

伊犁河谷山地土壤养分化学计量比及其影响因素*

杨涵¹, 孙慧兰¹, 田中平², 刘天戈¹, 吴芳¹, 金晓亮¹

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054

2. 新疆师范大学生命科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要: 探究干旱区山地生态系统中不同海拔梯度土壤化学计量比及影响因子, 对揭示土壤养分状况、维持山地生态系统可持续发展具有重要意义。本文以伊犁河谷南部山地沿海拔梯度建立13个样地, 以0~20 cm土壤为研究对象, 探究土壤养分化学计量比及其影响因素。结果表明: 1) 土壤酸性随着海拔的升高逐渐增强。土壤有机碳与全氮表现出中高山带含量显著高于低山带, 而全磷和全钾则表现为低山带含量较高, 中高山带含量较低。2) 由于海拔差异, 碳氮比表现为中高山带显著高于低山带和高山带; 碳磷比表现为中高山带显著高于中低山带; 碳钾比表现为中高山带显著高于低山带; 氮磷比表现为高山带显著较高, 但过渡带与低山带无显著差异; 氮钾比表现为高山带显著较高, 而中高山带与过渡带无显著差异; 不同海拔梯度间磷钾比差异性均不显著。3) 土壤理化指标中影响化学计量比的主导因子为土壤有机碳(62.4%)、全磷(15.9%)、全碳(13.7%); 环境因子对土壤化学计量比产生影响的主导因子为土壤年均温(27.1%)、植被指数(11.2%)、海拔(12.3%)、大气年均温(3.4%)。研究结果说明, 理化指标对土壤化学计量比具有重要影响, 并且进一步验证了海拔仍然是影响化学计量比的主导因子, 同时揭示了微环境因子对土壤化学计量比的影响不容忽视, 为深入研究伊犁河谷山地土壤养分状况提供科学依据。

关键词: 化学计量比; 影响因子; 土壤养分; 伊犁河谷山地

中图分类号: S812.2 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)03-0060-11

Soil nutrient stoichiometric ratios and their influencing factors in mountainous areas of the Ili River Valley

YANG Han¹, SUN Huilan¹, TIAN Zhongping², LIU Tianyi¹, WU Fang¹, JIN Xiaoliang¹

1. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2. College of Life Science, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

Abstract: Studying the soil stoichiometric ratios and the influencing factors of different altitude gradients in mountain ecosystems in arid zones is significant in revealing the soil nutrient status and maintaining the sustainable development of mountain ecosystems. In this paper, 13 sample plots were established along the elevation gradient in the mountains of the southern Ili River Valley, and soil in the depth of 0-20 cm was studied to investigate nutrient stoichiometric ratios and their influencing factors. The results showed that: (1) Soil acidity gradually increased with elevation. Organic carbon and total nitrogen contents are significantly higher in the middle and high mountain belts than in the low mountain belts, while total phosphorus and total potassium contents are opposite. (2) Due to altitudinal differences, the carbon-to-nitrogen ratio is significantly higher in the mid-alpine belt than in the low and

* 收稿日期: 2023-09-11

录用日期: 2023-11-22

网络首发日期: 2024-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(41761004); 新疆师范大学青年拔尖人才项目(XJNUQB2023-11)

作者简介: 杨涵(1998年生), 女; 研究方向: 自然资源开发与规划; E-mail: yanghan@stu.xjnu.edu.cn

通信作者: 孙慧兰(1982年生), 女; 研究方向: 自然资源开发与规划; E-mail: hlsunxjnu@sina.com

alpine belts; carbon and phosphorus ratios are significantly higher in the middle and high mountain belts than in the middle and low mountain belts; carbon and potassium ratios are significantly higher in the middle and high mountain belts than in the low mountain belts; nitrogen-phosphorus ratios are higher in the alpine zone, but there is no major difference between the transition zone and the low mountain zone; nitrogen-potassium ratios are much higher in the alpine zone, whereas there is no significant difference between the mid-alpine zone and the transition zone; the differences of phosphorus/potassium ratios between altitudinal gradients are ignorable. (3) The dominant factors affecting the stoichiometric ratios of soil physicochemical indicators are soil organic carbon (62.4%), total phosphorus (15.9%), and total carbon (13.7%); while the major environmental factors are mean annual soil temperature (27.1%), vegetation index (11.2%), elevation (12.3%), and mean annual atmospheric temperature (3.4%). The study showed that the physicochemical indicators have an important influence on the soil stoichiometric ratio, further verified that the altitude is still the dominant factor affecting the stoichiometric ratio, and revealed that the influence of microenvironmental factors on the soil stoichiometric ratio should not be neglected, which provides a scientific basis for the in-depth study of the nutrient status of soils in mountainous areas of the Ili River Valley.

Key words: stoichiometric ratio; impact factor; soil nutrients; Ili River valley mountains

山地因其具有独特的地理格局和生态环境,使山地土壤养分也呈现出具有一定规律分布特征(Rahbek et al., 2019)。碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)作为构成土壤养分的重要元素(Elser et al., 2000),以相对稳定的比例分布在土壤中,其含量的多寡及平衡关系,不仅对山地植被的生长发育(石轩等, 2021)、群落的组成及土地生产力有着重要影响,而且对维持山地生态系统的稳定性具有重要作用(张珂等, 2016)。C:N和C:P影响着植被的生长速度(Agren et al., 2004),并反映了植被对土壤N、P的利用效率,N:P则是限制生产力的营养元素指示剂(刘万德等, 2010),K是关乎植物体代谢的重要元素(赛牙热木·哈力甫等, 2018)。在特定的生长环境中,土壤作为动植物的生长基地,其养分含量及分布特征对山地生态系统的持续发展至关重要。因此,研究土壤养分化学计量比在地理环境梯度上的变化规律及其影响因素,对山地土壤生态系统保护与可持续发展具有指导意义。

山地生态系统对环境变化响应敏感,同时,土壤生态化学计量比与微环境共同促进着山地生态系统的发展,因而越来越受到学者们的关注(Whittaker et al., 1960)。由于受到气温、降水、海拔等因素的影响,土壤养分化学计量比在空间上具有明显的差异性(王绍强等, 2008)。吴昊等(2019)对秦岭松栎林研究发现,随海拔的增加,土壤C:N先升后降,N:P先降后升,而C:P则无明显变化;苏昊海等(2021)对祁连山狼毒研究发现,

狼毒生长受到P限制,海拔通过调节水热分配影响土壤化学计量比;李新星等(2020)对黄土高原马衔山土壤研究发现,C:N随海拔先增后降,而C:P和N:P随海拔增高均呈增加趋势;张莎莎等(2020)研究不同海拔梯度人工林发现,海拔升高C:N呈先升后降的趋势,C:P和N:P呈现先降低后升高的趋势。现有研究均体现出海拔对土壤化学计量比的变化具有重要影响,但对于地理格局和生态环境复杂的山地生态系统而言,在注重海拔对土壤化学计量比的研究时,不应忽视其余微环境因子对土壤化学计量比的影响,需综合考虑土壤化学计量比-微环境之间的耦合关系进行研究。

伊犁河谷是新疆森林资源分布比较集中的区域之一,是我国西部地区重要的生态屏障(邵亚奎等, 2020),独特的地理位置,使伊犁河谷山地从低海拔到高海拔区拥有着明显的植被垂直带谱。受西风带影响,土壤环境的细微变化都将影响着土壤化学计量比的变化与植被的生长发育,因此伊犁河谷既是气候变化敏感区也是生态脆弱区(张新时等, 1973)。而先前对伊犁河谷的研究多集中于土壤碳储量(罗庆辉, 2020)、有机碳(皇甫倩华等, 2017)的分布及草本植物器官化学计量比(徐昕亿等, 2020)等方面,缺少对土壤化学计量比-微环境的共同研究。基于此,本文选择伊犁河谷南部山地作为研究区,沿海拔梯度展开了系统的采样与环境调查,旨在揭示不同海拔土壤养分含量及化学计量比的差异性,探究对土壤养分化学计

量比具有主导作用的环境因子有哪些,以加强对伊犁河谷南部山地生态系统土壤养分结构与循环的了解,为生态系统的保护及可持续发展提供参考依据。

1 研究区概况

本文以伊犁河谷南部山地的西天山国家级自然保护区为研究区(图1),该河谷地处中纬度内陆,有U形谷的地形特点,大西洋、巴尔喀什湖

等温暖潮湿的气流能顺利进入(买苏旦·买苏提等, 2023),表现为湿润的温带大陆性气候。年均温 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $800\sim 1\ 000\text{ mm}$,达到亚热带降水水平,被称作干旱沙漠中的“湿岛”。山地内拥有较为完整的垂直带谱,低海拔区分布着天山仅存的带状阔叶林,过渡带针阔混交林、中高海拔区广泛分布着中国西部以雪岭云杉为建群种的最大原始针叶林以及高海拔草甸;山地土壤以灰褐色土为主,土壤肥沃,物种丰富。

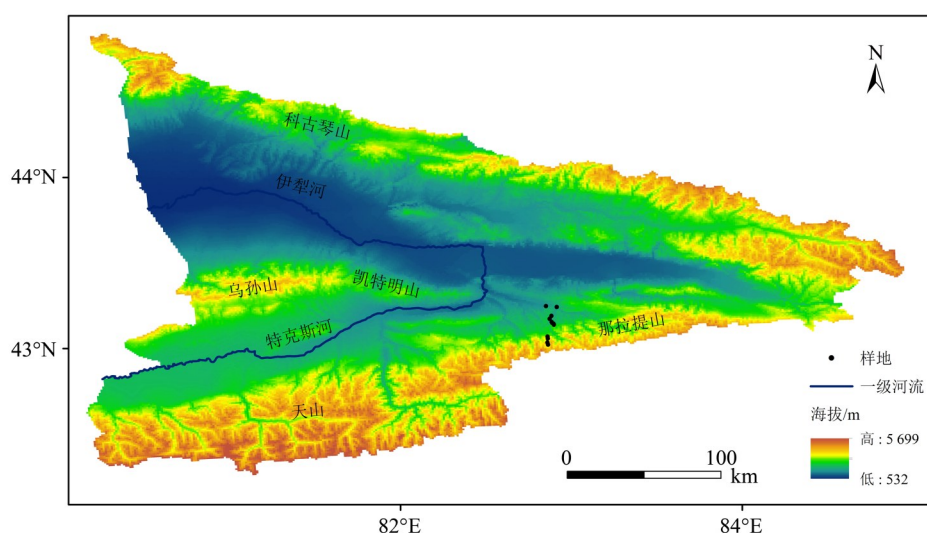


图1 研究区所在位置

Fig. 1 Location of study area

2 数据与方法

2.1 样地设置与样品采集

为减小人类活动干扰,本文选择伊犁河谷南部山地(西天山自然保护区)具有典型性的植被带进行采样。在海拔为 $1\ 283\sim 2\ 672\text{ m}$ 范围内,每隔 100 m 设置一个样地,共设置13处样地。依据海拔梯度进一步划分为低山带落叶阔叶林、过渡带针阔混交林、中高山带针叶林以及高山带高山草甸四类。在13处样地中,每个样地设置5个样点(在 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的样地中心选取一个样点,并将该样地划分成4个 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 小样方,在4个小样方的中心各取一个样点),每个样点用土钻取3次土样,每次采取约 $1\ 270\text{ cm}^3$ 的土样混合均匀,共采集65个表层($0\sim 20\text{ cm}$)土样,将采集的土样带回实验室风干后进行分析,样地信息见表1。

2.2 测定指标及方法

将风干的65个土样研磨过筛后测定土壤理化指标。其中,采用酸度计法测定pH,重铬酸钾外

加热法测定土壤有机碳(SOC)含量,土壤全氮(TN)含量的测定采用凯氏定氮法,土壤全磷(TP)的测定采用钼锑抗比色法,土壤全钾(TK)的测定采用原子吸收-火焰光度法(鲍士旦, 2000)。同时,为了研究土壤微气候对化学计量特征的影响,在土壤表层安装Maxim公司温湿度传感器(DS7505U)(Wild et al., 2019),每 15 min 记录地上 12 cm 的大气温度以及地下 6 cm 的土壤温、湿度。选取连续监测一年的平均数据用于分析,分别以大气年均温(AMAT)、土壤年均温(SMAT)和土壤年均湿度(SMAM)表示。

2.3 数据来源及处理

为更充分研究土壤化学计量特征,更精准确定较强的影响因子,选取地形、气候、植被等与土壤化学计量特征相关的环境因子。在样地调查中利用GPS定位系统获取每个样地经纬度、海拔、坡度等地形因子。DEM数据源于美国NASA网站(<https://www.nasa.gov/>),空间分辨率为 30 m 。基于DEM数据,使用QGIS 10.2软件提取出平面曲

表1 样地基本信息
Table 1 Basic information on sample plots

植被类型	海拔梯度	东经	北纬	海拔/m	坡度/(°)
高山草甸	高山带	82°51'48.356"	43°01'22.869"	2 672	16.2
针叶林		82°51'36.445"	43°02'08.015"	2 541	17.2
针叶林		82°51'44.908"	43°03'33.659"	2 381	33.7
针叶林		82°51'38.464"	43°04'13.464"	2 161	28.9
针叶林	中高山带	82°53'52.288"	43°08'23.873"	1 896	14.6
针叶林		82°53'48.290"	43°08'32.792"	1 804	28.7
针叶林		82°53'44.272"	43°08'44.590"	1 717	14.9
针叶林		82°53'15.542"	43°09'02.534"	1 641	12.2
针阔混交林	过渡带	82°53'05.815"	43°09'19.629"	1 567	29.2
落叶阔叶林		82°52'22.052"	43°10'26.183"	1 482	21.5
落叶阔叶林	低山带	82°53'00.338"	43°11'29.951"	1 358	30.4
落叶阔叶林		82°54'52.894"	43°14'36.885"	1 248	35.4
落叶阔叶林		82°51'04.139"	43°14'54.715"	1 283	15.0

率(FC, flat curvature)、剖面曲率(SC, sectional curvature)、地形起伏度(TR, topographic relief)和地表粗糙度(SR, surface roughness)4个地形指标。植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index)来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为30 m,选用与土壤样品采集相同年份中12个月NDVI,通过QGIS 10.2提取出对应的NDVI数据,利用最大值合成法获取各个样点的年NDVI值,以反映研究区植被覆盖对土壤化学计量特征的影响。采用Excel对样点数据进行预处理。使用SPSS 26.0对土壤养分指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和邓肯法(Duncan)检验差异显著性($\alpha=0.05$),Pearson相关分析,Origin 2021对其结果绘图。利用Canoco 5.0对土壤基本理化指标、环境因子与土壤化学计量比之间的关系进行冗余分析(RDA)并绘制图像。

3 结果与分析

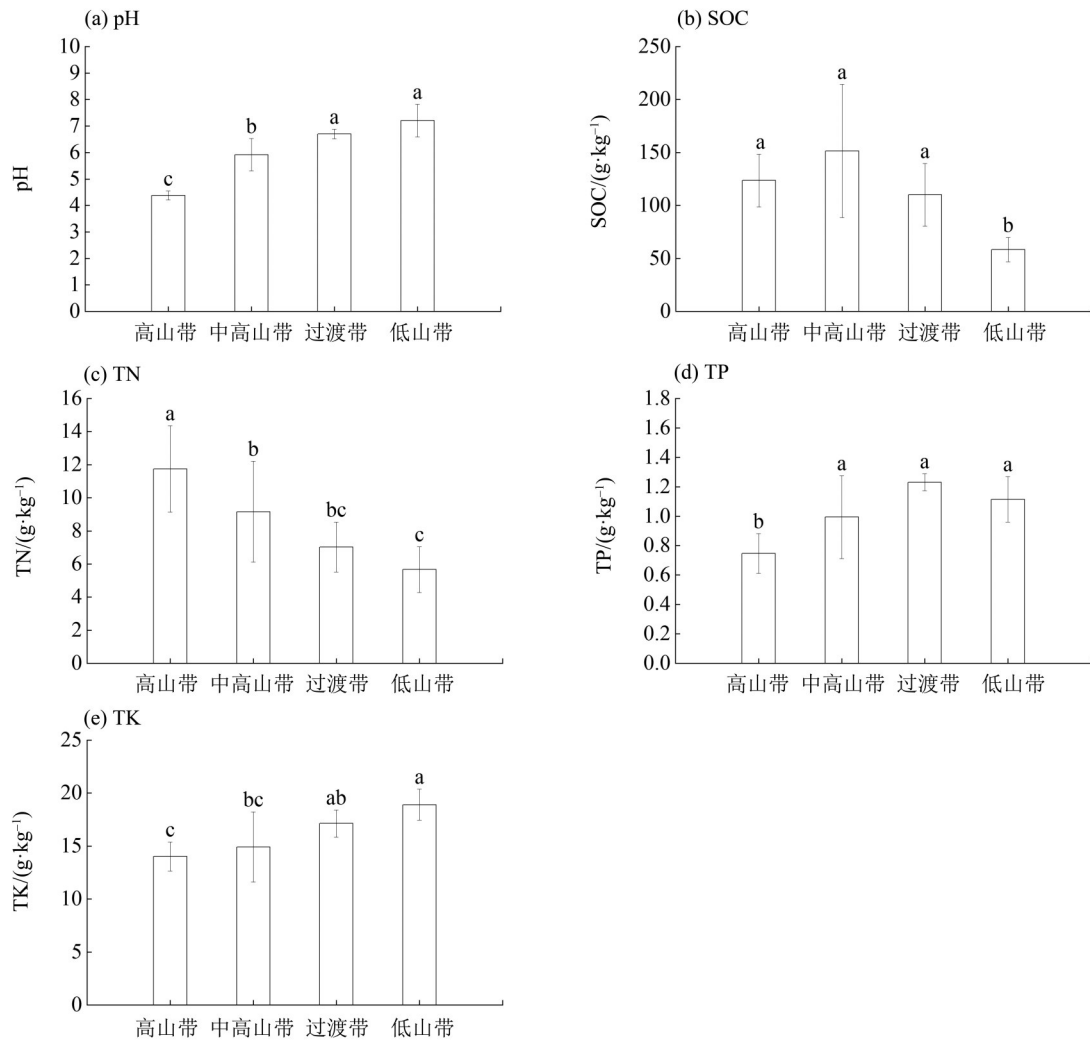
3.1 不同植被带土壤理化指标

随着海拔升高,土壤酸性逐渐增强,土壤SOC含量依次为低山带(58.45 ± 11.47 g/kg)、过渡带(110.11 ± 29.68 g/kg)、中高山带(151.47 ± 62.99 g/kg)、高山带(123.58 ± 24.90 g/kg),其中中高山带与高山带及过渡带SOC含量显著高于低山带($P<0.05$)(图2)。土壤TN含量随海拔升高依次为低山带(5.66 ± 1.39 g/kg)、过渡带(7.02 ± 1.51 g/kg)、中高山带(9.15 ± 3.05 g/kg)、高山带(11.74 ± 2.61 g/kg),其中

高山带TN含量显著最高($P<0.05$)。土壤TP含量随着海拔升高依次为低山带(1.11 ± 0.15 g/kg)、过渡带(1.23 ± 0.06 g/kg)、中高山带(0.99 ± 0.28 g/kg)、高山带(0.75 ± 0.14 g/kg),过渡带、低山带、中高山带土壤TP含量显著高于高山带($P<0.05$)。土壤TK含量随海拔升高依次表现为低山带(18.90 ± 1.47 g/kg)、过渡带(17.13 ± 1.30 g/kg)、中高山带(14.91 ± 3.30 g/kg)、高山带(14.02 ± 1.37 g/kg)。其中,SOC和TN表现出中高山带含量显著高于低山带,而TP和TK表现则与之相反。

3.2 不同植被带土壤养分化学计量比

随着海拔的降低高山带、中高山带、过渡带、低山带中土壤C:N平均值分别为10.67、16.44、15.93、10.60(表2)。中高山带与过渡带之间C:N无显著差异($P>0.05$),但显著高于高山带、低山带($P<0.05$)。C:P均值分别为172.56、160.37、89.47、52.34。其中,高山带与中高山带之间C:P差异性不显著($P>0.05$),但二者C:P显著高于过渡带以及低山带($P<0.05$)。C:K均值分别为8.99、11.73、6.55、3.09,表现为中高山带与高山带、过渡带间差异性不显著($P>0.05$),但显著高于低山带。N:P均值分别为16.52、9.60、5.74、5.05,其中,高山带N:P显著高于中高山带、过渡带及低山带($P<0.05$),但过渡带与低山带之间无显著差异($P>0.05$)。N:K均值分别为0.85、0.69、0.41、0.30,高山带N:K显著高于中高山带、过渡带、低山带($P<0.05$),但中高山带与过渡带之间无显著差异



图中不同小写字母表示不同植被带间差异性显著($P < 0.05$)。

图2 不同植被带土壤理化指标

Fig. 2 Physical and chemical indicators of soils in different vegetation zones

($P > 0.05$)。P:K 均值分别为 0.05、0.07、0.07、0.06, 其中, 不同海拔梯度间 P:K 差异性均不显著 ($P > 0.05$) (表 2)。

3.3 化学计量比与土壤理化指标的关系

土壤理化指标与化学计量比的相关分析结果表明(图 3), pH 与 C:K 呈现显著负相关关系 ($P < 0.01$), 同时与 C:P、N:P、N:K 之间均呈现极显著负相关关系 ($P < 0.001$)。SOC 与 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 之间均呈现极显著正相关关系 ($P < 0.001$); TN 与 C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 均呈现极显著正相关关系 ($P < 0.001$); TP 与 P:K 之间存在极显著正相关关系 ($P < 0.001$), 而与 C:P、N:P 之间存在极显著负相关关系 ($P < 0.001$); TK 与所有化学计量比之间均呈现极显著负相关关系 ($P < 0.001$)。其中, SOC 和 TN 与土壤化学计量比正相关性较

强, pH 和 TK 与土壤化学计量比负相关性较强。

通过 RDA 对土壤化学计量比与土壤理化指标之间的关系进行分析可知, 化学计量比在 RDA1、RDA2 排序轴的解释量分别为 67.9% 和 18.2%, 且 RDA1 和 RDA2 的累积解释量达 86.1% (图 4)。同时, 前 4 轴对于土壤化学计量比和土壤理化指标关系的累积解释量达到 100%, 说明结果可靠。根据图中夹角的大小显示, 土壤化学计量比与 SOC、TN 成正比; 与 TP、TK、pH 成反比, 其中 SOC、TP、TN 对于土壤化学计量比的解释量更高。蒙特卡洛 (Monte Carlo) 检验结果进一步表明不同理化性质对土壤化学计量比的重要性具有一定差异 (表 3), SOC、TP、TN、TK、pH 的重要性依次降低, 解释量分别为 62.4%、15.9%、13.7%、1.8%、0.6%。

表2 不同植被带土壤化学计量比¹⁾
Table 2 Soil stoichiometric ratios in different vegetation zones

化学计量比	植被带	平均值	最大值	最小值	标准偏差	变异系数/%
C:N	高山带	10.67 ^b	13.43	9.13	1.69	15.9
	中高山带	16.44 ^a	27.31	9.31	4.12	25.1
	过渡带	15.93 ^a	21.9	10.4	4.72	29.6
	低山带	10.60 ^b	17.15	8.72	1.76	16.6
C:P	高山带	172.56 ^a	280.83	124.07	62.86	36.4
	中高山带	160.37 ^a	398.86	31.28	78.22	48.8
	过渡带	89.47 ^b	111.35	48.94	24.13	27.0
	低山带	52.34 ^b	64.84	43.79	5.99	11.4
C:K	高山带	8.99 ^{ab}	12.96	6.22	2.58	28.7
	中高山带	11.73 ^a	35.97	1.55	7.90	67.4
	过渡带	6.55 ^{ab}	8.11	3.15	2.07	31.7
	低山带	3.09 ^b	4.09	2.34	0.56	18.2
N:P	高山带	16.52 ^a	26.79	10.43	6.48	39.3
	中高山带	9.60 ^b	19.5	2.87	3.37	35.0
	过渡带	5.74 ^c	7.34	4.17	1.35	23.5
	低山带	5.05 ^c	6.63	2.73	0.89	17.7
N:K	高山带	0.85 ^a	1.24	0.65	0.24	28.4
	中高山带	0.69 ^{bc}	1.76	0.14	0.40	57.2
	过渡带	0.41 ^{bc}	0.57	0.3	0.10	25.2
	低山带	0.30 ^c	0.42	0.16	0.07	23.5
P:K	高山带	0.05 ^a	0.07	0.04	0.01	19.0
	中高山带	0.07 ^a	0.14	0.03	0.03	40.5
	过渡带	0.07 ^a	0.08	0.06	0.01	10.2
	中高山带	0.06 ^a	0.07	0.05	0.01	11.7

1) 平均值的不同小写字母, 表示不同植被带间差异性显著($P<0.05$)。

3.4 化学计量比与环境因子的关系

由图5可知, C:N与SMAT存在显著负相关关系($P<0.05$), 与NDVI之间存在极显著负相关关系($P<0.001$); C:P与ALT存在极显著正相关关系($P<0.001$), 与LON、LAT、AMAT、SMAT、NDVI之间均存在极显著负相关关系($P<0.001$); C:K与ALT存在显著正相关关系($P<0.05$), 与LAT($P<0.05$)、NDVI($P<0.01$)之间存在显著负相关关系, 与AMAT、SMAT间存在极显著负相关关系($P<0.001$); N:P与ALT之间存在极显著正相关关系($P<0.001$), 与SMAM间存在显著负相关关系($P<0.05$), 与LON、LAT、AMAT、SMAT间均存在极显著负相关关系($P<0.001$); N:K与ALT($P<0.05$)、FC($P<0.01$)间存在显著正相关关系,

与SG、SR、TR间存在显著负相关关系($P<0.05$), 与LAT存在显著负相关关系($P<0.01$), 与AMAT、SMAT间存在极显著负相关关系($P<0.001$); P:K与SMAM、FC间存在显著正相关关系($P<0.01$), 与ALT($P<0.05$)、SG($P<0.01$)间存在显著负相关关系。

对土壤化学计量比与环境因子之间的关系进行RDA分析表明, RDA1和RDA2对于土壤化学计量比的解释量分别为64.01%和23%, 且RDA1和RDA2的累计解释量达到87.01%。同时, 前4轴对于土壤化学计量比和环境之间关系的累积解释变量达到99.85%, 说明排序结果可靠。由图6可知, 土壤化学计量比与ALT、FC间呈正相关, 与LON、LAT、SG、AMAT、SMAT、SMAM、

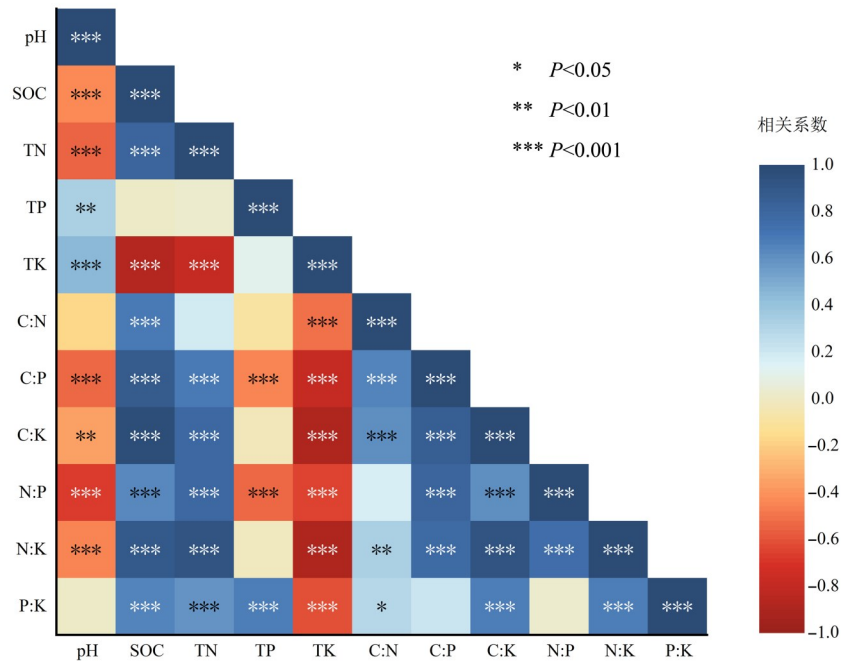


图3 土壤化学计量比与土壤理化指标相关分析

Fig. 3 Correlation analysis of soil stoichiometric ratios with soil physical and chemical indicators

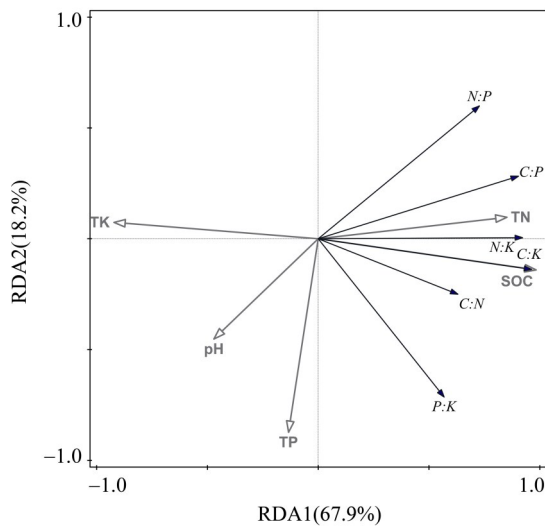


图4 土壤化学计量比与土壤理化指标RDA排序结果
Fig. 4 Soil stoichiometric ratios and RDA ranking results of soil physical and chemical indicators

NDVI呈现较强的负相关,与SR、TR间呈较弱的反比,而SC对土壤化学计量比基本不产生影响。SMAT、NDVI、ALT、AMAT、对于土壤化学计量比的总体解释度更高,说明它们是影响土壤化学计量比的主导因子。Monte Carlo检验结果进一步表明不同环境因子对土壤化学计量比的重要性有一定的差异。对土壤化学计量比有一定影响力的环境因子包括SMAT、NDVI、ALT、SG、AMAT、

表3 土壤理化指标对化学计量比重要性排序

Table 3 Ranking the importance of soil physical and chemical indicators on stoichiometric ratios

土壤理化指标	土壤理化指标所占解释量/%	置换检验	显著性(P)
SOC	62.4	104	0.002
TP	15.9	45.4	0.002
TN	13.7	105	0.002
TK	1.8	17	0.002
pH	0.6	6.4	0.002

SMAM、SC、FC、TR、LAT、LON,其解释变量分别为27.1%、11.2%、12.3%、3.9%、3.4%、2.2%、0.8%、0.7%、0.3%、0.8%、0.4%(表4)。

4 讨论

4.1 不同海拔土壤理化性质

伊犁河谷山地植被具有一定的垂直分异格局(周洪华等,2011),本文依据海拔梯度将植被分为低山带(落叶阔叶林)、过渡带(针阔混交林)、中高山带(针叶林)及高山带(高山草甸)。海拔通过调节水热分配与土壤性质间接影响山地土壤养分分布(Bangroo et al., 2017; Zhang et al., 2021)。本研究发现,随着海拔升高土壤酸性逐渐增强,且pH与SOC呈极显著负相关关系,这与前人的研

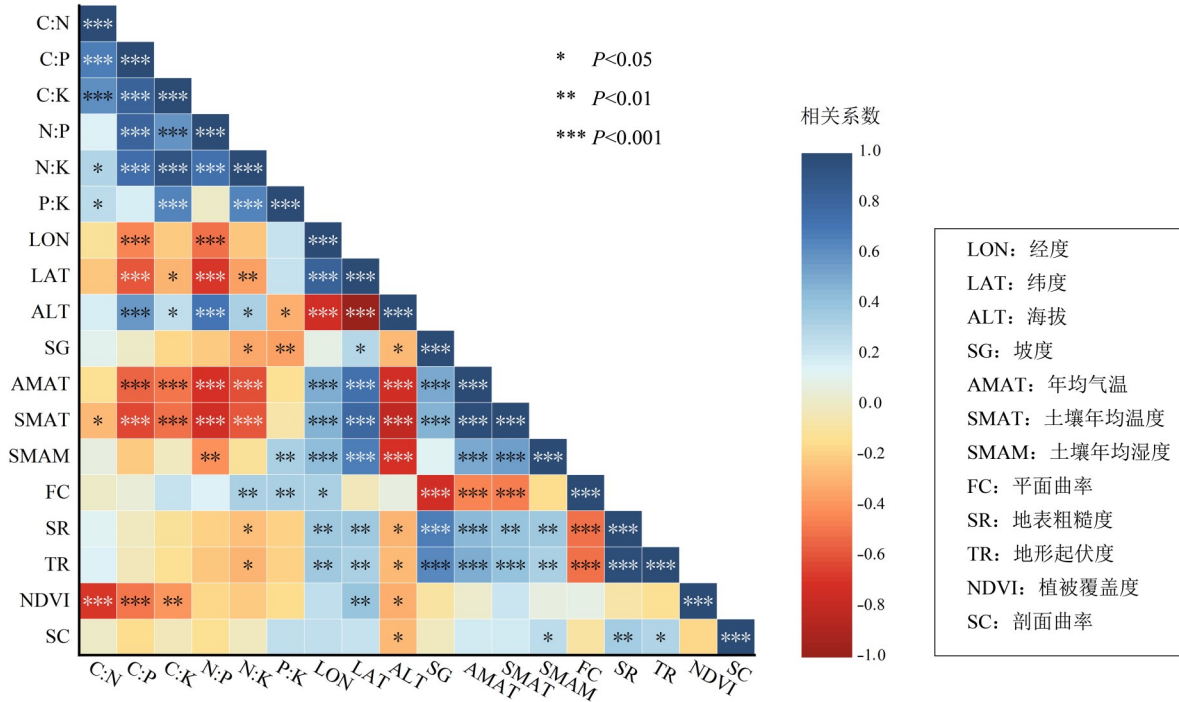


图5 土壤化学计量比与环境因子相关分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil stoichiometric ratios with environmental factors

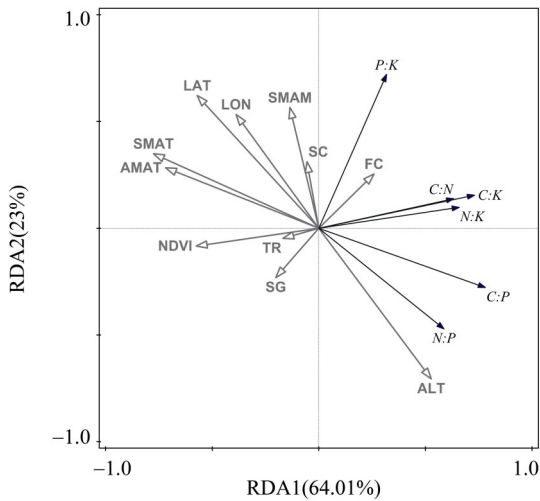


图6 土壤化学计量比和环境因子RDA排序结果

Fig. 6 Soil stoichiometric ratios and RDA ranking results for environmental factors

表4 环境因子对化学计量比重要性排序

Table 4 Ranking of the importance of environmental factors on stoichiometric ratios

环境因子	环境因子所占解释量/%	置换检验	显著性(P)
SMAT	27.1	21.6	0.002
NDVI	11.2	10.3	0.002
ALT	12.3	13.9	0.002
SG	3.9	4.8	0.006
AMAT	3.4	4.4	0.024
SMAM	2.2	2.9	0.052
SC	0.8	1.1	0.314
FC	0.7	0.9	0.406
TR	0.3	0.4	0.686
LAT	0.8	1	0.304
LON	0.4	0.6	0.602

究结果一致(祖元刚等, 2011; 徐薇薇等, 2014)。新疆地区大多土壤pH>7, SOC 累积量较小, 基于碱性的土壤条件, 海拔的升高使土壤pH酸性增强, SOC 累积量逐渐增多。在中高山带、高山带土壤SOC、TN 含量较高, 这与黄伟佳等(2023)的研究结果类似。这种情况可能是由于低山带土壤水热条件较高山带好, 土壤生物分解消耗了更多有机质, 致使低山带SOC 含量相对较低(董廷发,

2021; 黄斌等, 2022), 同时也有研究表明, 较低的温度(高海拔地区)有利于土壤碳的积累(向慧敏, 2015)。TN 变化含量通常与SOC 分布规律较为一致, 主要是因为植物的残根落叶大多分布在土壤表层, 分解后的腐殖质在表层土壤中积累, 从而形成SOC 和TN 的表聚现象(闫丽娟等, 2019), 在新疆表层土壤中约有80%以上的TN 以

有机态形式存在(冯锦等, 2017)。TP 含量随着海拔的升高不断降低, 且与 SOC 无显著相关关系, 这与刘曾媛(2014)的研究结果一致。这可能是由于新疆大多数地区土壤 TP 含量在 0~1 g/kg, TP 相对缺乏, 同时, 土壤 TP 的来源比较固定, 对于山地土壤而言, 其主要受成土母质的影响, 变异性小并且相对稳定(朱秋莲等, 2013)。与王华(2017)的研究结果相似, TK 含量随着海拔的升高不断减小, 且与 SOC 呈极显著负相关关系, 说明 SOC 含量不断增加的过程中, TK 的含量也在持续释放。可能与高山带淋溶作用较强, 低山带植物表聚作用相关。

4.2 不同海拔土壤化学计量比

土壤化学计量比是评价土壤养分供给能力及土壤质量和功能的重要指标(赵雯等, 2022)。作为反映土壤质量的指标, C:N 与土壤有机质分解的速率呈反比(王绍强等, 2008)。本研究区中高山带针叶林及过渡带针阔混交林 C:N 均较高且差异性不显著, 但与高山带草甸间差异性显著, 这与庞金凤(2020)的研究结果一致。这可能与植被带分布有关, 中高山带以雪岭云杉为建群种的针叶林和过渡带混交林凋落物丰富, 且分解速度较快, 从而有效提高了 SOC 和 TN 的含量, 根据 Bui(2013)的研究, 针叶林、针阔混交林 C:N=14~16, 也说明 2 种植被带土壤有机质腐殖化程度高, 因此 C:N 含量较高。而高山带草甸处于气温低、湿度大, 土壤微生物活力较低, 使土壤 N 循环有所差异(王建林等, 2014)。C:P 是表示土壤中磷矿化能力的重要指标(曾全超等, 2015)。研究结果显示, 除低山带 C:P 与全国陆地 C:P 均值(52.7)持平外, 随着海拔升高 C:P 远高于全国平均值, 说明伊犁河谷南部山地土壤养分丰富, 微生物活性相对较高。研究表明, 土壤中较低的 C:P 能够促进有机质分解释放土壤养分(陶冶等, 2017), 说明随着海拔升高, 土壤 P 有效性逐渐降低, 这与马鑫钰等(2023)研究结果一致。N:P 比值代表土壤氮、磷的可利用性(Zhao et al.), 也是预测土壤养分限制类型的指标, 随海拔升高, N:P 比值上升; 当该比值小于 10 时土壤受 N 限制, 大于 20 时土壤受 P 限制, 为 10~20 时土壤受 N 和 P 共同限制(Koerselman et al., 2013)。因此, 本研究区高山带草甸土壤发育受 N、P 的共同限制, 其余土壤均受 N 限制, 对此可以通过适量施用氮肥或植物固氮的方式缓解 N 对土壤的限制作用。由于土壤中 TP、TK 含量相对稳定,

C:K、N:K 主要受土壤 SOC 和 TN 含量的影响; P:K 主要受土壤 TP 含量影响, 因此呈现出相应的差异性。但 TK 对植被生长的作用仅次于 TN, 其在光合作用中具有主导型, 在抗旱、抗寒、抗病及抗倒伏能力方面有显著作用(秦娟等, 2016)。

4.3 土壤化学计量比影响因素及其意义

山地由于其独特的地理格局和生态环境, 综合了土壤性质、气候、植被、地形等多重因子, 共同作用于土壤化学计量比的变化(秦娟等, 2016)。研究表明 SOC、TP、TN 作为主导因子, 对化学计量比的贡献度分别为 62.4%、15.9%、13.7%。SOC 作为贡献度最高的土壤理化因子, 与 C:N:P:K 均呈现极显著正相关关系, TN 与除 C:N 以外的化学计量比间亦呈现极显著正相关关系, TP 与 P:K 呈极显著正相关关系, 这与李丹维等(2017)的研究结果一致, 表明 C、N、P 作为土壤最基本养分对相应的化学计量比均起着重要的作用。

本文还分析了微环境对化学计量比的影响, 结果表明气候因子 SMAT(27.1%)、AMAT(3.4%); 植被因子 NDVI(11.2%)及地形因子 ALT(12.3%)是对化学计量比产生主导作用的因子。其中, 相对于湿度而言, 温度(SMAT、AMAT)对化学计量比的影响更为显著。AMAT 和 SMAT 均与化学计量比呈现出极显著负相关关系, 由此推测在全球气候持续变化的背景下, 温度的升高可能会加速伊犁河谷南部山地土壤养分流失。而湿度未能成为影响化学计量比的主导因子, 原因可能是由于伊犁河谷“三山夹两谷”的地理位置削弱了来自北冰洋的寒潮、塔克拉玛干沙漠的热气流以及蒙古-西伯利亚反气旋的影响, 同时向西开口的独特地势, 有利于巴尔喀什河及里海的暖湿气流进入(陶冶等, 2016), 使得河谷内部土壤充足的水分。有研究表明, NDVI 越高, 径流阻力变大和降水存蓄增加, 使土壤养分流失量减少(王全九等, 2016)。在干旱半干旱地区山地生态系统中, 植被生产力、物种与群落的组成和稳定性在一定程度上都取决于水分, 水量变化将显著影响生态系统的初级生产力, 间接影响土壤中植物残根落叶等有机质的输入, 土壤有机质的分解与积累直接影响土壤 C、N 的含量, 进而影响土壤化学计量比。RDA 结果表明, NDVI 作为化学计量特征的主导因子, 与其呈显著负相关关系。可能是因为研究区高山带草甸以下为建群种雪岭云杉和成片的落叶阔叶林, 较高的植被覆盖度阻挡了部分光照, 进而对化学

计量比产生影响。因此,光照对土壤化学计量比的影响还需深入研究。ALT作为影响化学计量比的主导因子,进一步验证了土壤化学计量比是由海拔梯度主导的环境因子和生物因子共同作用的结果(张广帅等,2016)。

李晓莎等(2018)认为,土层深度受局地地形条件(坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率等)影响显著。但本文在伊犁河谷南部山地表层(0~20 cm)土壤,得出SC、TR等因子对土壤化学计量比影响不显著的结果。

5 结论

1) 土壤酸性随着海拔的升高逐渐增强。随着海拔升高,土壤SOC含量依次为低山带(58.45±11.47 g/kg)、过渡带(110.11±29.68 g/kg)、中高山带(151.47±62.99 g/kg)、高山带(123.58±24.90 g/kg);土壤TN含量依次为低山带(5.66±1.39 g/kg)、过渡带(7.02±1.51 g/kg)、中高山带(9.15±3.05 g/kg)、

高山带(11.74±2.61 g/kg);土壤TP含量依次为低山带TP(1.11±0.15 g/kg)、过渡带(1.23±0.06 g/kg)、中高山带(0.99±0.28 g/kg)、高山带(0.75±0.14 g/kg);土壤TK含量依次表现为低山带(18.90±1.47 g/kg)、过渡带(17.13±1.30 g/kg)、中高山带(14.91±3.30 g/kg)、高山带(14.02±1.37 g/kg)。

2) C:N表现为中高山带(混交林、针叶林)显著高于低山带阔叶林和高山带草甸;C:P表现为中高山带(针叶林、草甸)显著高于中低山带(混交林、阔叶林);C:K表现为中高山带显著高于低山带;N:P表现为高山带草甸显著较高;N:K表现为高山带草甸显著较高;不同海拔梯度植被带间P:K差异性均不显著。

3) 土壤理化指标中影响化学计量比的主导因子为SOC(62.4%)、TP(15.9%)、TN(13.7%);环境因子对土壤化学计量比产生影响的主导因子为SMAT(27.1%)、NDVI(11.2%)、ALT(12.3%)、AMAT(3.4%)。

参考文献:

- 鲍士旦, 2000. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社: 25-109.
- 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[J]. 生态学杂志, 40(3): 672-679.
- 冯锦, 崔东, 孙国军, 等, 2017. 新疆土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J]. 草业科学, 34(4): 692-697.
- 皇甫倩华, 陈伟, 孙从建, 等, 2017. 西天山高寒草甸地区土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 31(3): 63-68.
- 黄伟佳, 刘春, 刘岳, 等, 2023. 南岭山地不同海拔土壤生态化学计量特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 32(1): 80-89.
- 黄斌, 王泉泉, 李定强, 等, 2022. 南岭山地土壤有机碳及组分海拔梯度变化特征[J]. 土壤通报, 53(2): 374-383.
- 罗庆辉, 2020. 降水及土壤生态化学计量特征对西天山北坡雪岭云杉林碳储量的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学.
- 刘曾媛, 贡璐, 张雪妮, 等, 2014. 克里雅河流域于田绿洲土壤酶活性与理化因子相关性分析[J]. 中国土壤与肥料, (4): 35-41+52.
- 李新星, 刘桂民, 吴小丽, 等, 2020. 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, 39(3): 758-765.
- 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等, 2010. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 30(23): 6581-6590.
- 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等, 2017. 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, 54(1): 160-170.
- 李晓莎, 许中旗, 赵娱, 等, 2018. 冀北山地干旱阳坡土壤厚度及土壤养分的空间异质性[J]. 河北农业大学学报, 41(1): 24-30+48.
- 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 等, 2023. 不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 44(5): 2715-2723.
- 买苏旦·买苏提, 张际昭, 张昭臣, 等, 2023. 微气候和土壤营养共同驱动了新疆伊犁河谷山地草本植物物种多样性的海拔格局[J/OL]. 应用与环境生物学报, DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2022.11047.
- 庞金凤, 张波, 王波, 等, 2020. 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[J]. 干旱区资源与环境, 34(1): 178-185.
- 秦娟, 孔海燕, 刘华, 2016. 马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 44(2): 68-76+82.
- 石轩, 李艳红, 李发东, 2021. 玛纳斯河流域不同灌区棉田土壤铵态氮和硝态氮变化特征及影响因素[J]. 中山大学学报(自然科学版(中英文)), 60(6): 80-90.
- 赛牙热木·哈力甫, 宋瑞清, 艾克拜尔·伊拉洪, 等, 2018. 察布查尔县土壤碳氮磷钾垂直分布规律研究[J]. 干旱区地理, 41(3): 582-591.

- 邵亚奎, 王蕾, 朱长明, 等, 2020. GEE 云平台支持下的西天山森林遥感监测与时空变化分析[J]. 测绘通报, (8): 13-17.
- 苏昊海, 张小芳, 牛亚琳, 等, 2021. 祁连山狼毒(*Stellera chamaejasme*)叶片生态化学计量特征对海拔的响应[J]. 中国沙漠, 41(6):205-212.
- 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 等, 2017. 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, 37(2): 305-314.
- 陶冶, 张元明, 周晓兵, 2016. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 27(7): 2239-2248.
- 王华, 陈莉, 宋敏, 等, 2017. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林土壤磷钾养分空间异质性[J]. 生态学报, 37(24): 8285-8293.
- 王绍强, 于贵瑞, 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 28(8):3937-3947.
- 王全九, 杨婷, 刘艳丽, 等, 2016. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. 农业机械学报, 47(6):67-82.
- 吴昊, 邹梦茹, 王思芊, 等, 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[J]. 环境科学学报, 28(12):2323-2331.
- 王建林, 钟志明, 王忠红, 等, 2014. 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, 34(22): 6678-6691.
- 徐昕亿, 陆瑶, 许仲林, 2020. 天山北坡草本植物生态化学计量特征沿海拔梯度的变化[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 37(2):213-222.
- 徐薇薇, 乔木, 2014. 干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J]. 中国沙漠, 34(6):1558-1561.
- 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 等, 2015. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 35(18): 6089-6099.
- 闫丽娟, 王海燕, 李广, 等, 2019. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 33(5): 190-196+204.
- 张新时, 1973. 伊犁野果林的生态地理特征和群落学问题[J]. Journal of Integrative Plant Biology, (2):239-253.
- 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等, 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[J]. 生态学报, 36(3):675-687.
- 赵雯, 黄来明, 2020. 高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素[J]. 生态学报, 42(11): 4415-4427.
- 周洪华, 李卫红, 陈亚宁, 等, 2011. 伊犁河流域乌孙山北坡植被垂直分布格局的定量判断[J]. 中国沙漠, 31(4): 906-912.
- 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等, 2015. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 30(5): 870-879.
- 张莎莎, 李爱琴, 王会荣, 等, 2020. 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, 29(1):97-104.
- 祖元刚, 李冉, 王文杰, 等, 2011. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. 生态学报, 31(18):5207-5216.
- 张珂, 苏永中, 王婷, 等, 2016. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 36(11): 3235-3243.
- 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等, 2013. 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, 33(15): 4674-4682.
- AGREN G I 2004. The C:N: P stoichiometry of autotrophs—theory and observations[J]. Ecol Lett, 7(3): 185-191.
- BANGROO S A, NAJAR G R, RASOOL A, 2017. Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range[J]. CATENA, 158: 63-68.
- BUI E N, HENDERSON B L, 2013. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant Soil, 373(1):553-568.
- ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al, 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecol Lett, 3(6): 540-550.
- KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M, 1996. The vegetation N: P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. J Appl Ecol, 33(6): 441-450.
- RAHBEK C, BORREGAARD M K, COLWELL R K, et al, 2019. Humboldt's enigma: What causes global patterns of mountain biodiversity[J]. Science, 365(6458): 1108-1113.
- WHITTAKER R H, 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California[J]. Ecol Monogr, 30(3): 279-338.
- WILD J, KOPECKÝ M, MACEK M, et al, 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement[J]. Agric For Meteorol, 268: 40-47.
- ZHANG A, LI X, WU S, et al, 2021. Spatial pattern of C:N: P stoichiometry characteristics of alpine grassland in the Altunshan Nature Reserve at North Qinghai-Tibet Plateau[J]. CATENA, 207: 105691.
- ZHAO F, KANG D, HAN X, et al, 2015. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. Ecol Eng, 74: 415-422.