土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202404270171 **CSTR: 32215.14.trxb202404270171**

杜媛媛，赵雯，黄来明. 西藏东部农林草地土壤养分化学计量比及影响因素[J]. 土壤学报, 2025,
DU Yuanyuan, ZHAO Wen, HUANG Laiming. Stoichiometric Ratio and Influencing Factors of Soil Nutrients Under Farmland, Forestland, and Grassland in Eastern Xizang Autonomous Region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

西藏东部农林草地土壤养分化学计量比及影响因素*

杜媛媛[1]，赵 雯[1, 2]，黄来明[1, 2, 3†]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所现代农业工程实验室, 北京 100101；2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049；3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室，北京 100085)

摘 要：探讨高寒区域不同土地利用类型下土壤养分化学计量比及其驱动因素，旨在为脆弱生态系统的养分科学管理提供理论支撑。选取西藏东部三种土地利用类型（农田、林地和草地），测定不同深度（0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm）土壤基本理化性质，并提取各样点环境因子，分析了西藏东部农、林、草地土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）和碱解氮（AN）、全磷（TP）和有效磷（AP）含量、养分化学计量比（C:N、C:P、N:P 和 AN:AP）及影响因素。结果表明，不同土地利用类型 SOC、TN、AN 含量均无显著差异（$P > 0.05$），而农田 TP 和 AP 含量显著高于林地和草地。农、林、草地不同深度土壤 C:N 均无显著性差异，而草地 10 ~ 20 cm 土壤 AN:AP 显著高于农田和林地，农田 20 ~ 30 cm 土壤 C:P 和 N:P 均显著低于林地和草地，表明农田土壤氮限制更强。冗余分析结果表明，SOC、TN、容重、总孔隙度、年均温和年均蒸发量是影响农田（16.2% ~ 41.7%）、林地（17.3% ~ 33.9%）和草地（11.0 ~ 26.9%%）0 ~ 30 cm 土层土壤养分化学计量比的共同因子。环境因子对不同土地利用类型下土壤化学计量比的解释量随深度增加而下降。研究结果有助于深入理解高寒地区不同土地利用方式下土壤肥力主控因子，为该区土壤养分合理管理奠定基础。

关键词：青藏高原；养分化学计量比；土地利用类型；影响因素

中图分类号：S153 **文献标志码**：A

Stoichiometric Ratio and Influencing Factors of Soil Nutrients Under Farmland, Forestland, and Grassland in Eastern Xizang Autonomous Region

DU Yuanyuan[1], ZHAO Wen[1, 2], HUANG Laiming[1, 2, 3†]

(1. *Modern Agricultural Engineering Laboratory, 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*; 3. *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*)

Abstract: 【Objective】The investigation of soil nutrient content and stoichiometric ratios is of great significance for gaining a deeper understanding of the nutrient cycling and balance mechanisms within ecosystems. The Xizang

*国家自然科学基金项目（42377302）和中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目（SKLURE2023-2-2）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42377302) and the Opening Funds from State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences of Chinese Academy of Sciences (No. SKLURE2023-2-2)
† 通讯作者 Corresponding author，E-mail: huanglm@igsnrr.ac.cn
作者简介：杜媛媛（2002—），女，江苏南京人，主要从事土壤养分研究。E-mail: duyy2002@163.com
收稿日期：2024–04-27；收到修改稿日期：2024-09-02；网络首发日期（www.cnki.net）：

Autonomous Region, situated on the southwestern Qinghai-Tibetan Plateau, functions both as an ecologically fragile area and a crucial ecological security barrier for China. This research examined the soil nutrient stoichiometric ratios and their influencing factors under different land use patterns in the alpine region of the Xizang Autonomous Region. The objective was to assess nutrient limitations in the study area and provide a foundation for effective nutrient management in these sensitive ecosystems. 【Method】This study focused on three land use types (farmland, forestland, and grassland) across an east-west transect in the eastern Xizang Autonomous Region. Soil samples were collected at different depths (0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30 cm) to measure basic physical and chemical properties (including clay content (Cy), bulk density (BD), porosity (Ps), soil water content (SWC), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), Alkali-hydrolyzable nitrogen (AN) and available phosphorus (AP)). The longitude (LON), latitude (LAT), and altitude (ALT) of each sampling site were recorded using GPS, while environmental factors such as mean annual temperature (MAT), mean annual evaporation (Ea), mean annual precipitation (MAP), and vegetation normalization index (NDVI) were extracted using ArcGIS. Variance analysis was employed to assess differences in the contents of SOC, TN, AN, TP, and AP, along with their corresponding nutrient stoichiometry ratios (C:N, C:P, N:P, and AN:AP) among farmland, forestland, and grassland. Additionally, correlation analysis and redundancy analysis were conducted to identify the factors influencing nutrient stoichiometric ratios across the three land use types. 【Result】The findings revealed no significant differences in SOC, TN, or AN contents among the different land use types (P > 0.05). However, TP and AP contents in farmland were significantly higher than those in forestland and grassland. Moreover, soil C:N did not vary significantly with depth across any of the land use types. The AN: AP ratio in the 10-20 cm soil layer of grassland was significantly higher than that in farmland and forestland, while the C:P and N:P ratios in the 20-30 cm soil layer of farmland were significantly lower compared to forestland and grassland. Farmland soils exhibited greater nitrogen limitation, evidenced by lower AN contents and reduced N:P. Redundancy analysis indicated that SOC, TN, BD, P_s, MAT, and E_a were among the common influencing factors for the 0-30 cm soil nutrient stoichiometric ratios in farmland (16.2%-41.7%), forestland (17.3%-33.9%), and grassland (11.0%-26.9%). Interestingly, the influence of environmental factors on the soil nutrient stoichiometric ratios under different land use types decreased with increasing soil depth. 【Conclusion】Overall, this research enhances the understanding of the key factors influencing soil fertility under different land use types and offers valuable guidance for optimizing nutrient management in the alpine region of Xizang Autonomous Region.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; Soil nutrient stoichiometric ratio; Land use type; Influencing factor

土壤是地球关键带的重要组成部分，对维持陆地生态系统服务与功能至关重要。土壤养分供应对植物生长、微生物活性具有决定性作用，并深刻影响群落结构与功能的变化，是评估陆地生态系统生产力的重要指标[1-2]。土壤养分化学计量比能够揭示多种元素之间的平衡关系与交互影响。碳（C）、氮（N）和磷（P）是生物所必需的营养元素[3-4]，其含量和比例影响生物健康、土壤质量和生态系统可持续发展[5-6]。因此，研究土壤养分含量和化学计量比对深入理解生态系统养分循环和平衡机制具有重要意义。

近年来，脆弱生态区土壤肥力状况和养分化学计量比日益受到学者的关注，为评估区域土壤质量奠定了基础。特别是在青藏高原地区，由于海拔高、气候恶劣，土壤养分空间异质性强且周转速率慢[7]。王建林等[8]研究了青藏高原高寒草地土壤养分化学计量比，结果表明 0 ~ 20 cm 土壤与 30 ~ 40 cm 土壤 C:N 差异显著（P < 0.05）。Bing 等[9]在西藏东部的研究发现，土壤

C:P 和 N:P 随着海拔的升高而增加。Li 等[10]对全球陆地生态系统的研究表明，降水量增加有利于促进土壤 C、N 元素富集，反之，降水量低的地区土壤 C、N 元素相对贫瘠，进而影响全球尺度土壤养分化学计量比。在区域尺度上，土壤水分和质地是影响西藏地区草地土壤化学计量比的重要因子，可用于预测高寒草地表层土壤养分化学计量比[11]。此外，不同地区的研究证实，气候[12]、植物类型[13]、地形[14]等环境因子与土壤性质均会影响养分化学计量比。近年来，不同土地利用方式下土壤养分计量比的差异逐渐受到关注。例如，在科尔沁沙地的研究显示，草地和农田土壤 C:N、C:P 均显著高于流动沙丘[15]。草地转变为农田，土壤 C、N 含量下降速率高于 P，导致 C:P 和 N:P 下降[16]。上述研究主要集中在样地或流域尺度，而有关样带尺度不同土地利用类型（农田、林地和草地）土壤养分化学计量比及影响因素研究较少。

本文以西藏自治区东部农田、林地和草地土壤为对象，针对三个土层（0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm）的土壤样本，测定土壤基本理化性质（黏粒含量 C_y、容重 BD、总孔隙度 P_s、土壤含水量 SWC、有机碳 SOC、全氮 TN、全磷 TP、碱解氮 AN 和有效磷 AP），并提取环境因子（年均温度 MAT、年均降水量 MAP、年均蒸发量 E_a、植被归一化指数 NDVI 和海拔 ALT）。在此基础上，本文分析不同土地利用类型和不同土层间，土壤养分化学计量比表现的差异，并探讨其影响因素。研究结果可为西藏高寒区不同土地利用类型下土壤养分合理管理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究所选研究区为西藏东部（28.90°N — 31.80°N，87.43°E — 97.13°E），位于青藏高原的东南部，地势西北高、东南低，海拔在 3 589 ~ 4 811 m 之间。该地区受印度洋季风和内陆高原气候的共同影响，气候寒冷且相对湿润。年均气温为−5.9 ~ 7.0 ℃，年降水量为 388 ~ 906 mm，年蒸发量为 375 ~ 1 088 mm。土壤类型主要包括寒性干旱土、寒冻雏形土、正常新成土和旱耕人为土。研究区高寒作物主要有青稞（*Hordeum vulgare* var. coeleste）和小麦（*Triticum aestivum* L.）；草地包括高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原和高寒荒漠，主要植物有牛毛毡（*Eleocharis yokoscensis* (Franchet & Savatier) Tang & F. T. Wang）、高山嵩草（*Kobresia pygmaea*）、紫花针茅（*Stipa purpurea*）；林地包括人工林、天然林和高山灌丛，主要植物有白刺花（*Sophora davidii*）、急尖长苞冷杉（*Abies georgei* var. smithii）、藏川杨（*Populus szechuanica* var. tibetica）。

1.2 样品采集与分析

2021 年 7 月，在西藏自治区东部布设一条 1 070 km 长的东西样带，选取农、林、草地共 30 个采样点，其中农田 8 个、林地 9 个、草地 13 个（图 1）。在 100 m^2 区域内，采用梅花法布局设置采样点，针对 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 三个不同深度的土层，分别采集原状土和扰动土。每个土层均重复取样三次，总计采集原状土和扰动土样品各 270 份。扰动土样自然风干后，挑去枯枝落叶，随后进行充分混合并研磨，分别过 2 mm、1 mm 和 0.25 mm 筛备用。

SWC、BD 和 P_s 用原状土测定。SWC 采用烘干法测定，BD 和 P_s 采用环刀法测定。其余理化性质用扰动土测定。过 2 mm 筛土样用于测定土壤质地，采用激光粒度仪（MS-2000，马尔文，英国）测定土壤颗粒组成。过 1 mm 筛土样用于测定 TN 和 TP，TN 采用凯氏定氮法（KDY-9830）测定，TP 采用酸熔—钼锑抗比色法（UV-2450）测定。过 0.25 mm 筛土样用于测定 SOC、AN 和 AP 含量，SOC 含量采用重铬酸钾氧化—外加热法测定，AN 采用碱解扩散法测定，AP 采用 0.5 $mol·L^{-1}$ $NaHCO_3$ 浸提，钼蓝比色法测定。以上测定方法参照《土壤调查实验室分析方法》[17]。

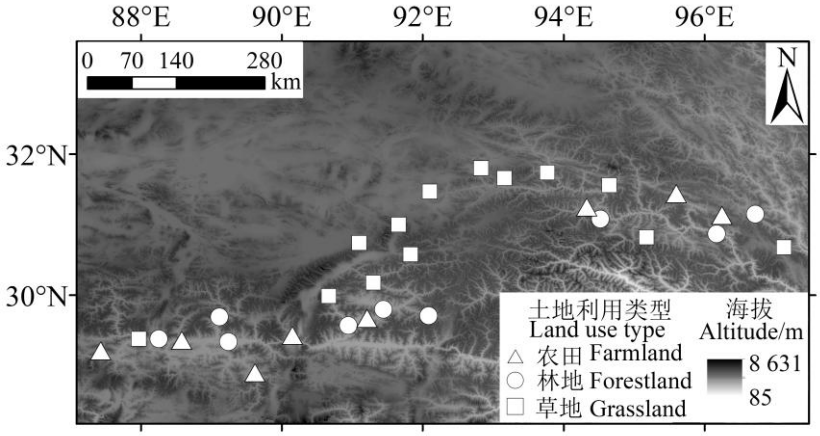


图 1 西藏自治区东部农林草地土壤样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil samples under farmland, forestland and grassland in the eastern Xizang Autonomous Region

1.3 数据处理

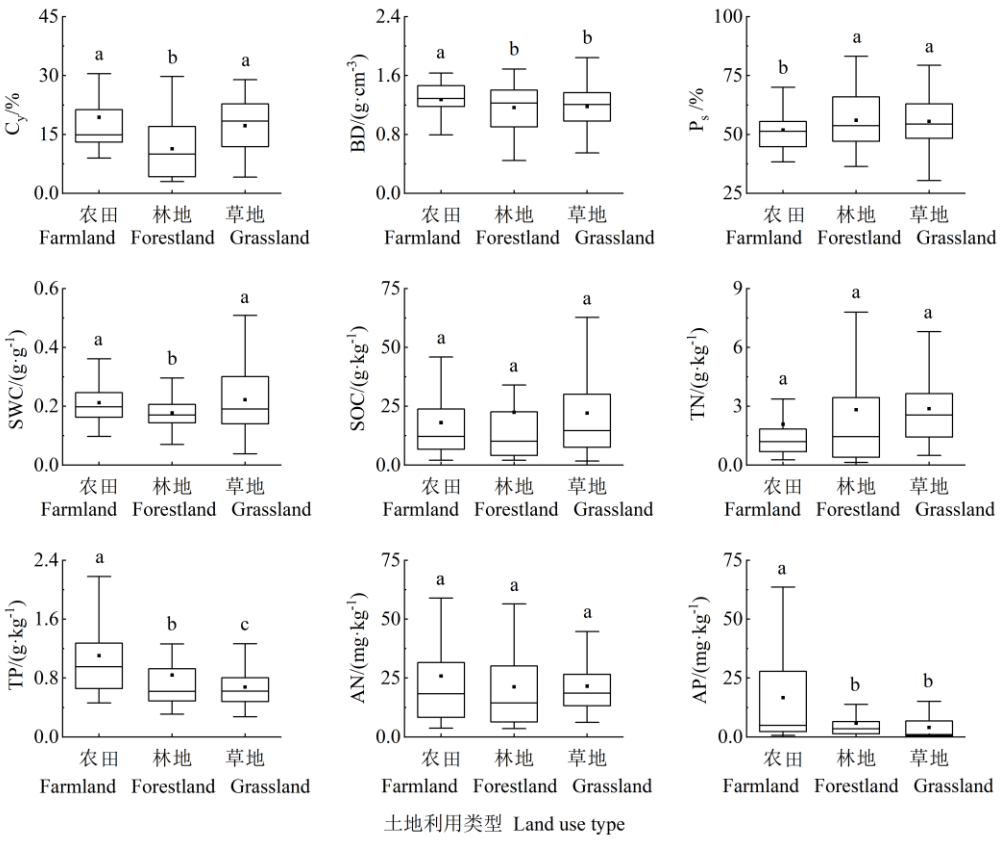
气候数据（MAT、MAP 和 E_a）通过中国气象数据共享网（https://data.cma.cn/）获得，NDVI 数据来源于 MODIS NDVI 数据 MOD13Q1，ALT 使用 GPS（Garmin eTrex 221x）记录。使用 ArcGIS 10.2 提取采样点环境数据（MAP、MAT、E_a 和 NDVI），并绘制采样点分布图。使用 SPSS 27.0 对土壤基本理化性质和土壤养分化学计量比进行描述性统计分析。针对不同的土地利用类型，采用单因素方差分析比较其土壤基本理化性质的差异；同时，采用双因素方差分析检验不同土地利用类型和不同土层深度对土壤养分化学计量比的影响，设置显著性检验标准为 $P < 0.05$。此外，对土壤的养分化学计量比与基本理化性质以及环境因子进行了皮尔森（Pearson）相关性分析，并分别在显著性水平为 0.05、0.01 和 0.001 上进行了检验。利用 Origin 2022 绘制箱型图、柱状图和 Pearson 相关性分析图，利用软件 Canoco 5.0 进行冗余分析。

2 结 果

2.1 不同土地利用类型土壤基本理化性质

如图 2 所示，农田土壤 BD 均值为 1.27 $g·cm^{-3}$，显著高于草地（1.18 $g·cm^{-3}$）和林地（1.17 $g·cm^{-3}$），而农田土壤 P_s 均值为 51.90%，显著低于林地（56.01%）和草地（55.54%）（$P < 0.05$）。C_y 均值表现为草地（19.37%）、农田（17.23%）、林地（11.35%）依次降低，且林地土壤 C_y 显著低于农田和草地。SWC 均值表现为草地（0.22 $g·g^{-1}$）、农田（0.21 $g·g^{-1}$）、林地（0.18 $g·g^{-1}$）依次降低，且林地 SWC 显著低于农田和草地。

农田 TP 含量均值（1.10 $g·kg^{-1}$）显著高于林地（0.84 $g·kg^{-1}$），而林地 TP 含量均值又显著高于草地（0.68 $g·kg^{-1}$），分别高出 31.0%和 23.5%。农田土壤 AP 含量均值为 16.67 $mg·kg^{-1}$，显著高于林地（5.82 $mg·kg^{-1}$）和草地（4.01 $mg·kg^{-1}$）。与林地和草地相比，农田土壤 AP 平均含量分别高出 186.4%与 315.7%。不同土地利用类型间 SOC、TN 和 AN 含量不存在显著差异。



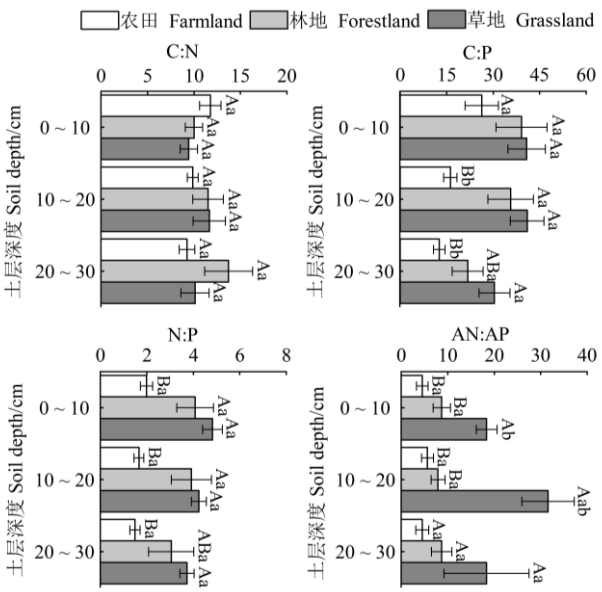
注：C_y：黏粒含量；BD，容重；P_s，总孔隙度；SWC，土壤含水量；SOC，土壤有机碳；TN，全氮；TP，全磷；AN，碱解氮；AP，有效磷；图中不同小写字母表示不同土地利用类型之间差异显著 (P < 0.05)。下同。Note: C_y: Clay content; BD: Bulk density; P_s: Porosity; SWC: Soil water content; SOC: Soil organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; AN: Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; Different lowercase letters indicate significant differences between different land use types (P < 0.05). The same as below.

图 2 西藏自治区东部农林草地土壤基本理化性质箱式图

Fig. 2 Box diagram of soil basic physicochemical properties under farmland, forestland and grassland in the eastern Xizang Autonomous Region

2.2 西藏自治区东部农林草地不同深度土壤养分化学计量比

如图 3 所示，农田、林地和草地在不同土层深度的土壤 C:N 均值分别为 9.44 ~ 11.77、9.88 ~ 11.66 和 9.26 ~13.72。在同一深度的不同土地利用类型或同一土地利用类型的不同深度之间，土壤 C:N 均无显著差异。农田、林地和草地在不同土层深度的土壤 C:P 均值分别为 26.34 ~ 40.82、16.18 ~ 40.98 和 12.60 ~ 30.43。不同深度土壤 C:P 均值表现为农田、林地、草地依次升高，其中农田 0 ~ 10 cm 土壤 C:P 显著高于 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm，而林地和草地不同深度土壤 C:P 均无显著差异（P > 0.05）。农田、林地和草地在不同土层深度的土壤 N:P 均值分别为 1.99 ~ 4.82、1.66 ~ 4.24 和 1.49 ~ 3.73。不同深度土壤 N:P 均值表现为农田、林地、草地依次升高，其中农田不同深度土壤 N:P 均显著低于林地和草地（P < 0.05），而农、林、草地不同深度土壤 N:P 均无显著差异。农田、林地和草地在不同土层深度的土壤 AN:AP 均值分别为 4.53 ~ 18.37、5.66 ~ 31.59 和 5.79 ~ 43.08。不同深度土壤 AN:AP 均值表现为农田、林地、草地依次升高，其中草地 10 ~ 20 cm 土壤 AN:AP 显著高于农田和林地，而农田和林地不同深度土壤 AN:AP 均无显著差异。



注：图上数据为平均值±标准误；图中不同小写字母表示同一土地利用类型不同深度土壤之间差异显著（$P < 0.05$）；不同大写字母表示同一深度土壤不同土地利用类型之间差异显著（$P < 0.05$）。Note: The data in the figure are means ± standard error; Different lowercase letters indicate significant differences between different soil depths in the same land use type ($P < 0.05$); Different capital letters indicate significant differences between different land use types in the same soil depth ($P < 0.05$).

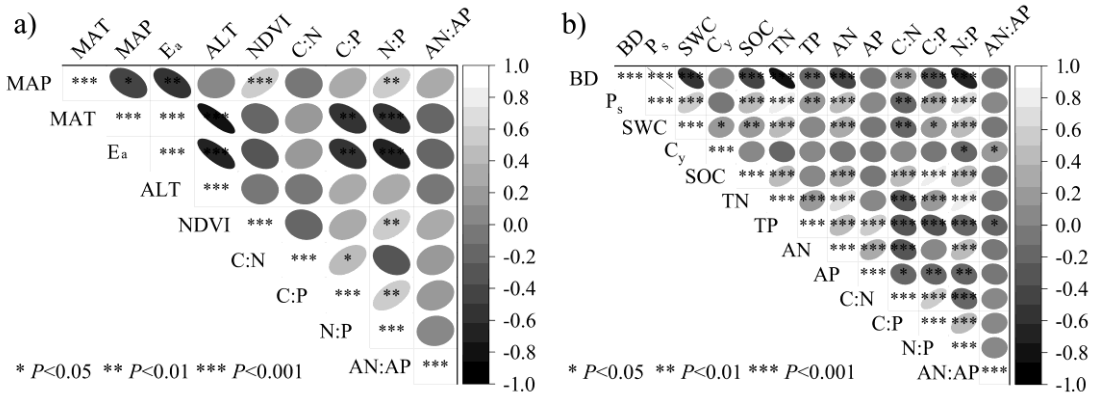
图 3 西藏自治区东部农林草地不同深度土壤养分化学计量比

Fig. 3 Soil nutrient stoichiometric ratios in different soil depths of farmland, forestland and grassland in the eastern Xizang Autonomous Region

2.3 土壤养分化学计量比与基本理化性质和环境因子相关关系

如图 4a 所示，C:N 与 BD 存在显著正相关关系（$P < 0.01$），与 SWC 和 Ps 存在显著负相关关系（$P < 0.01$），与 AN 和 TP 存在极显著负相关关系（$P < 0.001$）。C:P 与 SWC 和 Ps 显著正相关（$P < 0.01$），与 TN 极显著正相关（$P < 0.001$），与 BD（$P < 0.001$）和 AP（$P < 0.01$）显著负相关。N:P 与 SOC、AN、SWC 和 P_s 显著正相关（$P < 0.001$），与 BD（$P < 0.001$）、AP（$P < 0.01$）和 C_y（$P < 0.05$）显著负相关。

如图 4b 所示，C:P 与 MAT、E_a 存在显著（$P < 0.01$）和极显著（$P < 0.001$）负相关关系。N:P 与 MAP 和 NDVI 存在显著正相关关系（$P < 0.01$），与 MAT、E_a 存在显著（$P < 0.01$）和极显著（$P < 0.001$）负相关关系。AN:AP 与环境因子之间无显著相关关系。



注：LON：经度；LAT：纬度；MAT：年均温度；MAP：年均降水量；E_a：年均蒸发量；ALT：海拔；NDVI：植被归一化指数。下同。Note: LON: Latitude; LAT: Longitude; MAT: Annual mean temperature; MAP: Mean annual

precipitation; E_a: Average annual evaporation; ALT: Altitude; NDVI: Normalized differential vegetation index. The same as below.

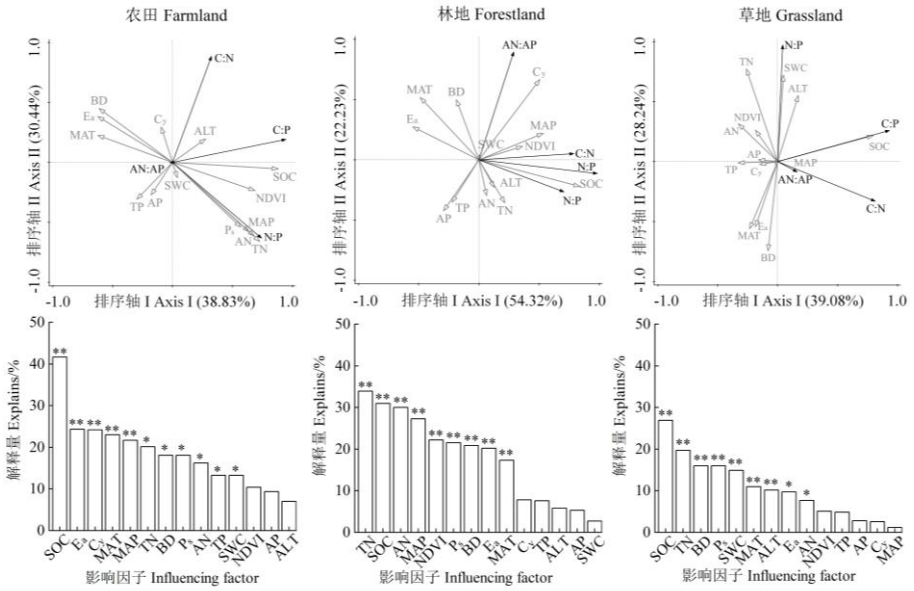
图 4 土壤养分化学计量比与基本理化性质（a）和环境因子（b）相关性

Fig. 4 Correlation analysis between soil nutrient stoichiometric ratios and soil physicochemical properties (a) and environmental factors (b)

2.4 土壤养分化学计量比的影响因素

通过冗余分析（RDA）对农田、林地和草地土壤养分化学计量比与基本理化性质和环境因子之间的关系分别进行分析（图 5）可知，前两轴对农田、林地和草地土壤养分化学计量比的解释率之和分别为 69.27%、76.55％和 67.32%，不同土地利用类型土壤养分化学计量比的主要影响因子不同。SOC 和 MAT 同时影响农田（解释率：41.7%和 23.0%）、林地（解释率：31.0%和 17.3%）、草地（解释率：26.9%和 11.0%）土壤养分化学计量比（$P < 0.01$）。E_a、TN、BD、P_s 和 AN 也是影响不同土地利用类型土壤养分化学计量比的重要因素。

MAP 显著影响农田和林地土壤养分化学计量比，其解释率分别为 21.7%和 27.3%。然而，MAP 对草地土壤养分化学计量比的影响不显著（$P > 0.05$）。C_y（$P < 0.01$）和 TP（$P < 0.05$）也显著影响农田土壤养分化学计量比，其解释率分别为 24.2%和 13.3%。然而，C_y 和 TP 对草地和林地土壤养分化学计量比的影响不显著（$P > 0.05$）。



注：*表示 $P < 0.05$；**表示 $P < 0.01$。下同。Note：* means $P < 0.05$；** means $P < 0.01$. The same as below.

图 5 西藏自治区东部 0 ~ 30 cm 土层农林草地土壤养分化学计量比和影响因子冗余分析及各因子解释量

Fig. 5 The redundancy analysis of soil nutrient stoichiometric ratios and factors and explains by each factor under different land use in the 0-30 cm soil layer in the eastern Xizang Autonomous Region

通过冗余分析（RDA）对 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 深度土壤的养分化学计量比与基本理化性质和环境因子之间的关系分别进行分析（图 6）可知，前两轴对 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 深度土壤养分化学计量比的解释率之和分别为 69.65%、64.05％和 62.05%。SOC 和 TN 同时影响 0 ~ 10 cm（解释率：36.1%和 23.9%）、10 ~ 20 cm（解释率：27.9%和 23.5%）和 20 ~ 30 cm（解释率：22.0%和 20.05%）深度土壤养分化学计量比（$P < 0.01$）。P_s 和 BD 也是影响不同土层深度土壤养分化学计量比的重要因素。此外，E_a 和 MAT 也显著影响 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 深度土壤养分化学计量比（$P < 0.01$）。

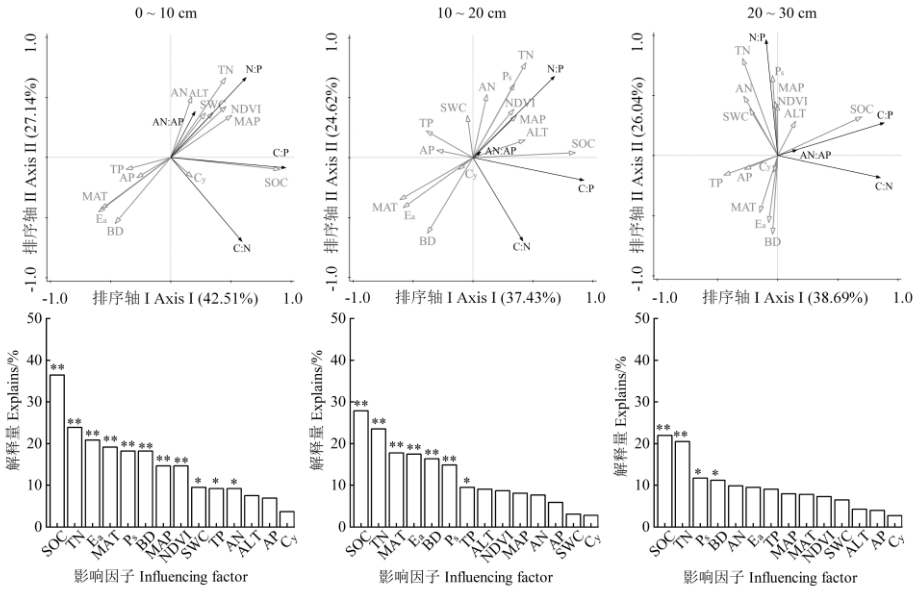


图 6 西藏自治区东部不同土层土壤养分化学计量比影响因子冗余分析及各因子解释量

Fig. 6 The redundancy analysis of the influencing factors of soil nutrient stoichiometric ratios at different soil depths and the explanation proportion by each factor in the eastern Xizang Autonomous Region

3 讨 论

3.1 不同土地利用类型土壤养分化学计量比及其指示作用

在植物生长过程中，土壤 C、N 和 P 元素起着至关重要的作用，特别是 N 和 P 常被认为是限制植物生长的关键元素[18]。研究结果（图 2）显示，农、林、草地土壤 AN 平均含量分别为 25.84 mg·kg^{-1}、21.26 mg·kg^{-1}、21.55 mg·kg^{-1}。根据全国第二次土壤普查肥力等级[19]划分标准，三种土地利用类型土壤 AN 含量均属于最低等级（VI：< 30 mg·kg^{-1}）。农田 AP 平均含量为 16.67 mg·kg^{-1}，属于第三级（III：10 ~ 20 mg·kg^{-1}）[19]，而林地（5.82 mg·kg^{-1}）和草地（4.01 mg·kg^{-1}）AP 平均含量较低，分别属于第四级（IV：5 ~ 10 mg·kg^{-1}）和第五级（V：3 ~ 5 mg·kg^{-1}）[19]。农田土壤 TP 和 AP 含量均高于林地和草地（图 2），这可能与农田施肥有关[20]。一方面，施肥能够为土壤提供无机氮源，提高土壤 TP 含量[21]。另一方面，氮肥和磷肥输入会促进微生物对有机磷的矿化过程[22]，导致农田 AP 含量增加。此外，农林草地的 SOC 和 TN 均无显著性差异（图 2，$P > 0.05$），表明 SOC 和 TN 在不同土地利用类型下相对稳定，这说明本研究区土壤微生物生物量和活性差异较小[23]。

土壤 C:N 可通过影响生化反应的基质浓度、微生物群落组成和活性，从而改变 C、N 周转速率[24]。研究结果（图 3）显示，农、林、草地土壤平均 C:N 分别为 10.30、11.74 和 10.40，略低于全国土壤 C:N 均值（12.30）[25]。不同土地利用类型土壤 C:N 均无显著差异（图 3），这可能与土壤中 C、N 元素耦合循环有关[26]。Borken 和 Matzner[27]研究表明，当土壤 C:N < 25 时，土壤释放的硝酸根离子显著高于 C:N > 25 的土壤。西藏东部地区不同土地利用类型下土壤 C:N 均小于 25，这表明该地区土壤硝酸盐含量较高，存在较高的硝酸盐淋溶风险，过量施用氮肥可能造成土壤中 N 的损失。

土壤 C:P 能够反映磷有效性的高低，是衡量微生物释放 P 或从环境中吸收固持 P 的重要指标[28]。农、林、草地土壤 C:P 均值分别为 18.37、32.23、32.22（图 3），远低于全国土壤 C:P 均值（61.00）[25]。在陆地生态系统的土壤中，研究者们发现了一种类似于雷德非尔德比例（Redfield ratio）的约束关系，其中土壤 N 和 P 的比例约为 13:1[29]。相比之下，农田、林地和

草地的平均 N:P（1.71 ~ 4.26）明显低于 13:1，显示出该地区土壤中 N 的限制程度较高。高寒气候抑制了微生物的活动，生物固 N 作用减弱[30]，是导致该区土壤 N 限制的重要原因。值得注意的是，农田土壤 N:P 小于林地和草地（图 3），这可能与农业活动加剧 N 素流失有关。尽管土壤养分化学计量比在一定程度上可为判断土壤养分受限状况提供依据，但未来仍需进一步结合植物养分含量和微生物酶活性深入研究高寒生态系统养分限制类型及影响机制。

西藏东部不同土地利用类型土壤 C:P 和 N:P 均随深度增加而减小，且农田 0 ~ 10 cm 土壤 C:P 显著高于 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土壤（$P < 0.05$，图 3）。Li 等[31]在黄土丘陵区的研究同样显示，表层土壤 C:P 和 N:P 大于亚表层和深层土壤。本研究农、林、草地 SOC、TN 和 TP 含量均随土壤深度增加而减小，表明养分元素在土壤表层相对富集。然而，不同利用方式下 SOC 和 TN 随深度下降的速率均高于 TP，因此土壤 C:P 和 N:P 随深度增加而减小（图 3）。

3.2 不同土地利用类型和不同深度土壤养分化学计量比影响因素

大量研究表明，土壤养分化学计量比不仅受土壤理化性质的影响，同时也受植被、降水、土地利用方式和生态恢复年限等环境因子的影响[32]。SOC、MAT、E_a、TN、BD、P_s 和 AN 是影响农田（16.2% ~ 41.7%）、林地（17.3% ~ 33.9%）和草地（11.0% ~ 26.9%）0 ~ 30 cm 土壤养分化学计量比的共同因子（图 5）。SOC、TN、P_s 和 BD 是影响 0 ~ 10 cm（18.2% ~ 36.1%）、10 ~ 20 cm（14.9% ~ 27.9%）和 20 ~ 30 cm（11.2% ~ 22.0%）土壤养分化学计量比的共同因子（图 6）。MAT 通过影响土壤发育、植物生长和微生物活动，进而影响土壤 C、N、P 的积累和分解[33]。MAT 升高，土壤温度和微生物活性也相应增加，从而加快有机物分解速率。BD 直接影响土壤孔隙度、植物根系生长和水源涵养能力[34]。因此，农田土壤 BD 增加将会限制微生物活动、有机物分解和植物养分吸收。E_a 主要取决于土壤质地及地表温度[26]，它能够影响微生物活性，进而间接影响土壤有机质分解和养分释放速率，导致土壤养分化学计量比发生变化[35]。因此，土壤性质和气象因子是不同土地利用类型土壤养分化学计量比的重要影响因素。

与农田和林地不同，MAP 对草地土壤化学养分计量比的影响不显著，而 BD 影响相对较大（解释率为 16.0%）（图 5），这可能与高寒草地存在草毡层有关[32]。草毡层是由土壤物质与活/死根交织缠结而形成的毡状表层[36]。草毡层中有机碳的积累显著降低了 BD，进而影响土壤养分化学计量比。环境因子（MAP、MAT、E_a 和 NDVI）对农、林、草地土壤养分化学计量比的解释率均随深度增加而下降，其中，20 ~ 30 cm 深度土壤养分化学计量不受环境因子影响（图 6）。

研究结果显示，土壤性质与环境因子对西藏东部土壤养分化学计量比的解释率之和可达 62.05% ~ 76.55%（图 5 和图 6），剩余未解释部分可能与未考虑土壤微生物和植被类型有关。土壤微生物通过影响有机物质分解及养分循环，从而影响土壤养分化学计量比[29]。此外，不同植物群落的根系结构、养分吸收深度和强度均存在差异，这也会影响土壤养分化学计量比[13]。近年来越来越多的研究表明，青藏高原地区已出现气温升高、降水量增加的趋势[37-38]。因此，未来需综合考虑微生物、植物、土壤和环境因子，探究气候变化背景下不同土地利用类型土壤养分化学计量比差异及其驱动机制。

4 结 论

本文在西藏自治区东部设置样带，选取农田、林地和草地不同深度土壤为研究对象，探究不同土地利用类型和不同深度土壤养分化学计量比差异及其影响因素。主要结论如下：（1）不同土地利用类型各土层 C:N 均无显著差异，草地 10 ~ 20 cm 土壤 AN:AP 显著高于农田和林地，农田 20 ~ 30 cm 土壤 C:P 和 N:P 均显著低于林地和草地。相较于林地和草地，农田土壤氮素限制更为严重，建议通过有针对性的施肥与科学的田间管理缓解该问题。（2）土壤性质和环境因子是不同土地利用类型下土壤养分化学计量比的重要影响因素。环境因子对农、林、草地

土壤养分化学计量比的解释率均随深度增加而下降。未来的研究应考虑多种因子在交互作用下对土壤化学计量比的影响机制。

参考文献（References）

[1] Chen Y, Li Y Q, Duan Y L, et al. Patterns and driving factors of soil ecological stoichiometry in typical ecologically fragile areas of China[J]. Catena, 2022, 219: 106628.

[2] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947. [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.]

[3] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.

[4] Wang Y, Ren Z, Ma P P, et al. Effects of grassland degradation on ecological stoichiometry of soil ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137910.

[5] Liu S N, Li G, Yang C J, et al. Seasonal variation of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry under different vegetation types in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 343-349, 360. [刘帅楠, 李广, 杨传杰, 等. 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[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 343-349, 360.]

[6] Shi S W, Peng C H, Wang M, et al. A global meta-analysis of changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur, and stoichiometric shifts after forestation[J]. Plant and Soil, 2016, 407(1): 323-340.

[7] Liu L, Wang M H, Yang W, et al. Soil stoichiometric characteristics of alpine meadow in northwest Yunnan under different disturbance types[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(4): 634-644. [刘莉, 王明浩, 杨蔚, 等. 不同干扰类型下滇西北高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 草业科学, 2022, 39(4): 634-644.]

[8] Wang J L, Zhong Z M, Wang Z H, et al. Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinhai-Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6678-6691. [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.]

[9] Bing H, Wu Y H, Zhou J, et al. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 16: 405-416.

[10] Li J W, Deng L, Josep P, et al. C:N:P stoichiometry of plants, soils, and microorganisms: Response to altered precipitation[J]. Global Change Biology, 2023, 29(24): 7051-7071.

[11] Tian L M, Zhao L, Wu X D, et al. Soil moisture and texture primarily control the soil nutrient stoichiometry across the Tibetan grassland[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622/623: 192-202.

[12] Geng Y, Baumann F, Song C, et al. Increasing temperature reduces the coupling between available nitrogen and phosphorus in soils of Chinese grasslands[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43524.

[13] Hu C, Li F, Xie Y H, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of three dominant plant communities distributed along a small-scale elevation gradient in the East Dongting Lake[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2018, 103: 28-34.

[14] Yang W, Zhou J G, Wang M H, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1336-1344. [杨文, 周脚根, 王美慧, 等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1336-1344.]

[15] Cao W J, Li Y Q, Chen Y P, et al. Soil stoichiometry characteristics under different land use types in the Horqin Sandy Land, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3312-3320. [曹雯婕, 李玉强, 陈银萍, 等. 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3312-3320.]

[16] Li S C, Xu J H, Tang S M, et al. A meta-analysis of carbon, nitrogen and phosphorus change in response to conversion of grassland to agricultural land[J]. Geoderma, 2020, 363: 114149.

[17] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验

室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]

[18] Duan L L, Qiao Z Y, Yuan Y H, et al. Seasonal differences of soil stoichiometric characteristics and microbial element utilization efficiency in *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6584-6596. [段露露, 乔芷瑛, 袁艳红, 等. 黄土高原刺槐林土壤化学计量特征和微生物元素利用效率的季节差异[J]. 生态学报, 2024, 44(15): 6584-6596.]

[19] The National Soil Survey Office. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. [全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.]

[20] Zhang G N, Xu Q W, He B H, et al. Effects of balanced fertilization and straw mulching on soil nutrients and stoichiometry in purple soil slope[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 5135-5144. [张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 等. 平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5135-5144.]

[21] Li C Y, Miao Y, Xue Y L, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil-microorganism-plant system in the Loess upland under long-term fertilization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 370-378. [李春越, 苗雨, 薛英龙, 等. 长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 370-378.]

[22] Dai Z M, Liu G F, Chen H H, et al. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems[J]. The ISME Journal, 2020, 14(3): 757-770.

[23] Zhao M Y, Liu Y X, Zhang X Y. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9405-9416. [赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9405-9416.]

[24] Hui D F, Yang X T, Deng Q, et al. Soil C:N:P stoichiometry in tropical forests on Hainan Island of China: Spatial and vertical variations[J]. Catena, 2021, 201: 105228.

[25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of c: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98: 139-151.

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

[27] Borken W, Matzner E. Nitrate leaching in forest soils: An analysis of long-term monitoring sites in Germany[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(3): 277-283.

[28] Zhang Z S, Lü X G, Xue Z S, et al. Is there a redifeld-type C∶N∶P ratio in Chinese wetland soils?[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 1160-1169. [张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 等. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1160-1169.]

[29] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a "redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.

[30] D'Alò F, Odriozola I, Baldrian P, et al. Microbial activity in alpine soils under climate change[J]. Science of the Total Environment, 2021, 783: 147012.

[31] Li C Z, Zhao L H, Sun P S, et al. Deep soil C, N, and P stocks and stoichiometry in response to land use patterns in the Loess Hilly Region of China[J]. PLoS One, 2016, 11(7): e0159075.

[32] Wang Z W, Wang J, Huang L M, et al. Patterns and driving factors of soil nutrient stoichiometry under three land use types in the alpine region of Tibet, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 24(2): 901-913.

[33] Luo W T, Dijkstra F A, Bai E, et al. A threshold reveals decoupled relationship of sulfur with carbon and nitrogen in soils across arid and semi-arid grasslands in northern China[J]. Biogeochemistry, 2015, 127(1): 141-153.

[34] Jiao S, Li J, Li Y, et al. Variation of soil organic carbon and physical properties in relation to land uses in the Yellow River Delta, China[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 20317.

[35] Gao W J, Ma T, Shi B W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the mineralization potential of soil organic carbon and the corresponding regulations in the Tibetan alpine grassland[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 196: 105314.

[36] Zhang G L, Yang F, Long H. Save the life-sustaining mattic layer on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. The Innovation, 2023,

4(3): 100418.

[37] Chen H, Chen H, Zhu Q, et al. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 2013, 19(10): 2940-2955.

[38] Pepin N, Bradley R S, Diaz H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world[J]. Nature Climate Change, 2015, 5: 424-430.

（责任编辑：陈荣府）