

DOI: 10.5846/stxb202105061179

赵雯, 黄来明. 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. 生态学报, 2022, 42(11): 4415-4427.

Zhao W, Huang L M. Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4415-4427.

# 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

赵雯<sup>1,2</sup>, 黄来明<sup>1,2,\*</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

**摘要:** 了解高寒地区不同土地利用类型下土壤养分化学计量特征及其影响因素可为评估脆弱生态系统土壤质量和功能提供参数。通过测定青海省东部 24 个样点 0—30 cm 土壤基本理化性质 (pH、容重 BD、孔隙度  $P_s$ 、黏粒含量  $C_y$ 、土壤含水量 SWC、有机碳 SOC、全氮 TN、全磷 TP、速效氮 AN 和速效磷 AP), 并提取各样点环境因子数据 (年均温 MAT、年均降雨量 MAP、年均蒸发量  $E_a$ 、植被归一化指数 NDVI、海拔 ALT、坡度 SG、地表粗糙度 SR、经度 LON 和纬度 LAT), 分析了农、林、草三种土地利用类型下土壤养分化学计量比分布特征及其影响因素。结果表明, 农地土壤有机碳 SOC 和全氮 TN 含量显著低于林地和草地 ( $P < 0.05$ ), 而全磷 TP 和速效磷 AP 含量则相反, 农、林、草地速效氮 AN 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。农、林、草地不同深度土壤 C:N (平均值 19.93, 变异系数  $< 16\%$ ) 和 AN:AP (平均值 2.73, 变异系数  $< 71\%$ ) 较为稳定且无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 而农地 C:P 和 N:P (平均值分别为 19.27 和 0.99) 却显著低于林地 (平均值分别为 84.88 和 4.12) 和草地 (平均值分别为 75.26 和 3.87) ( $P < 0.05$ ), 表明农地可能存在一定程度的缺氮现象。冗余分析表明不同土壤性质与环境因子对土壤养分化学计量比的影响和贡献率不同, 对土壤养分化学计量比影响显著的环境因子按贡献率由大到小依次为: 年均温度 MAT (38.3%)、年均蒸发量  $E_a$  (34.9%)、海拔 ALT (32.6%)、年均降水量 MAP (30.2%)、纬度 LAT (24.2%) 及植被指数 NDVI (17.9%); 土壤性质的贡献率由大到小依次为: 全氮 TN (60.3%)、总有机碳 SOC (59.2%)、容重 BD (56.4%)、总孔隙度  $P_s$  (55.6%)、黏粒含量  $C_y$  (39.3%)、土壤含水量 SWC (36.3%)、速效磷 AP (23.6%)、pH (22.8%)、全磷 TP (12.0%) 和速效氮 AN (9.9%)。通过提高限制元素的肥料施用量及引种固氮植物等方式, 可缓解高寒山区农地缺氮现象。

**关键词:** 高寒地区; 土地利用类型; 化学计量特征; 土壤养分; 影响因素

## Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region

ZHAO Wen<sup>1,2</sup>, HUANG Laiming<sup>1,2,\*</sup>

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Understanding the stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in the alpine regions can provide parameters for evaluating soil quality and function of the fragile ecosystems. In this study, the basic soil properties, including soil pH, bulk density (BD), porosity ( $P_s$ ), clay content ( $C_y$ ), soil water

**基金项目:** 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0306); 中国科学院青年创新促进会会员项目 (2019052); 中国科学院地理科学与资源研究所兼维优秀青年人才项目 (2017 RC203); 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目 (A314021402-2010)

收稿日期: 2021-05-06; 网络出版日期: 2022-02-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanglm@igsrr.ac.cn

content (SWC), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), were measured in the 0—30 cm soil layers from 24 sites in the eastern Qinghai Province. The environmental factor data which include mean annual temperature (MAT), mean annual precipitation (MAP), average annual evaporation ( $E_a$ ), normalized differential vegetation index (NDVI), altitude (ALT), slope gradient (SG), surface roughness (SR), longitude (LON), latitude (LAT) were extracted at the same time using the ArcGIS software, in order to analyze the distribution characteristics and controls of soil nutrient stoichiometry under three land use types (farmland, forestland and grassland). The results showed that the content of SOC and TN in the farmland was significantly lower than that in the forestland and grassland, while the content of TP and AP showed an opposite trend compared with SOC and TN; there was no significant difference in AN content among the farmland, forestland and grassland. C:N (the average value is 19.93, the coefficient of variance is lower than 16%) and AN:AP (the average value is 2.73, the coefficient of variance is lower than 71%) in different soil layers of farmland, forestland and grassland remained relatively stable and exhibited no significant differences ( $P>0.05$ ), while C:P and N:P of the farmland (the average value is 19.27 and 0.99, respectively) were significantly lower than those of forestland (the average value is 84.88 and 4.12, respectively) and grassland (the average value is 75.26 and 3.87, respectively), indicating that there was a lack of nitrogen in the soils of farmland. Redundancy analysis showed that different environmental factors and soil properties had different contributions to the soil nutrient stoichiometry ratio. The contributions of environment factors that had significant impacts on soil nutrient stoichiometric followed the order of MAT (38.3%),  $E_a$  (34.9%), ALT (32.6%), MAP (30.2%), LAT (24.2%) and NDVI (17.9%); the contributions of soil properties followed the order of TN (60.3%), SOC (59.2%), BD (56.4%),  $P_s$  (55.6%),  $C_s$  (39.3%), SWC (36.3%), AP (23.6%), pH (22.8%), TP (12.0%) and AN (9.9%). Increasing the fertilizer application of limiting elements and planting nitrogen-fixing plants could alleviate the phenomenon of nitrogen deficiency in alpine mountainous areas.

**Key Words:** alpine region; land use type; stoichiometric characteristics; soil nutrients; influencing factors

土壤作为陆地生态系统中最大的营养元素库,是陆地生命系统重要的物质和能量来源。土壤中 C、N、P 等营养元素在迁移和转化过程中往往伴随耦合现象<sup>[1]</sup>,因此研究不同养分化学计量比对揭示土壤-植物相互作用及元素生物地球化学循环具有重要意义。青藏高原作为“地球第三极”和“亚洲水塔”,是中国乃至亚洲重要的生态屏障,同时也是我国典型的生态脆弱区。该区域生态系统结构简单,抗逆性差,土壤冻融交替频繁<sup>[2]</sup>。随着全球气候变暖,加之人为因素的剧烈干扰,该区土壤环境持续恶化<sup>[3]</sup>,养分流失严重<sup>[4]</sup>,地力衰退明显<sup>[3,5]</sup>,严重威胁高寒生态系统安全及区域可持续发展。因此,了解高寒地区不同土地利用类型下土壤养分化学计量特征及其影响因素可为评估该区脆弱生态系统土壤质量和功能提供参数。

近年来,许多学者在青藏高原地区开展土壤养分含量分布特征及其影响因素研究,并取得了重要进展。Bing<sup>[6]</sup>等在青藏高原东部研究发现土壤 C:P 和 N:P 随土层深度的增加而减小,Yang<sup>[7]</sup>等的研究结果显示高寒草地不同深度土壤中 SOC:TN 相对稳定,Feng<sup>[8]</sup>等认为青藏高原东部土壤 TC(全碳,包括无机碳):TN、TC:TP、TN:TP 均随土层深度的增加显著减小。降雨量、温度<sup>[6,9]</sup>等气候因素以及土壤 pH、容重、含水量、孔隙度等土壤性质<sup>[8,10]</sup>均会直接影响高寒地区土壤养分化学计量比,而海拔<sup>[6]</sup>、经纬度<sup>[8]</sup>可通过影响区域水热条件间接影响土壤养分化学计量比时空分布特征。此外,不同学者指出植被类型及种植年限不同,养分吸收量和凋落物归还量具有显著差异,从而影响土壤养分生态化学计量比<sup>[10-11]</sup>。除了自然因素的影响,高寒地区人为活动干扰(开垦和放牧、禁牧等)对土壤养分状况和化学计量比的影响近年来也受到了关注。研究表明,开垦和放牧会导致表层土壤养分含量快速下降,而禁牧有利于遏制草原土壤退化,且随着禁牧时间的增加土壤养分含量逐渐增加<sup>[12]</sup>。然而,Mipam<sup>[13]</sup>等却认为中度及以下放牧活动对土壤养分及相应的化学计量比并无显著影响。也有学者指出由于气候变化和人类活动引起草地严重退化会对土壤养分化学计量比产生重要

影响<sup>[14-15]</sup>。

综上所述,目前关于青藏高原土壤养分化学计量比的研究主要是针对高寒林地或草地,而对不同土地利用类型下土壤养分含量与化学计量比分布特征及其影响因素的对比研究较少。基于此,本文选取青海省东部农、林、草地不同土层深度(0—10、10—20、20—30 cm)土壤为研究对象,通过测定土壤基本理化性质(pH、容重(bulk density, BD)、孔隙度(porosity,  $P_s$ )、粘粒含量(clay content,  $C_y$ )、土壤含水量(soil water content, SWC)、总有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、速效氮(available nitrogen, AN)、速效磷(available phosphorus, AP)),并提取各样点环境因子(年均温(mean annual temperature, MAT)、年均降雨量(mean annual precipitation, MAP)、年均蒸发量(average annual evaporation,  $E_a$ )、植被归一化指数(normalized differential vegetation index, NDVI)、海拔(altitude, ALT)、坡度(slope gradient, SG)、地表粗糙度(surface roughness, SR)、经度(longitude, LON)、纬度(latitude, LAT)),分析了不同土地利用类型下土壤养分化学计量比分布特征及其影响因素,以期高寒地区脆弱生态系统土壤养分管理和调控提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究选取青海省东部4个自治州(市)12个县为研究区域(32°52'N—36°13'N, 98°23'E—102°29'E)(图1)。该区域位于黄土高原向青藏高原过渡的镶嵌地带,地势西北高、东南低,具有高山、盆地、丘陵、平原、河谷等多种地貌类型。这一地区地处西风带,受季风影响空气干燥度适中,其水汽湿度位于西风低湿度区(昆仑山地、祁连山及阿尔金山等地)和季风高湿度区(藏东藏南地区及东喜马拉雅北麓地区)之间<sup>[16]</sup>,年均气温-9.2—7.5℃,年降水量200—400 mm,年蒸发量396—1098 mm。由于受高寒气候的影响,该地土壤类型主要包括灰钙土、栗钙土、黑钙土、灰褐土和草甸土,发育时间较短,风化强度和物质迁移较弱,普遍具有薄层性和粗骨性等特点<sup>[17]</sup>。

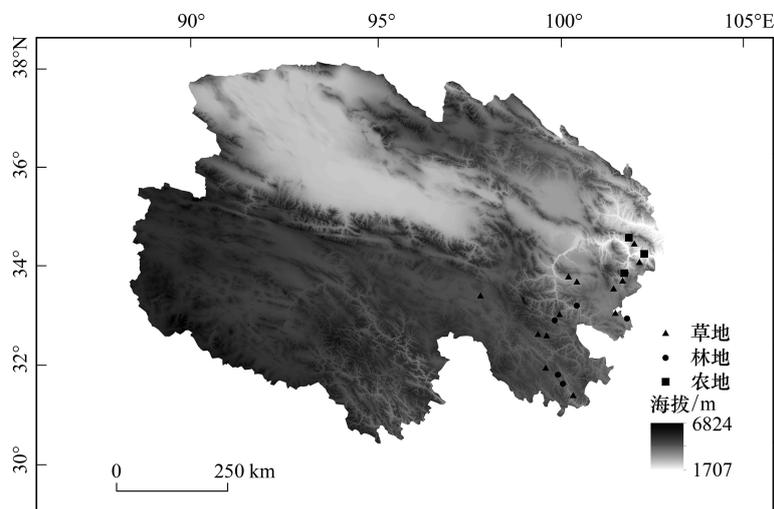


图1 青海省东部不同土地利用类型土壤样点分布图

Fig.1 Distribution of sample sites in eastern Qinghai Province of different land use types

### 1.2 样品采集与分析

2019年8月在青海省东部选取不同土地利用类型下(农、林、草地)24个采样点,分别位于海东市(6个)、黄南藏族自治州(6个)、海南藏族自治州(3个)和果洛藏族自治州(3个)。在每个样点分别采集0—10 cm、10—20 cm和20—30 cm原状土和扰动土样品,每个样点取3次重复,共采集原状土和扰动土各216个。将采

回的扰动土置于阴凉干燥处风干,去除植物残体,研磨过筛(2 mm, 1 mm 和 0.25 mm)备用。

原状土通过环刀法采集,采用恒定水头法测定土壤含水量、总孔隙度和土壤容重,测定方法参照《森林土壤水分-物理性质的测定》(LY/T 1215—1999)<sup>[18]</sup>。其余指标使用扰动土测定。采用浸提电位法测定土壤 pH (水土比 2.5:1),采用 MS-2000 激光粒度仪测定土壤机械组成,采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质,采用凯氏定氮法测定土壤全氮,采用酸熔-钼锑抗比色法测定土壤全磷,采用碱解扩散法测定土壤速效氮,采用碳酸氢钠提取法测定土壤速效磷,方法参照《土壤农化分析》<sup>[19]</sup>。

### 1.3 数据处理

用软件 ArcGIS 10.6 提取采样点环境数据(年均温 MAP、年均降雨量 MAP、年均蒸发量  $E_a$ 、植被归一化指数 NDVI、坡度 SG 和地表粗糙度 SR);海拔 ALT、经度 LON 和纬度 LAT 通过 GPS (Garmin eTrex 221x) 记录。气候数据来自中国气象数据共享网,NDVI 来自 MODIS NDVI 数据 MOD13Q1,地形数据基于 SRTM DEM 数据计算得到。采用软件 SPSS 25.0 和 Origin 2017 分别对数据进行描述性统计分析、Pearson 相关性分析和相应图表绘制,同时,分别对同一土地利用类型,不同土层深度及同一土层深度,不同土地利用类型土壤性质及土壤养分化学计量比进行了单因素方差分析,并采用邓肯检验法进行多重比较。显著性检验的标准为 0.05。采用 Canoco 5.0 软件对土壤基本理化性质、环境因子与土壤化学计量比之间的关系进行冗余分析并绘制图像。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用类型下土壤基本理化性质

如图 2 所示,农地土壤容重  $B_D$  平均值为  $1.46 \text{ g/cm}^3$ ,显著高于林地( $1.12 \text{ g/cm}^3$ )和草地( $1.16 \text{ g/cm}^3$ ),分别高出 23.29%和 20.55%,而农地总孔隙度  $P_s$  平均值(44.44%)却显著低于林地(总孔隙度  $P_s$  均值 56.58%)和草地(总孔隙度  $P_s$  均值 54.00%)。林、草植物根系活动及枯枝落叶的腐解有利于改善土壤结构,增加土壤孔隙度。土壤含水量 SWC 平均值表现为林地( $0.39 \text{ g/g}$ )>草地( $0.33 \text{ g/g}$ )>农地( $0.21 \text{ g/g}$ ),其中农地和林地间存在显著差异( $P<0.05$ ),这是因为林地具有较高的冠层郁闭度,有效减少了水分蒸发,有利于土壤水分涵养<sup>[20]</sup>。农地土壤 pH 平均值(8.75)显著高于林地(7.49)和草地(7.91) ( $P<0.05$ ),这与我国南方农地土壤普遍出现酸化不同<sup>[21]</sup>。干旱半干旱地区农业开垦导致农地水分蒸发强烈,使得盐分在地表聚集,这可能是该区农地土壤 pH 增加的原因。农、林、草地土壤粘粒含量  $C_y$  平均含量(27.33%、22.41%、18.63%)依次降低,这可能与研究区农地接受河流冲积物和灌溉有关<sup>[22]</sup>,从而导致农地土壤粘粒含量  $C_y$  显著高于高寒草地( $P<0.05$ )。

农地土壤总孔隙度 SOC 与全氮 TN 平均含量( $20.90 \text{ g/kg}$ 、 $1.08 \text{ g/kg}$ )均显著低于林地( $71.91 \text{ g/kg}$ 、 $3.49 \text{ g/kg}$ )和草地( $55.11 \text{ g/kg}$ 、 $2.81 \text{ g/kg}$ ) ( $P<0.05$ ),其中总有机碳 SOC 平均含量与林地和草地相比分别降低 70.94%和 62.08%,全氮 TN 含量分别降低 69.05%和 61.57%。相反,农地土壤速效氮 AN 平均含量( $22.88 \text{ mg/kg}$ )却略高于林地( $17.69 \text{ mg/kg}$ )和草地( $19.35 \text{ mg/kg}$ ),但不同利用类型下速效氮 AN 含量差异不显著(图 2)。研究表明,作物吸收和收获可以加速土壤中碳、氮等养分的周转和消耗,从而导致农地土壤总有机碳 SOC 和全氮 TN 含量显著低于林地和草地<sup>[23]</sup>。农地土壤全磷 TP 与速效磷 AP 平均含量分别为  $1.30 \text{ g/kg}$  和  $26.04 \text{ mg/kg}$ ,均显著高于林地( $0.83 \text{ g/kg}$ 、 $5.22 \text{ mg/kg}$ )和草地( $0.73 \text{ g/kg}$ 、 $6.99 \text{ mg/kg}$ ) ( $P<0.05$ ),这是由于作物对碳、氮的吸收率显著高于磷,加之氨挥发会造成土壤中氮素损失。

### 2.2 不同土地利用类型土壤养分化学计量比描述性统计分析

如表 1 所示,农、林、草地 0—30 cm 土壤 C:N 变化范围分别为 15.72—21.92、17.87—23.71、12.90—30.34,平均值分别为 19.23、20.66、19.90,变异系数分别为 12%—13%、6%—10%、14%—23%。由于土壤中碳、氮元素循环相互耦合,且影响机制相似,因此不同土地利用类型或不同深度土壤 C:N 均无显著差异,这与陶冶<sup>[24]</sup>等的研究结果一致。研究区草地土壤中的 C:N 显著高于 Yang<sup>[7]</sup>等在高寒草地的研究,这可能与该地区广泛分布有较厚的草毡层,有机质含量较高有关。农、林、草地 0—30 cm 土壤 C:P 变化范围分别为 7.02—28.16、

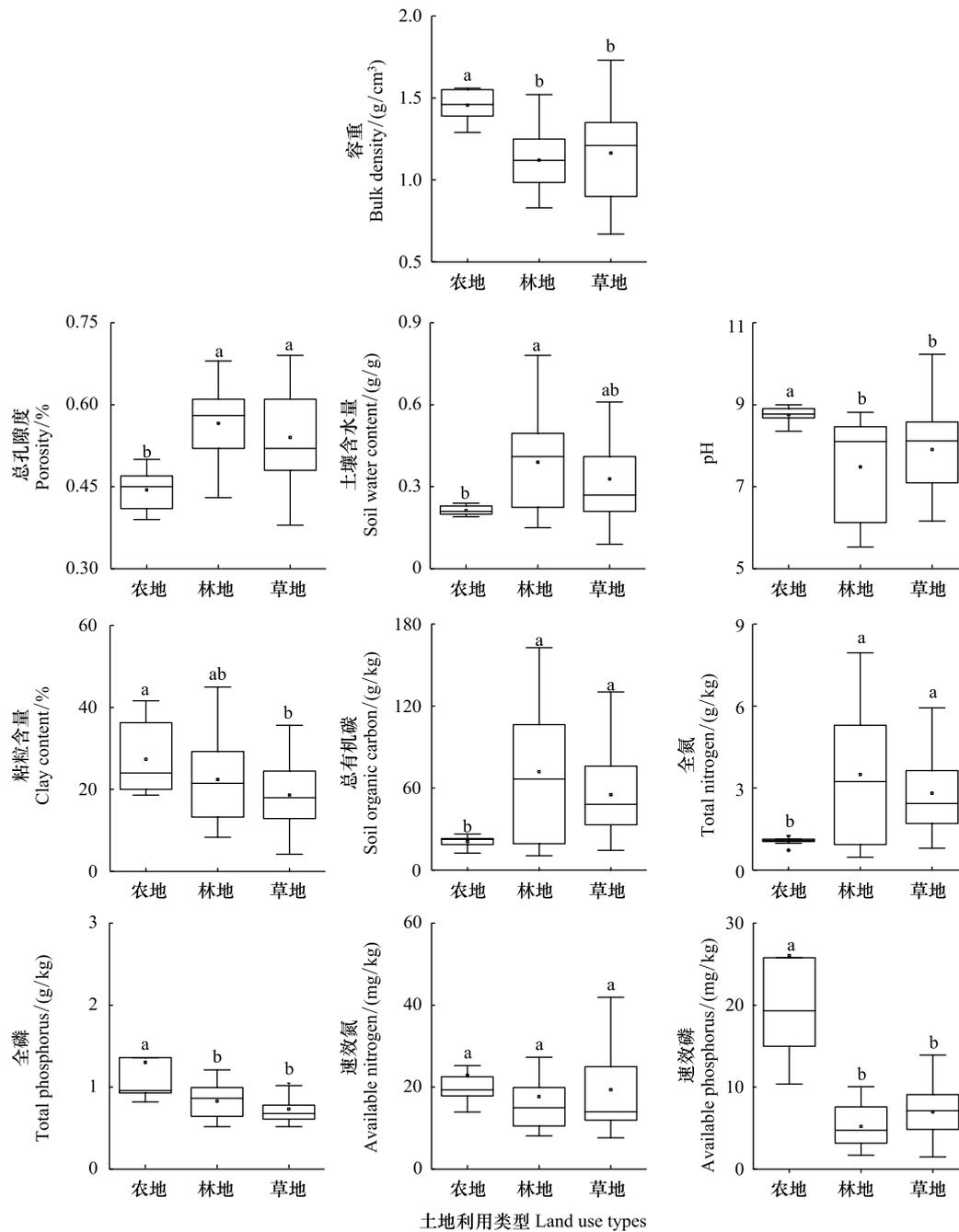


图2 不同土地利用类型下土壤基本理化性质

Fig.2 Box diagram of soil basic properties under different land use types

图中不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著 ( $P < 0.05$ )

11.85—165.08、24.91—173.68, 平均值分别为 19.72、84.88、75.26, 变异系数分别为 50%—55%、54%—63%、48%—57%; N:P 变化范围分别为 0.42—1.34、0.62—7.79、1.29—9.28, 平均值分别为 0.99、4.12、3.87, 变异系数分别为 42%—48%、54%—63%、48%—57%。农地土壤 C:P 和 N:P 均显著低于林地和草地 ( $P < 0.05$ ) (表 1), 除草地 0—10 cm 土壤 C:P 和 N:P 显著高于 0—20 cm 或 20—30 cm 外, 农地和林地不同深度土层间 C:P、N:P 均无显著差异 (表 1)。农、林、草地土壤 AN:AP 变化范围分别为 0.54—2.17、1.05—6.84、0.87—13.21, 平均值分别为 1.10、3.60、3.49, 变异系数分别为 38%—42%、31%—41%、57%—98%, 不同土地利用类型或不同深度土壤 AN:AP 均无显著差异 (表 1)。

表 1 不同土地利用类型土壤养分化学计量比描述性统计分析表

Table 1 Descriptive statistical analysis table of soil nutrient stoichiometry of different land use types

	土地利用类型 Land use type	土层深度/cm Soil depth	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation
C:N	农地	0—10	21.26	16.61	19.40 Aa	2.46	13
		10—20	19.61	15.72	18.23 Aa	2.18	12
		20—30	21.92	17.18	20.05 Aa	2.53	13
	林地	0—10	22.37	18.87	20.57 Aa	1.17	6
		10—20	23.71	17.87	20.80 Aa	2.07	10
		20—30	23.15	19.05	20.60 Aa	1.25	6
	草地	0—10	30.24	12.90	20.66 Aa	4.76	23
		10—20	30.34	13.71	19.89 Aa	3.91	20
		20—30	25.13	14.86	19.14 Aa	2.63	14
C:P	农地	0—10	25.89	7.02	18.97 Ba	10.39	55
		10—20	25.34	7.14	18.76 Ba	10.10	54
		20—30	28.16	9.18	21.43 Ba	10.63	50
	林地	0—10	165.08	16.88	93.06 Aa	58.92	63
		10—20	132.64	12.46	84.98 Aa	46.55	55
		20—30	120.32	11.85	76.61 Aa	41.35	54
	草地	0—10	163.00	27.68	92.65 Aa	44.12	48
		10—20	173.68	25.76	76.15 Aab	40.66	53
		20—30	144.32	24.91	56.98 ABb	32.74	57
N:P	农地	0—10	1.27	0.42	0.94 Ba	0.46	48
		10—20	1.31	0.45	0.99 Ba	0.47	47
		20—30	1.34	0.53	1.03 Ba	0.44	42
	林地	0—10	7.79	0.79	4.53 Aa	2.85	63
		10—20	6.50	0.70	4.10 Aa	2.31	56
		20—30	5.63	0.62	3.74 Aa	2.02	54
	草地	0—10	9.12	1.50	4.65 Aa	2.35	51
		10—20	9.28	1.40	3.97 Aa	2.32	58
		20—30	6.72	1.29	3.00 Aab	1.64	55
AN:AP	农地	0—10	1.14	0.54	0.89 Aa	0.31	38
		10—20	1.29	0.57	0.91 Aa	0.36	40
		20—30	2.17	0.91	1.51 Aa	0.63	42
	林地	0—10	6.84	2.20	3.86 Aa	1.51	39
		10—20	5.34	1.42	3.59 Aa	1.12	31
		20—30	5.62	1.05	3.34 Aa	1.37	41
	草地	0—10	7.82	1.20	3.24 Aa	1.86	57
		10—20	12.07	0.87	3.85 Aa	2.95	77
		20—30	13.21	0.88	3.38 Aa	3.30	98

表中不同小写字母表示同一土地利用类型,不同土层深度之间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一土层深度,不同土地利用类型之间差异显著( $P<0.05$ );C:N:碳:氮, soil organic carbon: total nitrogen; C:P:碳:磷, soil organic carbon: total phosphorus; N:P:氮:磷, total nitrogen: total phosphorus; AN:AP:速效氮:速效磷, available nitrogen: available phosphorus

### 2.3 土壤养分化学计量比与基本理化性质之间的关系

土壤养分化学计量比与基本理化性质相关性分析结果表明,C:N与土壤含水量SWC及总孔隙度 $P_s$ 之间存在显著正相关关系( $P<0.05$ ),而与pH、速效磷AP含量存在显著负相关关系( $P<0.05$ )(表2)。C:P、N:P与pH、容重BD、粘粒含量 $C_y$ 、速效磷AP含量均具有显著负相关关系( $P<0.05$ 或 $P<0.01$ ),而与土壤含水量

SWC、总孔隙度  $P_s$ 、速效氮 AN 含量均具有显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )。同时, N:P 与总孔隙度 SOC、C:P 与全氮 TN 的正相关性也达到显著水平 ( $P < 0.01$ ), 这与青焯<sup>[15]</sup>等在若尔盖高寒湿地的研究结果一致(表 2)。AN:AP 与土壤含水量 SWC、总孔隙度  $P_s$ 、总有机碳 SOC 和全氮 TN 含量显著正相关 ( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ), 与 pH、容重 BD 和粘粒含量  $C_y$  显著负相关 ( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ) (表 2), 由于速效养分受全量养分影响较大, 因此 AN:AP 与土壤基本理化性质的相关性与 N:P 基本一致。

表 2 土壤基本理化性质与化学计量比相关性分析表

Table 2 Correlation of soil basic properties and stoichiometric ratio

	酸碱度 pH	容重 BD	土壤含水量 SWC	粘粒含量 $C_y$	孔隙度 $P_s$	总有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	速效氮 AN	速效磷 AP
C:N	-0.278 *	-0.228	0.296 *	-0.148	0.272 *	—	—	-0.145	-0.193	-0.285 *
C:P	-0.475 **	-0.871 **	0.714 **	-0.617 **	0.845 **	—	0.892 **	—	0.426 **	-0.317 **
N:P	-0.391 **	-0.824 **	0.603 **	-0.635 **	0.777 **	0.844 **	—	—	0.481 **	-0.282 *
AN:AP	-0.343 **	-0.297 *	0.301 *	-0.343 **	0.300 *	0.321 **	0.313 **	-0.122	—	—

\*\* 在 0.01 的水平上相关性显著。\* 在 0.05 的水平上相关性显著; “—” 表示存在自相关关系, 不进行相关分析; SOC: 总有机碳, soil organic carbon; TN: 全氮, total nitrogen; TP: 全磷, total phosphorus; AN: 速效氮, available nitrogen; AP: 速效磷, available phosphorus; BD: 容重, bulk density; SWC: 土壤含水量, soil water content;  $C_y$ : 粘粒含量, clay content;  $P_s$ : 孔隙度, porosity

通过冗余分析(RDA)对3种土地利用类型下土壤养分化学计量比与基本理化性质之间的关系进行分析可知,土壤化学计量比在第 I、II 排序轴的解释量分别为 79.11% 和 10.08%, 前两轴对于土壤养分化学计量比的累计解释量达 89.19% (图 3)。同时, 前两轴对于土壤养分化学计量比和土壤基本理化性质关系的累计解释量达到 97.66%, 表明排序结果较好。通过对第 I 轴 ( $F = 231, P = 0.002$ ) 和所有轴 ( $F = 64.2, P = 0.002$ ) 进行置换检验可知, 排序结果可靠。根据图 3 中夹角和箭头的大小显示, 土壤养分化学计量比与速效氮 AN、土壤含水量 SWC、总有机碳 SOC、总孔隙度  $P_s$ 、全氮 TN 呈正比, 与容重 BD、全磷 TP、粘粒含量  $C_y$ 、pH、速效磷 AP 呈反比, 全氮 TN、总有机碳 SOC、容重 BD 和总孔隙度  $P_s$  对于土壤养分化学计量比的解释量更高。蒙特卡罗 (Monte Carlo) 检验结果进一步表明不同性质对土壤养分化学计量比的重要性不同(表 3), 全氮 TN、总有机碳 SOC、容重 BD、总孔隙度  $P_s$ 、粘粒含量  $C_y$ 、土壤含水量 SWC、速效磷 AP、pH、全磷 TP 和速效氮 AN 的重要性依次降低, 解释量分别为 60.3%、59.2%、56.4%、55.6%、39.3%、36.3%、23.6%、22.8%、12.0% 和 9.9%。

表 3 土壤基本理化性质对养分化学计量比重要性排序表

Table 3 Importance ranking of soil properties

土壤性质 Soil properties	土壤性质 所占解释量 Explains rate/%	F	P	土壤性质 Soil properties	土壤性质 所占解释量 Explains rate/%	F	P
全氮 TN	60.3	106	0.002	土壤含水量 SWC	36.3	39.9	0.002
总有机碳 SOC	59.2	101	0.002	速效磷 AP	23.6	21.6	0.002
容重 BD	56.4	90.7	0.002	酸碱度 pH	22.8	20.7	0.002
总孔隙度 $P_s$	55.6	87.7	0.002	全磷 TP	12.0	9.6	0.002
粘粒含量 $C_y$	39.3	45.3	0.002	速效氮 AN	9.9	7.7	0.004

## 2.4 土壤养分化学计量比与环境因子之间的关系

从表 4 可以看出, 相较于地形和植被因子而言, 气候因子(年均蒸发量  $E_a$ 、年均降水量 MAP、年均温度 MAT)对土壤养分化学计量比的影响更大。其中, 年均蒸发量  $E_a$ 、年均温度 MAT 与 N:P、C:P 均存在显著负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 这与董正武<sup>[25]</sup>等在古尔班通古特沙漠的研究结果一致。而 MAP 与 N:P、C:P 均存在显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 年均蒸发量  $E_a$  还与 C:N 存在显著负相关关系 ( $P < 0.05$ )。此外, 纬度 LAT、海拔 ALT 与土壤 C:P 相关性显著 ( $P < 0.05$ ), 而海拔 ALT 还与 N:P 存在显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。经度 LON、地表粗糙度 SR、坡度 SG、植被指数 NDVI 与土壤养分化学计量比之间的相关性均不显著 ( $P > 0.05$ )。

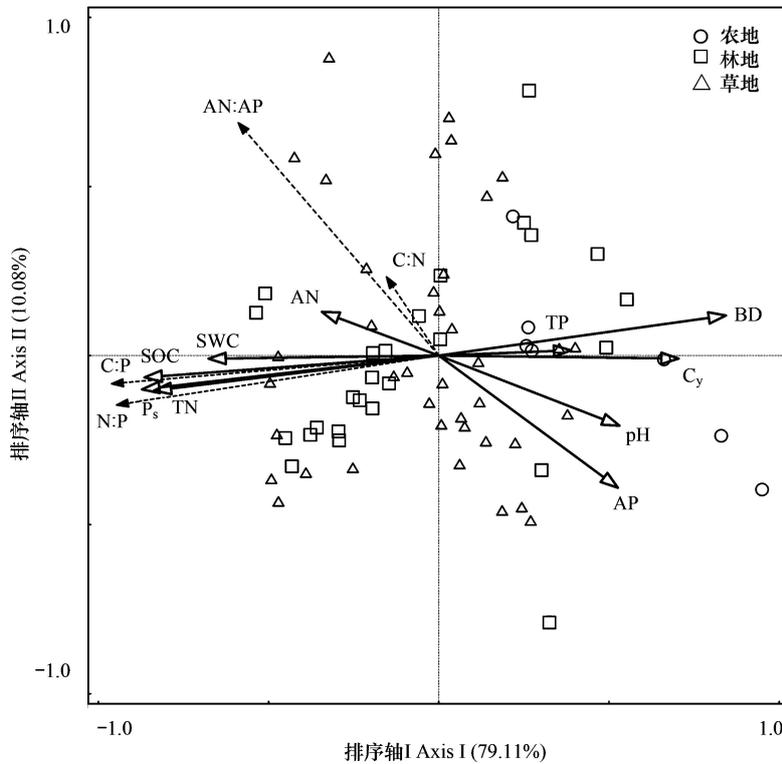


图3 土壤养分化学计量比和基本理化性质冗余分析(RDA)排序结果

Fig.3 The redundancy analysis (RDA) ranking results of Soil nutrient stoichiometry and basic properties

C:N:碳:氮, soil organic carbon; total nitrogen; C:P:碳:磷, soil organic carbon; total phosphorus; N:P:氮:磷, total nitrogen: total phosphorus; AN:AP:速效氮:速效磷, available nitrogen: available phosphorus; SOC:总有机碳, soil organic carbon; TN:全氮, total nitrogen; TP:全磷, total phosphorus; AN:速效氮, available nitrogen; AP:速效磷, available phosphorus; BD:容重, bulk density; SWC:土壤含水量, soil water content; C<sub>y</sub>:粘粒含量, clay content; P<sub>s</sub>:孔隙度, porosity; pH:酸碱度

表4 环境因子与化学计量比相关性分析表

Table 4 Correlation of environmental factors and stoichiometric ratio

	纬度 LAT	经度 LON	海拔 ALT	地表粗糙度 SR	坡度 SG	植被指数 NDVI	年均蒸发量 E <sub>a</sub>	年均降水量 MAP	年均温度 MAT
C:N	-0.350	-0.207	0.375	0.030	0.176	0.218	-0.442*	0.363	-0.367
C:P	-0.448*	-0.297	0.496*	-0.041	-0.070	0.374	-0.520**	0.522**	-0.537**
N:P	-0.366	-0.279	0.431*	-0.033	-0.117	0.333	-0.438*	0.433*	-0.479*
AN:AP	-0.292	-0.315	0.324	-0.221	-0.168	0.010	-0.381	0.192	-0.358

\*\* 在 0.01 的水平上相关性显著。\* 在 0.05 的水平上相关性显著。所用数据为三层土壤(0—10、10—20、20—30 cm)平均值。LAT:纬度, latitude; LON:经度, longitude; ALT:海拔, altitude; SR:地表粗糙度, surface roughness; SG:坡度, slope gradient; NDVI:植被指数, normalized differential vegetation index; E<sub>a</sub>:年均蒸发量, average annual evaporation; MAP:年均降水量, mean annual precipitation; MAT:年均温度, annual mean air temperature

对土壤养分化学计量比与环境因子之间的关系进行 RDA 分析表明,第 I 轴和第 II 轴对于土壤养分化学计量比的解释量分别为 64.95% 和 5.47%,前两轴对于土壤养分化学计量比和环境因子之间关系的累计解释量达 99.29%。同时,对第 I 轴( $F=25.9, P=0.004$ )和所有轴( $F=3.8, P=0.004$ )进行置换检验的  $P$  值均小于 0.01,说明排序结果可靠且良好。由化学计量比和环境因子的 RDA 排序图(图 4)可知,土壤养分化学计量比与海拔 ALT、年均降水量 MAP 及植被指数 NDVI 呈正比,与年均温度 MAT、年均蒸发量 E<sub>a</sub>、经度 LON、纬度 LAT 呈反比,且年均温度 MAT 与年均蒸发量 E<sub>a</sub> 对于土壤养分化学计量比的总体解释量更高,是影响土壤养分化学计量比的主要环境因子。蒙特卡洛(Monte Carlo)检验结果进一步表明不同环境因子对土壤养分化学

计量比的重要性不同,其中年均温度 MAT 对土壤养分化学计量比的重要性最高,与李丹维等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。对土壤养分化学计量比影响显著的环境因子包括年均温度 MAT、年均蒸发量  $E_a$ 、海拔 ALT、年均降水量 MAP、纬度 LAT 及植被指数 NDVI,其解释量分别为 38.3%、34.9%、32.6%、30.2%、24.2%和 17.9%(表 5)。

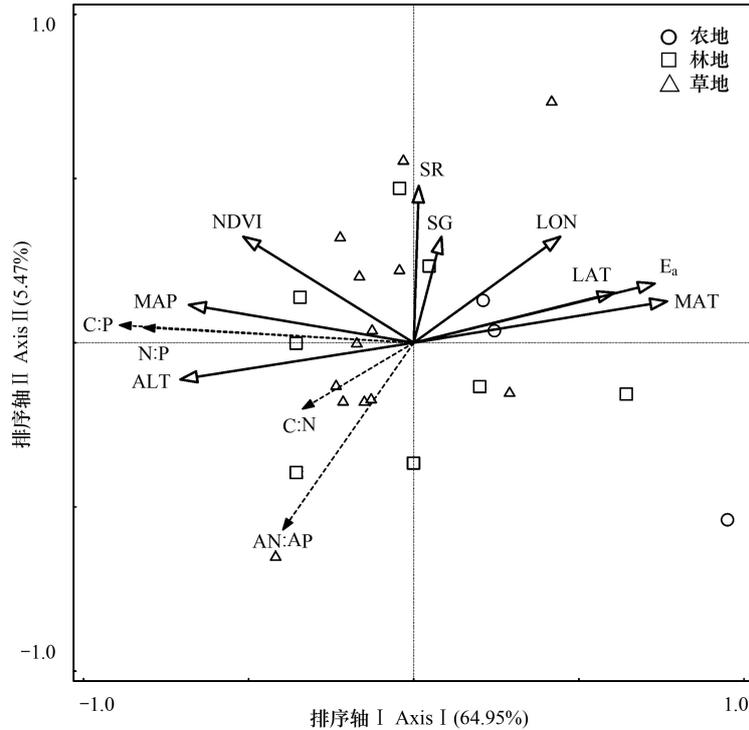


图 4 土壤化学计量比与环境因子冗余分析(RDA)排序结果

Fig.4 The redundancy analysis (RDA) ranking results of Soil nutrient stoichiometry and environmental factors

数据为三层土壤(0—10、10—20、20—30 cm)平均值,LAT:纬度, latitude;LON:经度, longitude;ALT:海拔, altitude;SR:地表粗糙度, surface roughness;SG:坡度, slope gradient;NDVI:植被指数, normalized differential vegetation index; $E_a$ :年均蒸发量, average annual evaporation;MAP:年均降水量, mean annual precipitation;MAT:年均温度, annual mean air temperature

表 5 环境因子对化学计量比重要性排序表

Table 5 Importance equencing of environmental factors

环境因子 Environmental factors	环境因子所占解释量 Explains rate/%	<i>F</i>	<i>P</i>	环境因子 Environmental factors	环境因子所占解释量 Explains rate/%	<i>F</i>	<i>P</i>
年均温度 MAT	38.3	13.7	0.002	年均降水量 MAP	30.2	9.5	0.002
年均蒸发量 $E_a$	34.9	11.8	0.002	纬度 LAT	24.2	7.0	0.012
海拔 ALT	32.6	10.6	0.002	植被指数 NDVI	17.9	4.8	0.024

### 3 讨论

#### 3.1 不同土地利用类型中土壤 C、N、P 化学计量特征

土壤养分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。本研究结果显示,青海省东部农、林、草地土壤 C:N 变化范围分别为 19.4—20.05、20.57—20.8、19.14—20.66,均高于全国平均水平(10—12)<sup>[27]</sup>。C:N 是体现土壤质量的敏感指标,其大小与土壤有机质的分解速率呈反比<sup>[27]</sup>。较高的 C:N 表明该地区有机质的矿化过程较慢,这可能与高寒地区低温少雨的气候环境有关。不同土地利用类型或不同深度土壤 C:N 均无显著差异( $P>0.05$ ),表明土壤 C:N 在不同环境条件和利用方式下基本稳定,这与 Bui<sup>[28]</sup>

等在澳大利亚的研究结果一致。

土壤 C:P 是表征土壤中磷矿化能力的重要指标<sup>[29]</sup>,而 N:P 则显示土壤氮、磷可利用性水平<sup>[30]</sup>。农地土壤 C:P 变化范围为 18.76—21.43,低于全国平均值(52.7)<sup>[31]</sup>,而林、草地土壤 C:P 变化范围分别为 76.61—93.06 和 56.98—92.65,高于全国平均值(52.7)<sup>[31]</sup>,此外,农地土壤速效磷 AP 平均含量为 26.04 mg/kg,依据全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[32]</sup>属于第二级(20—40 mg/kg),而林、草地土壤中速效磷 AP 平均含量分别为 5.22 mg/kg 和 6.99 mg/kg,均属于较低等级的第四级(5—10 mg/kg),因此该地区林、草地土壤中磷素供给能力和有效性较低,而农地则相反,这可能与农地中磷肥的施用有关。作物对碳、氮的吸收率显著高于磷,加之氮挥发会造成土壤中氮素损失,因此即使农地同时施用氮肥和磷肥,仅导致磷含量的增加<sup>[33]</sup>,这与高君亮等在阴山北麓农牧交错带的研究结果一致<sup>[34]</sup>。农、林、草地土壤 N:P 变化范围分别为 0.94—1.03、3.74—4.53、3.00—4.65,其中农地土壤 N:P 远低于全国平均值(3.9)<sup>[35]</sup>,加之农地土壤中全氮 TN 含量平均值(1.08 g/kg)低于全国平均土壤氮含量(1.88 g/kg)<sup>[31]</sup>,因此该地区农地土壤中可能存在一定程度的氮缺乏现象。Reich<sup>[36]</sup>等认为氮是高纬度、高海拔地区土壤养分限制因子,适当增加氮肥施用量,可以有效缓解氮沉降较低的高寒地区农地土壤缺氮现象。

林地和草地土壤 C:P、N:P 均随土层深度增加而减小,这主要是由于磷主要来源于矿物风化,不同深度土层磷含量接近,而碳、氮由于地表枯落物腐解和沉降输入主要在表层土壤中富集,因此林地和草地 0—10 cm 土壤 C:P、N:P 显著高于 20—30 cm 土壤(表 1),这与吴雨晴等<sup>[5]</sup>研究发现高寒草地土壤 C:P、N:P 均随土层深度的增加显著下降这一结果相一致。然而,农地不同深度土层 C:P、N:P 均无显著差异,表明人为干扰(施肥和灌溉)影响土壤中养分转化和平衡关系<sup>[37]</sup>。

土壤养分全量反应土壤供给养分的能力,而速效养分则反应养分供给的强度<sup>[38]</sup>。因此,相较于 N:P 而言,AN:AP 能够更加准确的反应土壤养分供应水平<sup>[39]</sup>。农、林、草三种土地利用类型中,土壤 N:P(0.94—1.03、3.74—4.53、3.00—4.65)与 AN:AP(0.81—1.51、3.34—3.86、3.24—3.85)均相近,表明该地区土壤氮、磷元素转化利用速率相近。但与前人研究相比,青海省东部高寒地区土壤 AN:AP(0.81—3.85)仍显著小于古尔班通古特沙漠<sup>[39]</sup>等土壤氮极缺、有机质分解矿化速率较低地区的土壤 AN:AP(4.75—6.99)。同时,依据全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[32]</sup>,农、林、草地土壤速效磷 AN 含量(22.88 mg/kg, 17.69 mg/kg, 19.35 mg/kg)均属于最低等级第 6 级(<30 mg/kg),而土壤全氮 TN 含量除农地(1.08 g/kg)属于第 3 级(1—1.5 g/kg)外,林地(3.49 g/kg)和草地(2.81 g/kg)均属于第 1 级(>2 g/kg),表明该地区林地和草地全氮 TN 虽储量丰富,但其矿化速率较慢,因此同农地一样,表现为氮有效性极低,这可能是由于该地高寒气候抑制了土壤微生物及酶活性,使得丰富的凋落物虽在地表聚集却难以分解,造成了土壤中氮元素富集但速效氮 AN 含量极低的结果。

### 3.2 土壤养分化学计量特征的影响因素及其指示意义

土壤养分化学计量比受成土作用、水热条件和人为活动等多种因素影响,空间异质性强<sup>[15]</sup>。明确不同因素对化学计量比的贡献率,可为土壤养分合理管理和调控提供依据。根据冗余分析结果显示,对土壤养分化学计量比影响较大的环境因子和土壤性质有:年均温度 MAT、年均蒸发量  $E_a$ 、海拔 ALT、年均降水量 MAP、纬度 LAT、植被指数 NDVI 及全氮 TN、总有机碳 SOC、容重 BD、总孔隙度  $P_s$ 、粘粒含量  $C_v$ 、土壤含水量 SWC。这其中,年均蒸发量  $E_a$  的变化主要取决于温度及土壤质地,海拔 ALT 对于土壤养分化学计量比的影响主要是通过改变土壤的水热条件和植被生长状况实现的,而纬度 LAT 可以通过改变不同地区降雨量和温度对土壤养分化学计量比产生影响,因此,这三种环境因子可以被归纳进其他影响因素中,影响土壤养分化学计量比的因素主要包括:年均温度 MAT、年均降水量 MAP、植被指数 NDVI、全氮 TN、总有机碳 SOC、容重 BD、总孔隙度  $P_s$ 、粘粒含量  $C_v$ 、土壤含水量 SWC。

近年来全球气候变暖已成为生态学热点问题。增温对于土壤养分化学计量比的影响效果较为复杂,其在一定程度上削弱了长期以来低温对植物生长发育的抑制作用,延长了植被生长时间,能够提高地上植被生长

高度及生物量<sup>[40]</sup>。同时,温度升高促进了多年冻土融化,使土壤中产生了更多的大孔隙,降低了土壤容重。多年冻土层的下移、破坏甚至消失也将降低土壤水分含量,使得植被根系变得更加发达且趋向于向深层移动,增加了地下生物量<sup>[41]</sup>。然而增温同时也能够提高土壤酶活性,影响土壤微生物的活性和数量,加快地表凋落物及地下根系的腐烂降解,综合来看增温对土壤中碳、氮循环过程产生了促进作用。秦瑞敏<sup>[42]</sup>等人研究发现,短期增温会使土壤碳、氮含量有所减少,但长期增温则有助于碳、氮的积累,贝昭贤<sup>[43]</sup>等人发现增温会降低土壤中磷含量及其有效性。因此,从长时间尺度来看,气候变暖可能会促进土壤中碳、氮的积累并加剧磷损失,进而使该地土壤中的 C:P、N:P 进一步升高。

韩有香<sup>[44]</sup>等根据已有数据预测未来几十年内青藏高原地区降水将持续增多。李博文<sup>[45]</sup>等的研究结果显示,增雨量的增加有利于促进土壤呼吸,使碳元素更多以 CO<sub>2</sub> 形式逸出,表现为土壤中总有机碳含量的减少,同时,增加降雨量还会促进土壤中养分淋溶损失,降低养分含量。但降水量又是影响植被长势的重要因素,充足的水分能够保障植物正常光合作用所需物质和能量的供应<sup>[41]</sup>,还能在一定程度上削弱冻土融化对土壤含水量的影响,促进植被的生长,并有利于缓解降雨对土壤养分的淋失作用。从分析结果来看,年均降雨量与土壤养分化学计量比存在正相关关系,但受其间接影响的粘粒含量、全氮含量及有机碳含量等因素与土壤养分化学计量比之间的相关关系又存在差异。因此,降雨量的增加对土壤养分化学计量比的影响效果有待进一步探究。

综合来看,青海省东部地区农地土壤存在缺氮现象,而林地和草地土壤又受到磷限制,这将影响生态系统可持续发展。在农地中增施氮肥或引种固氮植物等方式将有助于缓解高寒地区农地土壤缺氮现象。在人工草地中增施磷肥并控制草场放牧强度,有利于缓解草地土壤的磷限制。此外,通过施用有机肥或枯落物归还可以有效改良土壤结构,增加土壤孔隙度,提高土壤保水保肥能力,从而维持土壤养分含量及其平衡关系。

#### 4 结论

本研究通过对青海省东部不同土地利用类型下土壤养分化学计量比进行比较分析得到以下结论:

(1) 农地土壤总有机碳 SOC 和全氮 TN 含量显著低于林地和草地,而全磷 TP 和速效磷 AP 含量则相反,农、林、草地速效氮 AN 含量差异不显著。

(2) 农、林、草地不同深度土壤 C:N 较为稳定,而 C:P、N:P 除农地外均随深度增加而出现显著变化。农地土壤 N:P 低于全国平均值,表明研究区农地土壤可能存在一定程度的缺氮现象,不同土地利用类型土壤 AN:AP 均远低于全国平均值和其他氮缺乏地区平均值,表明研究区土壤 N 有效性较低。通过提高限制元素的肥料施用量及引种固氮植物等方式,可缓解高寒地区农地的缺氮现象。

(3) 不同土壤性质与环境因子对土壤养分化学计量比的影响和贡献率不同,环境因子的贡献率由大到小依次为:年均温度 MAT、年均蒸发量 E<sub>a</sub>、海拔 ALT、年均降水量 MAP、纬度 LAT、植被指数 NDVI;土壤性质的贡献率由大到小依次为:全氮 TN、总有机碳 SOC、容重 BD、总孔隙度 P<sub>s</sub>、粘粒含量 C<sub>v</sub>、土壤含水量 SWC、速效磷 AP、pH、全磷 TP、速效氮 AN。年均温度的升高可能会直接或间接的造成土壤磷元素的进一步损失,可通过增施磷肥并降低草地放牧强度等方式缓解这一现象。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘天源,周天财,孙建,王毅,叶冲冲. 青藏高原东缘沙化草甸植物氮磷的分配和耦合特征. 草业科学, 2021, 38(2): 209-220.
- [2] Zhang G F, Nan Z T, Wu X B, Ji H L, Zhao S P. The role of winter warming in permafrost change over the Qinghai-Tibet Plateau. Geophysical Research Letters, 2019, 46(20): 11261-11269.
- [3] 周华坤,赵新全,周立,刘伟,李英年,唐艳鸿. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. 草业学报, 2005, 14(3): 31-40.
- [4] 王一博,王根绪,程玉菲,李元寿. 青藏高原典型寒冻土壤对高寒生态系统变化的响应. 冰川冻土, 2006, 28(5): 633-641.
- [5] 吴雨晴,田赞,周建琴,张克斌. 不同放牧制度草地土壤碳氮磷化学计量特征. 应用与环境生物学报, 2019, 25(4): 801-807.
- [6] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, Sun H Y, Luo J, Wang J P, Yu D. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its

- implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of eastern Tibetan Plateau. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(2): 405-416.
- [ 7 ] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, Ji C J, Ma W H. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(1): 1-24.
- [ 8 ] Feng D F, Bao W K, Pang X Y. Consistent profile pattern and spatial variation of soil C/N/P stoichiometric ratios in the subalpine forests. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(8): 2054-2065.
- [ 9 ] Geng Y, Baumann F, Song C, Zhang M, Shi Y, Kühn P, Scholten T, He J S. Increasing temperature reduces the coupling between available nitrogen and phosphorus in soils of Chinese grasslands. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43524.
- [ 10 ] Qi K B, Pang X Y, Yang B, Bao W K. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry shifts with tree species in subalpine plantations. *PeerJ*, 2020, 8: e9702.
- [ 11 ] 杨文高, 字洪标, 陈科宇, 阿的鲁骥, 胡雷, 王鑫, 王根绪, 王长庭. 青海森林生态系统中灌木层和土壤生态化学计量特征. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 352-364.
- [ 12 ] 许中旗, 闵庆文, 王英舜, 李文华, 许晴. 人为干扰对典型草原生态系统土壤养分状况的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 38-42.
- [ 13 ] Mipam T D, Chen S Y, Liu J Q, Mieke G, Tian L M. Short-term yak-grazing alters plant-soil stoichiometric relations in an alpine meadow on the eastern Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2021, 458(1/2): 125-137.
- [ 14 ] 马源, 李林芝, 张德罡, 肖海龙, 陈建纲. 高寒草甸根际土壤化学计量特征对草地退化的响应. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3039-3048.
- [ 15 ] 青焯, 孙飞达, 李勇, 陈文业, 李昕. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析. *草业学报*, 2015, 24(3): 38-47.
- [ 16 ] 张宇欣, 李育, 朱耿睿. 青藏高原海拔要素对温度、降水和气候型分布格局的影响. *冰川冻土*, 2019, 41(3): 505-515.
- [ 17 ] 鄂崇毅, 张晶, 吴成永, 孙永娟, 孙满平, 闫文亭, 李萍, 吕顺昌, 杨龙. 青海湖流域草甸土光释光年代学研究. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1325-1335.
- [ 18 ] 中华人民共和国国家林业局. LY/T 1215-1999 森林土壤水分——物理性质的测定. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [ 19 ] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-38.
- [ 20 ] 易扬, 信忠保, 覃云斌, 肖玉玲, 赵瑞. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分物理性质研究. *水土保持研究*, 2013, 20(5): 45-49, 56-56.
- [ 21 ] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [ 22 ] 阎丹丹, 鲍玉海, 贺秀斌, 唐强, 钟荣华, 高进长. 三峡水库蓄水后长江干支流及消落带泥沙颗粒特征分析. *水土保持学报*, 2014, 28(04): 289-292+329.
- [ 23 ] Six J, Paustian K, Elliott E T, Combrink C. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [ 24 ] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 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. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [ 25 ] 董正武, 玉米提·哈力克, 李生字, 雷加强, 赵英. 古尔班通古特沙漠西南缘绿柳沙包的土壤化学计量特征. *生态学报*, 2020, 40(20): 7389-7400.
- [ 26 ] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和王祥, 耿增超. 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*, 2017, 54(1): 160-170.
- [ 27 ] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [ 28 ] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [ 29 ] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 李娅芸, 程曼, 安韶山. 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. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 870-879.
- [ 30 ] Zhao F Z, Kang D, Han X H, Yang G H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415-422.
- [ 31 ] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [ 32 ] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术. 北京: 农业出版社, 1992.
- [ 33 ] Ge N N, Wei X R, Wang X, Liu X T, Shao M A, Jia X X, Li X Z, Zhang Q Y. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau. *CATENA*, 2019, 172: 148-157.
- [ 34 ] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 陈晓娜, 段娜. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2019, 39(15): 5594-5602.
- [ 35 ] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.

- [36] Reich P B, Oleksyn J. 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*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [37] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 穆桂金, 杨发相. 绿洲化进程中不同利用强度农田对土壤质量的影响. *生态学报*, 2010, 30(7): 1780-1788.
- [38] 马胜兰, 况福虹, 唐家良, 王艳强, 吴鹏飞, 朱波. 种植模式对川中丘陵石灰性紫色土结构和地力的影响. *土壤学报*, 2021, 58(4): 935-947.
- [39] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 659-665.
- [40] 董世魁, 王学霞, 张勇, 汤琳, 刘世梁. 青藏高原高寒草地植物——土壤系统的生物多样性及其对全球变化的响应. 北京: 科学出版社, 2018: 175-176.
- [41] 苏旭. 青藏高原生物地理与自然保护. 北京: 科学出版社, 2020: 123-133.
- [42] 秦瑞敏, 温静, 张世雄, 杨晓艳, 徐满厚. 模拟增温对青藏高原高寒草甸土壤 C、N、P 化学计量特征的影响. *干旱区研究*, 2020, 37(4): 908-916.
- [43] 贝昭贤, 张秋芳, 郑蔚, 杨柳明, 陈岳民, 杨玉盛. 模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响. *生态学报*, 2018, 38(3): 1106-1113.
- [44] 韩有香, 刘彩红, 李国山. 青海高原典型生态区域未来气候变化趋势预估. *草业科学*, 2019, 36(6): 1518-1530.
- [45] 李博文, 王奇, 吕汪汪, 周阳, 姜丽丽, 刘培培, 孟凡栋, 张立荣, 张苏人, 阿旺, 李耀明, 斯确多吉, 汪诗平. 增温增水对草地生态系统碳循环关键过程的影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1668-1679.