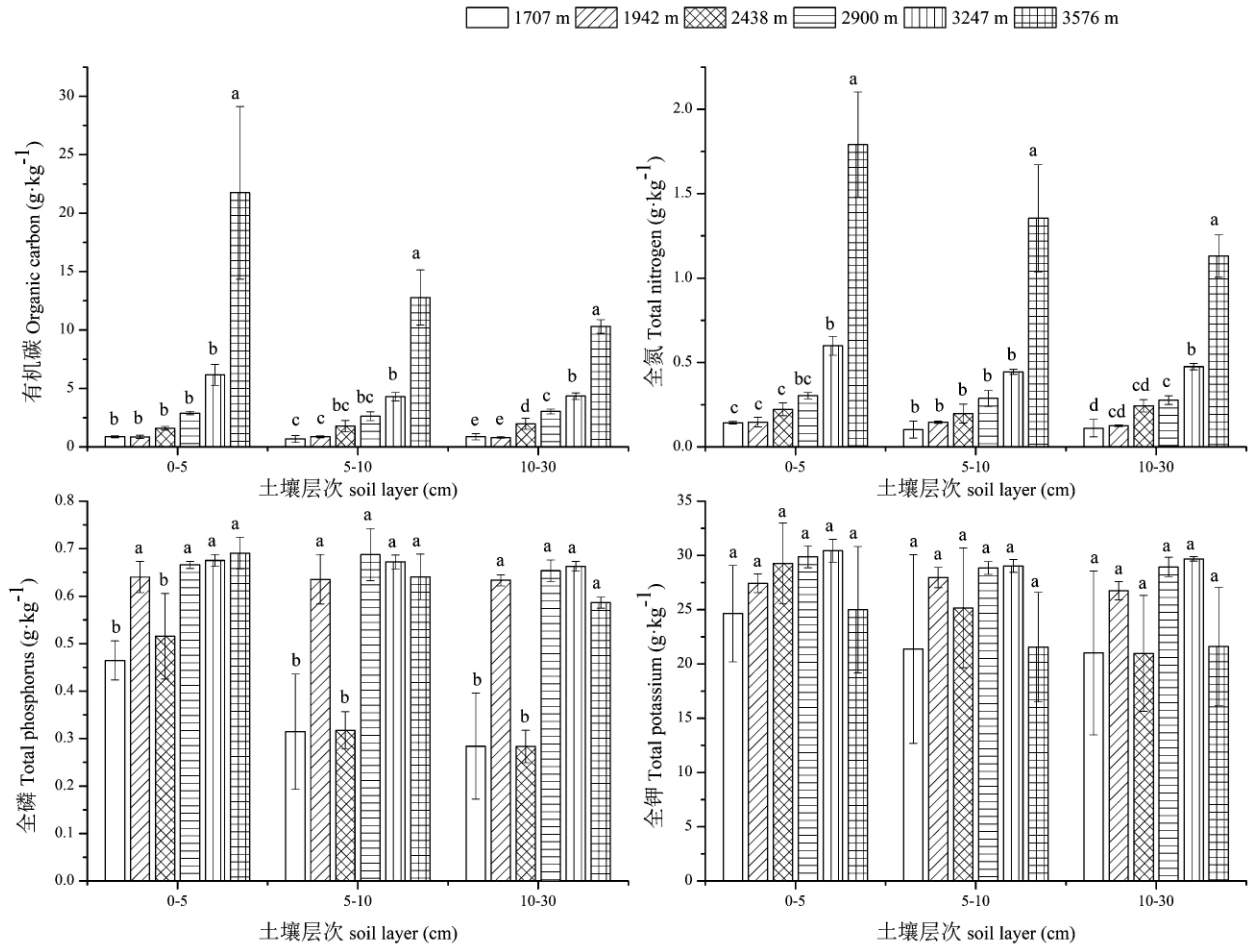


图 1 不同海拔土壤养分的垂直分布特征

Figure 1 Vertical distribution characteristics of soil nutrients at different elevations

注:不同大写字母表示相同海拔梯度不同土壤深度间在 0.05 水平上具有显著变化,不同小写字母表示相同土壤深度不同海拔梯度间在 0.05 水平上具有显著变化(p < 0.05); n = 3

对不同海拔高度土壤有机碳、全氮、全磷和全钾元素含量进行相关分析(图 2),由图(2)可知,0-30cm 土壤有机碳和全氮两者之间相关性极高,决定系数分别为 0.999、0.998、0.991,即,土壤有机碳和全氮含量在空间上随海拔高度变化同步,而与全磷、全钾相关性较差,决定系数较低。

2.2 不同海拔 C、N、P、K 生态化学计量学特征

对每个海拔梯度的 3 个样本点 0-30cm 碳、氮、磷、钾生态化学计量特征进行比较分析(表 2),可知,在海拔高度由低升高过程中,C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 和 P:K 呈现为不同的变化特征。

土壤 C:N、C:P、C:K 变化范围分别为 6.07-10.50、1.33-23.31、0.03-0.67,随着海拔升高,这三个比值总体呈增加趋势,在 1942m 最低,在 3576m 最高。其中,土壤碳氮比以 2438m 为分界点,高海拔与低海拔地区有显著变化。土壤 C:P 和 C:K 在 3576m 与其它海拔高度比值有显著差异。

土壤 N:P、N:K 变化范围分别为 0.22-2.23、0.01-0.06, N:P 在 1942m 最低,为 0.22;在 3576m 最高,为 2.23; N:K 在 1707-2900m 间无明显变化,且土壤 N:P 和 N:K 在 3576m 与其它海拔高度比值有显

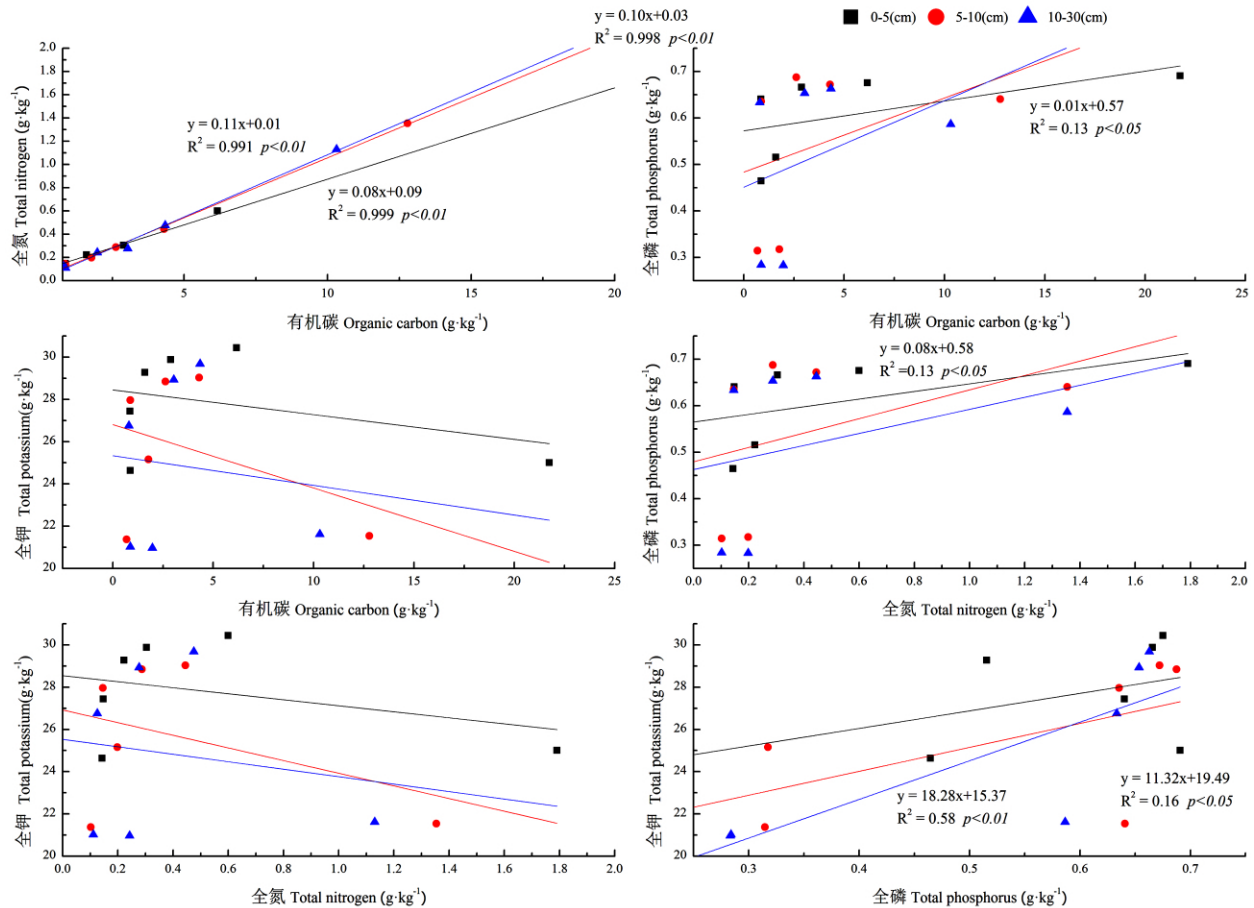


图 2 不同海拔高度 0 – 30cm 土壤有机碳、全氮、全磷和全钾元素相关性

Figure 2 Correlations of 0 – 30cm soil among organic carbon , total nitrogen , total phosphorus , and total potassium concentrations at different elevations

著差异。

土壤 P: K 变化范围为 0.02 – 0.03 , 比值较小 , 在 1707 – 3247m 间无明显变化 , 1707m、2438m 与 1942m、2900m、3247m、3576m N: K 有显著变化。

表 2 不同海拔土壤有机碳含量、全氮、全磷和全钾生态化学计量特征

Table 2 Soil organic carbon , total nitrogen , total phosphorus , and total potassium concentrations and their eco – stoichiometric characteristics at different elevations (n = 3)

指标	C: N	C: P	C: K	N: P	N: K	P: K
1707m	6.9 ± 1.24bc	2.28 ± 0.05c	0.04 ± 0.00c	0.34 ± 0.06d	0.01 ± 0.00b	0.02 ± 0.00b
1942m	6.0 ± 0.63bc	1.33 ± 0.10c	0.03 ± 0.00c	0.22 ± 0.01d	0.01 ± 0.00b	0.02 ± 2.91a
2438m	8.0 ± 0.36ab	4.8 ± 1.28bc	0.0 ± 0.00bc	0.6 ± 0.15bc	0.01 ± 0.00b	0.02 ± 0.00b
2900m	9.87 ± 0.55a	4.2 ± 0.12bc	0.1 ± 0.00bc	0.4 ± 0.01cd	0.01 ± 0.00b	0.02 ± 0.00a
3247m	9.73 ± 0.54a	7.37 ± 0.73b	0.17 ± 0.02b	0.76 ± 0.04b	0.02 ± 0.00b	0.02 ± 0.00a
3576m	10.5 ± 1.81a	23.3 ± 3.13a	0.67 ± 0.09a	2.23 ± 0.14a	0.06 ± 0.01a	0.03 ± 0.00a
平均值	8.52	7.24	0.18	0.76	0.02	0.02

随着海拔梯度的变化 , 不同深度土壤 C: N、C: P、C: K、N: P、N: K 和 P: K 的垂直分布明显不同。海拔升高过程中 0 – 5cm C: P、5 – 10cm C: K 和 N: K 呈现升高的趋势 0 – 5cm C: K、N: P、N: K 和 10 – 30cm C: K 先降低在升高 , 其余深度的土壤化学计量比无明显特征。除了 0 – 5cm P: K 外 , 3576m 处 0 – 30cm C: N、C: P、C: K、N: P、N: K 和 P: K 均显著高于其余海拔高度对应的化学计量比。

2.3 环境因子对土壤 C、N、P、K 生态化学计量比的影响

对环境因子与土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量及生态化学计量比等进行冗余分析(RDA) (图 4) , 由图 4 可知 , 土壤 C、N、P、K 化学计量特征分别第 I、II 排序轴解释系统的变异信息量分别为 63.5% 和

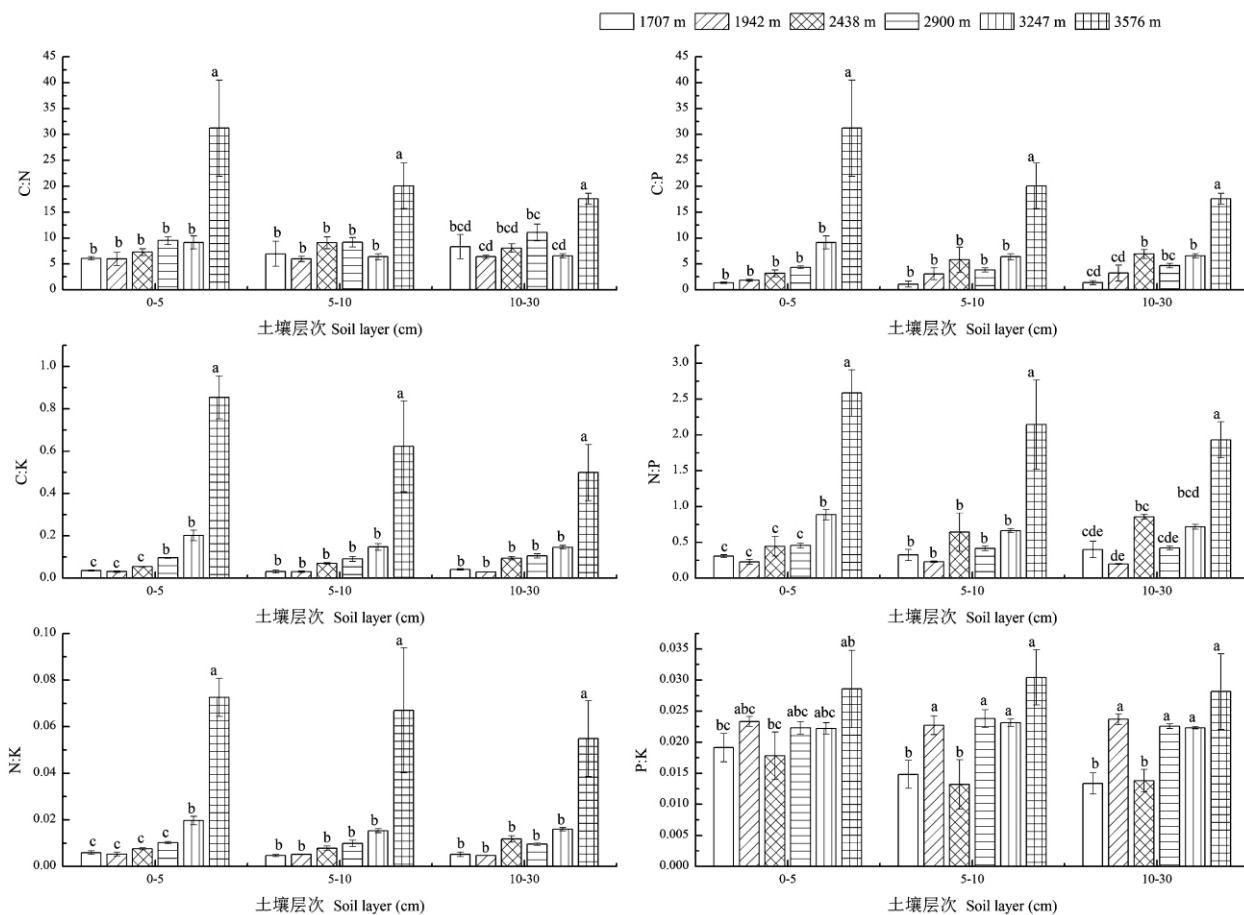


图3 不同海拔土壤化学计量比特征 (n = 3)

Figure 3 Characteristics of soil stoichiometric ratios at different elevations (n = 3)

71.95%。土壤含水量、海拔高度、pH 和土壤深度等环境因子影响了土壤 C、N、P、K 含量及化学计量特征。土壤含水量与土壤 C、N、P 含量及 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 比呈正相关,与 K 含量呈负相关。海拔高度、pH 与土壤 C、N、P、K 含量及 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 比呈正相关。土壤深度与土壤 C、N、P 含量及 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 比呈负相关。

各环境因子的贡献率见表 3,可知对土壤 C、N、P、K 化学计量特征影响的大小为:

表3 环境因子对土壤 C、N、P、K 化学计量特征贡献率及显著性检验 (n = 54)

Table 3 Contribution rate and significance test of environmental factors on soil C, N, P and K stoichiometric characteristics (n = 54)

环境因子	贡献率 (%)	F	P
土壤含水量	84.4	81.2	0.002
海拔高度	10.6	12.4	0.002
pH	3.2	3.9	0.016
土壤深度	1.8	2.4	0.106

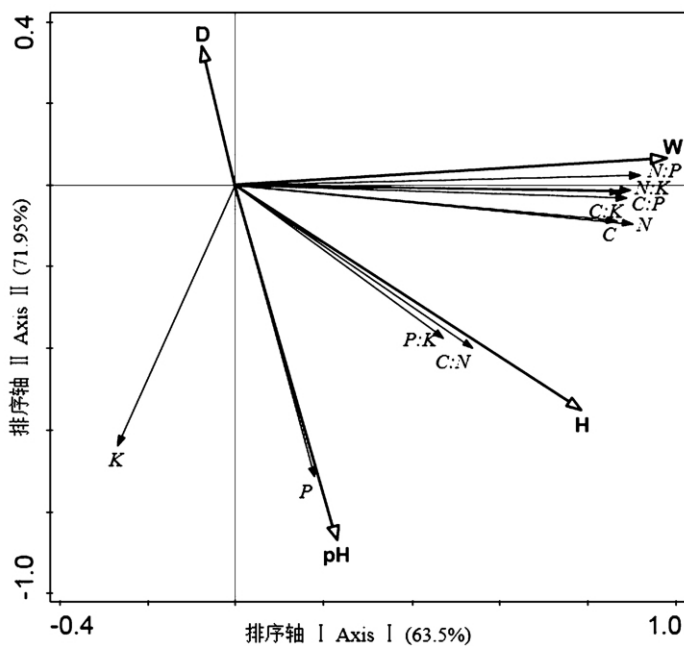


图4 环境因子和土壤 C、N、P、K 化学计量特征的冗余度分析 (n = 54)

Figure 4 Redundancy analysis of environmental factors and soil C, N, P, and K stoichiometric characteristics (n = 54)

注: W 为土壤含水量; H 为海拔高度; D 为土壤深度

土壤含水量 > 海拔高度 > pH > 土壤深度, 其贡献率分别为 84.4%、10.6%、3.2%、1.8%。土壤含水量和海拔高度极显著影响土壤 C、N、P、K 化学计量特征 ($p < 0.01$) , pH 显著影响土壤 C、N、P、K 化学计量特征 ($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾对海拔、土壤深度的响应

土壤养分含量变化是海拔梯度主导的环境因子和生物因素共同作用的结果^[3, 22]。前人研究表明,天山北坡中段土壤有机 C、全 N、全 P 平均含量为 7.35%、0.14%、0.09%, 高于全国土壤有机 C、全 N、全 P 平均含量为 1.12%、0.11%、0.07%。这表明天山地区的水热条件有利于营养物质的积累, 土壤较为肥沃^[14]。土壤有机碳主要取决于凋落物的矿化分解与转化累积。本研究中, 土壤有机碳含量平均值为 $4.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不到全国平均水平的 50%^[23], 说明 C 源限制是当地植被生长和恢复的主要因素之一。土壤氮含量来源于氮素矿化与固定、硝化与反硝化等过程, 与有机质的空间分布具一致性^[1, 14]。本研究中土壤全氮含量平均值为 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远低于太白山土壤全氮含量 $3.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25], 表现出氮素缺乏。土壤全磷含量均值为 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约等于中国土壤全磷含量平均值 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24]。本研究区土壤有机碳、全氮、全磷含量较为缺乏。

同时, 随着海拔的升高, 气温降低, 土壤有机碳释放速率降低, 碳氮矿化速率减慢, 同时环境微生物活性降低, 分解动植物残体速度减慢, 致使土壤有机碳和全氮含量积累量显著增加^[26]。磷钾主要来自岩石风化且迁移率低, 属于沉积性元素^[11, 27], 降水和温度等因素影响土壤的风化速率和养分元素的淋溶强度^[28], 而昆仑山北坡不同海拔梯度代表着不同的气候类型, 本研究中全磷和全钾无明显变化趋势可能与不同海拔降水量差异有关。在高海拔地区 ($> 3576 \text{ m}$) 随着土壤层次的加深, 有机碳和全氮含量显著减少, 而全磷、全钾含量无明显变化, 这与魏孝荣^[29]和朱秋莲^[22]研究结果一致。

3.2 土壤化学计量特征对海拔、土壤层次的响应

土壤碳氮磷钾比是土壤有机质和质量程度的重要指标, 主要受区域水热条件和成土作用特征的控制^[1], 研究表明, 全球土壤 C:N 比范围为 9.9 - 29.8, 根据土壤碳氮储量计算, 全球土壤 C:N 比平均值为 13.33, 中国土壤 C:N 比平均值在 10 - 12 之间^[30, 31], 而在本研究中, 昆仑山北坡地区 C:N 比平均值为 8.52, 低于全球土壤 C:N 均值, 表明该地区土壤有机质比氮素更缺乏。在相对低海拔地区 ($< 3576 \text{ m}$) 不同海拔梯度间土壤碳氮比差异性均不显著, 而与高海拔地区差异显著。由于土壤 C:N 与有机质分解速度呈反比关系, 可能是因为高海拔地区为高寒草甸, 与其它样地气候、地形均存在明显不同, 气温低, 土壤微生物活力减弱, 氮沉降且湿度大等因素使得土壤碳氮循环不同^[32], 碳氮比相对较高, 因此差异显著。0 - 10cm 不同土壤深度间土壤碳氮比差异性均不显著, 这与李丹维等人研究一致^[25], 而 10 - 30cm 各海拔高度间碳氮比差异明显, 验证了土壤深度与土壤碳氮比存在一定的关系^[3, 24, 25]。

土壤碳磷比通常作为衡量微生物矿化土壤有机物释放磷以及从环境中吸收磷潜力的指标, 对于植物生长发育有重要影响^[1, 24]。本研究中, 土壤平均碳磷比为 7.24, 远低于中国陆地碳磷比均值 (52.7)、全球陆地平均水平 (72.0) 及全球草地平均值 (64.3), 研究表明, 土壤中较低的碳磷比对于微生物在有机质分解过程中养分释放有促进作用^[24], 即在本研究区土壤磷表现为净矿化, 具有较高的有效性。

土壤氮磷比通常可作为氮素饱和的养分限制阈值标准^[24], 本研究区土壤氮磷比平均值仅 0.76, 远低于全球陆地平均水平 (5.9) 以及中国平均水平 (3.9)^[24], 研究认为, 土壤在温度较低的气候条件下, 土壤微生物生长速度受到限制, 但其在矿化土壤有机质中释放磷素的潜力却较大^[33], 且一般认为氮素是温带地区土壤的主要限制因子^[24], 因此昆仑山北坡土壤氮素呈现明显的缺乏现象。

3.3 土壤 C、N、P、K 生态化学计量比的影响因素

昆仑山北坡不同海拔梯度垂直带综合了不同环境因子的影响, 研究结果显示土壤含水量和海拔高度极显著影响土壤生态化学计量特征, 其中土壤含水量贡献率高达 84.4%。土壤水分是土壤系统中众多元素运移及循环的重要载体, 它直接影响土壤的生理生化特性和地上植物的生长发育^[34]。李红林等^[34]研究发现土壤含水量是影响塔里木盆地北源绿洲土壤 C、N、P 化学计量特征最主要的驱动因子, 并且得到了土壤含水量与土壤 C、N 元素含量和 N:P、C:P 呈现极显著正相关关系的结论。李丹维等^[25]对影响太白山不同海拔土壤 C、N、P 化学计量特征的环境因子研究结果表明, 土壤含水量与土壤有机碳、全氮、全磷含量

及 C:N、C:P、N:P 比呈显著正相关关系。以上研究均指出土壤含水量对土壤 C、N、P 化学计量特征起着重要的作用,此结论在本研究中也得到了进一步证实。

文中仅对不同海拔梯度的土壤养分变化及化学计量特征进行了初步研究,对于全面评估昆仑山北坡生态系统土壤养分状况,还需要结合植被、氮沉降、以及凋落物养分循环等开展深入探索,将不同植被群落和更多环境因子的生物地球化学循环联系在一起,揭示植被-凋落物-土壤间的生态化学计量特征及其相互关系和空间变异。

4 结论

昆仑山北坡土壤有机碳、全氮、全磷含量整体较低,但土壤磷表现为净矿化,具有较高的有效性。同时,随海拔梯度的增加,土壤有机碳和全氮含量逐渐增加,且相关性极高($R^2 > 0.99$),全磷和全钾含量无明显变化趋势。在不同海拔梯度下,随着土壤层次的加深,有机碳和全氮含量有显著变化,而全磷、全钾含量降低较少。不同海拔梯度和不同土壤深度间高海拔地区($> 3576\text{m}$)土壤碳氮比、碳磷比、碳钾比、氮磷比和氮钾比与低海拔地区差异性显著。各环境因子对土壤 C、N、P、K 化学计量特征影响的大小为:土壤含水量 $>$ 海拔高度 $>$ pH,土壤含水量和海拔高度极显著影响土壤 C、N、P、K 化学计量特征($p < 0.01$),pH 显著影响土壤 C、N、P、K 化学计量特征($p < 0.05$)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张向茹,马露莎,陈亚南,等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报,2013,50(4):818-825.
- [3] 张广帅,邓浩俊,杜锟,等. 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[J]. 生态学报,2016,36(3):675-687.
- [4] 杜威,王紫泉,和文祥,等. 豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响[J]. 土壤学报,2017,54(4):999-1008.
- [5] Li L, Gao X, Li X, et al. Nitrogen (N) and phosphorus (P) resorption of two dominant alpine perennial grass species in response to contrasting N and P availability[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 127: 37-44.
- [6] Yang Y Hua, Zhang X, Wang S M, et al. Salt accumulation in vegetative organs and ecological stoichiometry characteristics in typical halophytes in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(12):1267-75.
- [7] 方瑛,安韶山,马任甜. 云雾山不同恢复方式下草地植物与土壤的化学计量学特征[J]. 应用生态学报,2017,28(1):80-88.
- [8] Wang M, Moore T R. Carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry in an ombrotrophic peatland reflects plant functional type[J]. Ecosystems, 2014; 17(4):673-84.
- [9] 王维奇,王纯,曾从盛,等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2012,32(13):4087-4093.
- [10] 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.
- [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] Zhang M, Zhang X K, Liang W J, et al. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai mountain, China[J]. Pedosphere, 2011, 21(5):615-20.
- [13] Müller 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(1):21-32.
- [14] 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.
- [15] 桂东伟,雷加强,曾凡江,等. 中昆仑山北坡策勒河流域生态因素对植物群落的影响[J]. 草业学报,2010,19(3):38-46.
- [16] 朱军涛,李向义,张希明,等. 昆仑山北坡驼绒藜叶片功能性状及其海拔差异性[J]. 中国沙漠,2010,30(6):1325-1330.
- [17] Gui D, Lei J, Mu G, et al. Effects of different management intensities on soil quality of farmland during oasis development in southern Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2009, 16(4):295-301.
- [18] 朱军涛,李向义,张希明,等. 昆仑山北坡前山带塔里木沙拐枣对不同海拔生境的生理生态响应[J]. 生态学报,2010,30(3):602-609.
- [19] Li L, Li X Y, Lin L S, et al. Comparison of chlorophyll content and fluorescence parameters of six pasture species in two habitats in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(6):672-80.
- [20] 朱军涛,李向义,张希明,等. 昆仑山北坡4种优势灌木的气体交换特征[J]. 生态学报,2011,31(12):3522-3530.
- [21] 朱军涛,李向义,张希明,等. 昆仑山北坡不同海拔塔里木沙拐枣的光合生理生态特性[J]. 生态学报,2011,31(3):611-619.
- [22] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [23] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报,2000,55(5):533-544.
- [24] 陶冶,吴甘霖,刘耀斌,等. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J]. 中国沙漠,2017,37(2):305-314.

- [25] 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.
- [26] 胡宗达,刘世荣,史作民,等. 川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 261–268.
- [27] 刘爱琴,严加亮,侯晓龙,等. 武夷山自然保护区不同海拔土壤磷素的分布规律[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 310–316.
- [28] 韩琳,李征,曾艳,等. 太湖流域河岸带不同土地利用下草本植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3281–3288.
- [29] 魏孝荣,邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603–612.
- [30] 李梦天,秦燕燕,曹建军,等. 青藏高原草地管理方式对土壤化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2262–2268.
- [31] 高丽倩,赵允格,许明祥,等. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 678–688.
- [32] 王建林,钟志明,王忠红,等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6678–6691.
- [33] 王建林,钟志明,王忠红,等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤氮磷比的分布特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3399–3406.
- [34] 李红林,贡璐,朱美玲,等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345–1355.

Characteristics of soil ecological stoichiometry under different elevation on the north slope of Kunlun mountains

PANG Jinfeng^{1 2 3}, ZHANG Bo^{1 2}, WANG Bo^{1 2 3}, LI Meimei^{1 2 3}, ZENG Fanjiang^{1 2 3}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Cele National Station of Observation and Research for Desert – Grassland Ecosystems, Cele 848300, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the vertical distribution characteristics of soil nutrient concentration on the northern slope of the middle section of Kunlun mountains, and to clarify the response of soil C, N, P and K ecological stoichiometric characteristics to the change of elevation, six soil samples from 1706m to 3576m were collected along the northern slope of the middle section of Kunlun mountains along the Cele river basin. The soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium concentrations were measured in 0–5cm, 5–10cm, and 10–30cm soil layers. The change of soil nutrient concentration, the vertical distribution of stoichiometric ratio and its relationship with environmental factors were analyzed. The results showed that: (1) Soil organic carbon and total nitrogen concentrations gradually increased with the increase of elevation gradient, and the correlation was significant ($p < 0.01$). With the deepening of soil layer, the concentrations of soil organic carbon and total nitrogen changed significantly at different elevation gradients, while the total phosphorus and total potassium concentrations decreased slightly. (2) The ratios of soil C:N, C:P, and N:P were lower than the global or Chinese soil average level, and the soil C:N, C:P, and C:K ratios in high altitude area (>3576m) with different elevation gradients and different soil depth layers were significantly lower than that of the global or Chinese soil. The ratio of N:P and N:K in high altitude area (>3576m) were significantly different from those in the low altitude areas ($p < 0.05$). (3) The most important environmental factor in changes of soil C, N, P and K stoichiometric characteristics was soil water content, which explained 84.4% of the variations in soil C, N, P and K stoichiometric characteristics. The second and third important environmental factors were elevation and pH. This paper provides scientific basis for grassland ecosystem protection and restoration on the north slope of the middle section of Kunlun mountains.

Key words: north slope of the middle section of Kunlun mountains; elevation gradient; soil ecological stoichiometry; soil layer