

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.026

引用格式:雷蕾,李邵宇,郑佳华,等.内蒙古草地生态系统土壤微生物生物量碳氮磷及其驱动因素[J].草地学报,2026,34(9):3426—3433

LEI Lei, LI Shao-yu, ZHENG Jia-hua, et al. Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Their Driving Factors in Inner Mongolia Grassland Ecosystems[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3426—3433

内蒙古草地生态系统土壤微生物生物量碳氮磷及其驱动因素

雷蕾¹, 李邵宇¹, 郑佳华¹, 张峰¹, 张彬¹, 杨立山¹, 邢佳庆¹,
陈信力², 赵萌莉^{1*}, 韩国栋^{1*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 浙江农林大学, 浙江 杭州 310000)

摘要:为揭示降水梯度下土壤微生物量碳氮磷(Microbial carbon, MBC; Microbial nitrogen, MBN; Microbial phosphorus, MBP)化学计量比的空间分布特征及驱动机制,本研究在内蒙古境内沿约3000 km样线采集了3种草地类型共57个样点,分析了微生物量及其化学计量比的空间分布特征,并探讨其与气候及土壤理化因子的关系。结果表明,MBC含量显著高于MBN、MBP;微生物量与土壤速效碳氮磷呈正相关,MBN与干旱度(Aridity)、年均温(Mean annual temperature, MAT)、土壤容重(Soil bulk density, SBD)呈负相关,MBP与Aridity、MAT、土壤pH值呈负相关;微生物量碳氮比(Mcn)与年平均降水量(Mean annual precipitation, MAP)呈显著负相关,微生物量碳磷比(Mcp)与Aridity呈显著正相关,微生物量氮磷比(Mnp)与土壤pH值呈显著正相关。随机森林分析表明,MAP、Aridity、土壤pH值是微生物量的主要驱动因子。本研究加深了土壤微生物碳氮磷对气候变化的响应的认知,为保护草地生态系统养分循环功能提供了理论支撑。

关键词:内蒙古草地;土壤微生物生物量;化学计量比;生物与非生物因子

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3426-08

Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Their Driving Factors in Inner Mongolia Grassland Ecosystems

LEI Lei¹, LI Shao-yu¹, ZHENG Jia-hua¹, ZHANG Feng¹, ZHANG Bin¹, YANG Li-shan¹, XING Jia-qing¹,
CHEN Xin-li², ZHAO Meng-li^{1*}, HAN Guo-dong^{1*}

(1. College of Grassland, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China;

2. Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou, Zhejiang Province 310000, China)

Abstract: To reveal the spatial distribution characteristics and driving mechanisms of soil microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), and phosphorus (MBP) stoichiometry under precipitation gradients, this study collected 57 sampling points of three grassland types along a 3000 km transect in Inner Mongolia. The spatial distribution characteristics of microbial biomass and its stoichiometry were analyzed, and their relationship with climate and soil physicochemical factors was explored. The results showed that MBC content was significantly higher than that of MBN and MBP. Microbial biomass was positively correlated with available carbon, nitrogen, and phosphorus in the soil. MBN was negatively correlated with aridity, mean annual temperature (MAT), and soil bulk density (SBD). MBP was negatively correlated with aridity, MAT, and soil pH. The microbial biomass carbon-nitrogen ratio (Mcn) was significantly negatively correlated with mean annual precipitation (MAP), the microbial biomass carbon-phosphorus ratio (Mcp) was significantly positively

收稿日期:2025-11-20;修回日期:2026-02-26

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助(2024ZD02);阴山北麓荒漠草原生态修复技术研发与示范(2025YFHH0287)资助

作者简介:雷蕾(1996-),女,汉族,内蒙古鄂尔多斯人,博士研究生,主要从事草地生态经济学研究,E-mail: ivyleiben@163.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: nmgmglzh@126.com; nmghanguodong@163.com

correlated with aridity, and the microbial biomass nitrogen-phosphorus ratio (Mnp) was significantly positively correlated with soil pH. Random forest analysis indicated that MAP, aridity, and soil pH were the main driving factors of microbial biomass. This study deepened our understanding of the response of soil microorganisms to climate change and provided theoretical support for protecting the nutrient cycling function of grassland ecosystems.

Key words: Inner Mongolia grassland; Soil microbial biomass; Stoichiometric ratios; Biotic and abiotic factors

土壤微生物是土壤有机质分解转化的关键驱动者^[1]。微生物生物量是表征土壤养分有效性和土壤质量的重要指标,直接决定植物群落生长、结构以及生态系统的稳定性等,是影响生态系统结构和功能的关键因素^[2]。生态化学计量比是分析生态系统主要组成部分之间内部平衡和耦合关系的关键理论^[3]。其中,土壤微生物生物量计量比能够直观反映微生物群落代谢活动所需养分与土壤养分有效性之间的生物地球化学平衡,直接驱动微生物参与的养分循环过程,并调控土壤肥力形成、植物生长以及群落演替^[4]。因此,探究土壤微生物C:N:P计量比空间变异及其在环境梯度下的变化规律对于解释MBC、MBN以及MBP之间的相互作用及制约关系,理解全球变化背景下的生物化学元素循环具有重要意义^[1, 5-6]。

土壤碳氮磷内稳态在生态系统中扮演着至关重要的角色,它们不仅影响土壤肥力和植物生长,还与全球碳循环、氮循环和磷循环紧密相关^[7]。根据生态化学计量学原理,自然生态系统中MBC、MBN、MBP含量受环境条件和资源供给的双重调控,会维持相对恒定的化学计量比^[8]。有研究表明,资源供给差异可能驱动微生物C:N:P比值沿环境梯度发生适应性改变^[9]。例如,由于区域气候和土壤特征的系统性变化,不同生态系统的微生物化学计量比存在显著差异,并且MBC、MBN、MBP含量受土壤湿度和温度影响,在宏观尺度上会随着纬度的增加而显著增加^[2, 10]。有研究显示,土壤微生物量和土壤pH密切相关,通常pH较低的土壤微生物量也较低^[11, 12]。还有研究发现,土壤微生物C:N:P化学计量比与关键环境因子(如MAP、土壤pH值等)呈现显著相关关系^[13],然而,目前针对土壤微生物生物量碳氮磷沿降水梯度的分布和调节机制仍存在争议,尤其是在广泛的区域尺度上,其中对于内蒙古草地生态系统的研究更少。

草地生态系统是中国最重要的陆地生态系统之一^[14],内蒙古草原作为中国温带生态系统的关键区域,面积约占全国草原面积的20.6%,横跨草甸草原、典型草原与荒漠草原,具有明显的水热梯度

与土壤类型变化,是研究环境梯度下微生物生态化学计量特征的天然实验平台^[15-16]。本研究旨在通过深入探讨土壤微生物碳氮磷的动态平衡机制,揭示草地生态系统稳定性的关键因素。为满足这一需求,从内蒙古草原一条天然降水梯度沿线的57个地点收集并分析了数据,以期通过对草地土壤碳氮磷内稳态研究为草地资源的科学管理及生态保护提供理论价值^[17]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古草原生态系统(108°49′~120°65′E, 41°29′~51°13′N),海拔约1000~1500 m,大部分地区属于典型的温带大陆性季风气候,年均温约为在-5℃~10℃之间,年降水量约在30~530 mm之间^[18]。内蒙古植被和土壤呈明显地带性分布,自东向西延伸依次为草甸草原,典型草原和荒漠草原。主要优势种有贝加尔针茅(*Stipa Baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes song-orica*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)等^[15, 18]。

1.2 试验设计

本研究在内蒙古区域范围内选取了57个无明显人为干扰因素且符合草原植被地带规律的研究样点,样点之间的间隔约为50 km(表1)。主要涵盖三个草地生态系统:草甸草原(21处)、典型草原(16处)、荒漠草原(20处)。在每个样点选取地形地貌一致、土壤和植被类型相同的100 m×100 m的样地3块,作为3次重复,在各个重复样地内随机设置3个1 m×1 m的样方,使用直径5 cm的土钻采集表层土壤(0~10 cm)样品。一部分样品置于无菌封口袋中,立即放入冷藏箱(4℃)保存,用于微生物生物量和酶活性分析;另一部分样品自然风干,去除植物根系和石砾后,研磨并分别过0.15 mm和0.149 mm筛,保存于干燥器中用于评估物理化学性质。

1.2.1 土壤碳氮磷含量的测定 MBC, MBN,

表1 试验取样点

Table 1 Experimental sampling sites

序号 No.	草地类型 Grassland type	经度 Longitude	纬度 Latitude
1	草甸草原 Meadow steppe	119.78°E	51.14°N
2	草甸草原 Meadow steppe	119.78°E	51.14°N
3	草甸草原 Meadow steppe	119.48°E	50.68°N
4	草甸草原 Meadow steppe	119.30°E	50.4°N
5	草甸草原 Meadow steppe	119.74°E	50.18°N
6	草甸草原 Meadow steppe	119.98°E	49.86°N
7	草甸草原 Meadow steppe	119.68°E	49.47°N
8	草甸草原 Meadow steppe	119.84°E	49.08°N
9	草甸草原 Meadow steppe	119.71°E	48.51°N
10	草甸草原 Meadow steppe	119.53°E	47.95°N
11	草甸草原 Meadow steppe	119.30°E	47.63°N
12	草甸草原 Meadow steppe	119.91°E	47.05°N
13	草甸草原 Meadow steppe	120.00°E	46.67°N
14	草甸草原 Meadow steppe	120.34°E	46.43°N
15	草甸草原 Meadow steppe	120.65°E	46.31°N
16	草甸草原 Meadow steppe	120.33°E	46.09°N
17	草甸草原 Meadow steppe	120.32°E	45.79°N
18	草甸草原 Meadow steppe	119.84°E	45.64°N
19	草甸草原 Meadow steppe	119.36°E	45.86°N
20	草甸草原 Meadow steppe	116.11°E	45.83°N
21	典型草原 Typical steppe	118.98°E	45.75°N
22	典型草原 Typical steppe	118.84°E	45.74°N
23	典型草原 Typical steppe	117.72°E	45.67°N
24	典型草原 Typical steppe	117.19°E	45.71°N
25	典型草原 Typical steppe	116.81°E	45.36°N
26	典型草原 Typical steppe	116.33°E	45.02°N
27	典型草原 Typical steppe	115.39°E	43.90°N
28	典型草原 Typical steppe	115.93°E	44.37°N
29	典型草原 Typical steppe	115.78°E	44.73°N
30	典型草原 Typical steppe	115.93°E	43.89°N
31	典型草原 Typical steppe	116.69°E	44.64°N
32	典型草原 Typical steppe	116.24°E	44.21°N
33	典型草原 Typical steppe	116.58°E	44.02°N
34	典型草原 Typical steppe	116.76°E	43.62°N
35	典型草原 Typical steppe	116.56°E	43.55°N
36	典型草原 Typical steppe	117.04°E	43.37°N
37	典型草原 Typical steppe	116.35°E	43.38°N
38	荒漠草原 Desert steppe	115.41°E	43.88°N
39	荒漠草原 Desert steppe	114.81°E	43.98°N
40	荒漠草原 Desert steppe	114.23°E	43.87°N
41	荒漠草原 Desert steppe	113.64°E	43.90°N
42	荒漠草原 Desert steppe	113.28°E	43.66°N
43	荒漠草原 Desert steppe	113.03°E	43.26°N
44	荒漠草原 Desert steppe	112.72°E	42.91°N
45	荒漠草原 Desert steppe	112.22°E	42.39°N
46	荒漠草原 Desert steppe	112.05°E	42.02°N
47	荒漠草原 Desert steppe	111.89°E	41.78°N
48	荒漠草原 Desert steppe	111.89°E	41.79°N
49	荒漠草原 Desert steppe	111.06°E	41.29°N
50	荒漠草原 Desert steppe	111.21°E	41.35°N
51	荒漠草原 Desert steppe	110.69°E	41.52°N
52	荒漠草原 Desert steppe	110.11°E	41.69°N
53	荒漠草原 Desert steppe	109.94°E	41.47°N
54	荒漠草原 Desert steppe	109.70°E	41.60°N
55	荒漠草原 Desert steppe	109.20°E	41.60°N
56	荒漠草原 Desert steppe	108.90°E	41.50°N
57	荒漠草原 Desert steppe	108.50°E	41.44°N

MBP测定采用熏蒸法。将解冻土样在真空干燥器中经CHCl₃熏蒸24小时后,分别使用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄和0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃进行震荡浸提,提取液经Whatman GF/C滤膜过滤后,采用TOC分析仪(Shimadzu TOC-L系列)及连续流动分析仪(Skalar San++系统)分别进行有机碳、铵态氮和可溶性磷的定量分析^[2]。土壤总碳(Total Carbon, TC)与总氮(Total Nitrogen, TN)测定采用元素分析仪法测定,土壤总磷(Total phosphorus, TP)采用钼锑抗比色法测定,计算碳氮比(Carbon to nitrogen, C/N)、碳磷比(Carbon to phosphorus, C/P)、氮磷比(Nitrogen to phosphorus, N/P)。土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)采用高锰酸钾氧化-比色法,通过测定土壤中活性有机碳对特定浓度高锰酸钾的消耗量来定量。土壤速效氮(Soil available nitrogen, SAN)的测定采用碱解扩散法,利用稀碱溶液水解并将释放出的氨吸收滴定。土壤速效磷(Soil available phosphorus, SAP)的测定则针对本区域中性至碱性土壤特性,选用钼锑抗比色法进行提取与定量分析。

1.2.2 气候数据 本研究从World Climate数据库(版本2.1)及全球干旱指数与潜在蒸散数据库第3版获取内蒙古自治区1970—2000年期间的MAT、MAP与Aridity栅格数据集。基于该气候基准数据,运用地理信息系统软件ArcGIS 10.2(ESRI Inc., 美国Redlands)的空间分析模块,通过坐标定位与栅格值提取技术,对研究区域内布设的57个生态监测样点的长期气候参数进行了系统提取与空间化处理。其中干旱度指数(AI)计算方式为MAP与潜在蒸散量(Potential evapotranspiration, PET)的比值(AI=MAP/PET)。

1.2.3 其他土壤指标的测定 本研究采用环刀法(Cutting Ring Method)系统测定土壤容重(SBD)。土壤化学性质测定方面,基于标准土壤分析规范,将风干过筛后的样品按1:2.5(m:v)水土比制备悬浊液,使用STARTER 300型数字pH计(OHAUS Corporation, 美国)进行酸碱度测定,该仪器经标准缓冲液校准后精度达±0.01 pH单位^[19]。

1.3 数据统计与分析

通过Microsoft Excel 2010软件对数据进行整理,采用SPSS软件(IBM SPSS Statistics23)将数据

进行相关分析,计算最大值(Max)、最小值(Min)、标准差(Std)、平均值(Mean)及变异系数(CV)。利用 Origin 2024 绘制柱状图、土壤微生物碳氮磷与化学计量比的分布及关系的线性拟合图,用 Microsoft Excel 2010 软件绘制三线图。在 R 4.4.2(R Foundation for Statistical Computing, Vienna, AT)软件中,应用普通最小二乘法来绘制微生物碳氮磷计量比与非生物因子比如气候因子(MAT、MAP、Aridity),土壤因子(SBD、土壤pH值)之间的相关关系图。此外,采用随机森林(Random forest)模型评估其与气候及土壤因子中显著相关变量的重要性,试图找出影响土壤微生物 C:N:P 的关键驱动因子,该部分分析在 R 语言‘randomForest’软件包中完成,并通过‘rfPermute’包执行随机森林回归及获取变量的显著性。

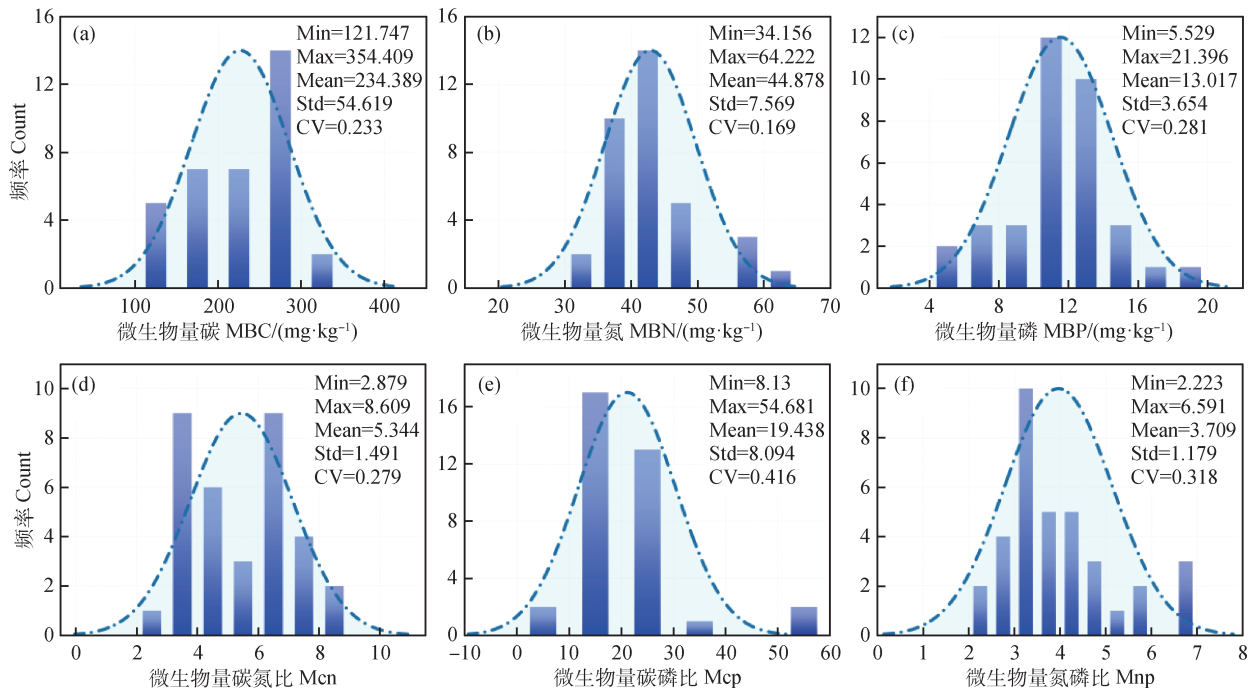


图1 土壤微生物量碳氮磷及化学计量分布

Fig. 1 Carbon, nitrogen, phosphorus and stoichiometric distribution of soil microorganisms

注:Min,最小值;Max,最大值;Mean,平均值;Std,标准差;CV,变异系数;Mnp,微生物量氮磷比;Mcp,微生物量碳磷比;Mcn,微生物量碳氮比。下同
Note: Min, minimum; Max, maximum; Mean, average; Std, standard deviation; CV, coefficient of variation Mnp, microbial biomass nitrogen to phosphorus ratio; Mcp, microbial biomass carbon-phosphorus ratio; Mcn, microbial biomass carbon-to-nitrogen ratio. The same as below

2.2 微生物与土壤化学计量比的关系

对微生物与土壤化学计量比进行回归分析发现,Mcn及Mcp分别与土壤可溶性碳与速效氮之比及土壤可溶性碳与速效磷之比呈显著正相关关系(图2)。其中,随着土壤微生物碳氮比的增加,土壤可溶性碳与速效氮的比呈现增加的趋势特征($P < 0.0001$, $R^2 = 0.412$)。随着Mcp的增加,土壤可溶性碳与速效磷的比值也呈现增加的趋势特征($P < 0.0001$, $R^2 = 0.237$)。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物碳氮磷及化学计量分布

由图1可知,草地土壤中MBC最大值为354.41 mg·kg⁻¹,最小值为121.75 mg·kg⁻¹,平均值为234.39 mg·kg⁻¹,变异系数为23%;MBN最大值为64.22 mg·kg⁻¹,最小值为34.16 mg·kg⁻¹,平均值为44.88 mg·kg⁻¹,变异系数为17%;MBP含量最大值为21.40 mg·kg⁻¹,最小值为5.53 mg·kg⁻¹,平均值为13.02 mg·kg⁻¹,变异系数为28%;Mcn最大值为8.61,最小值为2.88,平均值为5.34,变异系数为28%;Mcp最大值为54.68,最小值为8.13,平均值为19.44,变异系数为42%;Mnp最大值为6.59,最小值为2.22,平均值为3.71,变异系数为32%。

2.3 气候及土壤碳氮磷影响因子

由表2可知,在气候及土壤碳氮磷影响因子中,干旱度的最大值为0.88,最小值为0.50,平均值为0.74;降水量的最大值为447 mm,最小值为195 mm,平均值为301.75 mm;温度的最大值为6.03℃,最小值为-3.33℃,平均值为1.35℃;土壤容重的最大值为1.85 g·cm⁻³,最小值为0.84 g·cm⁻³,平均值为1.31 g·cm⁻³;土壤pH值最大值为8.09,最小值为6.69,平均值为7.33。

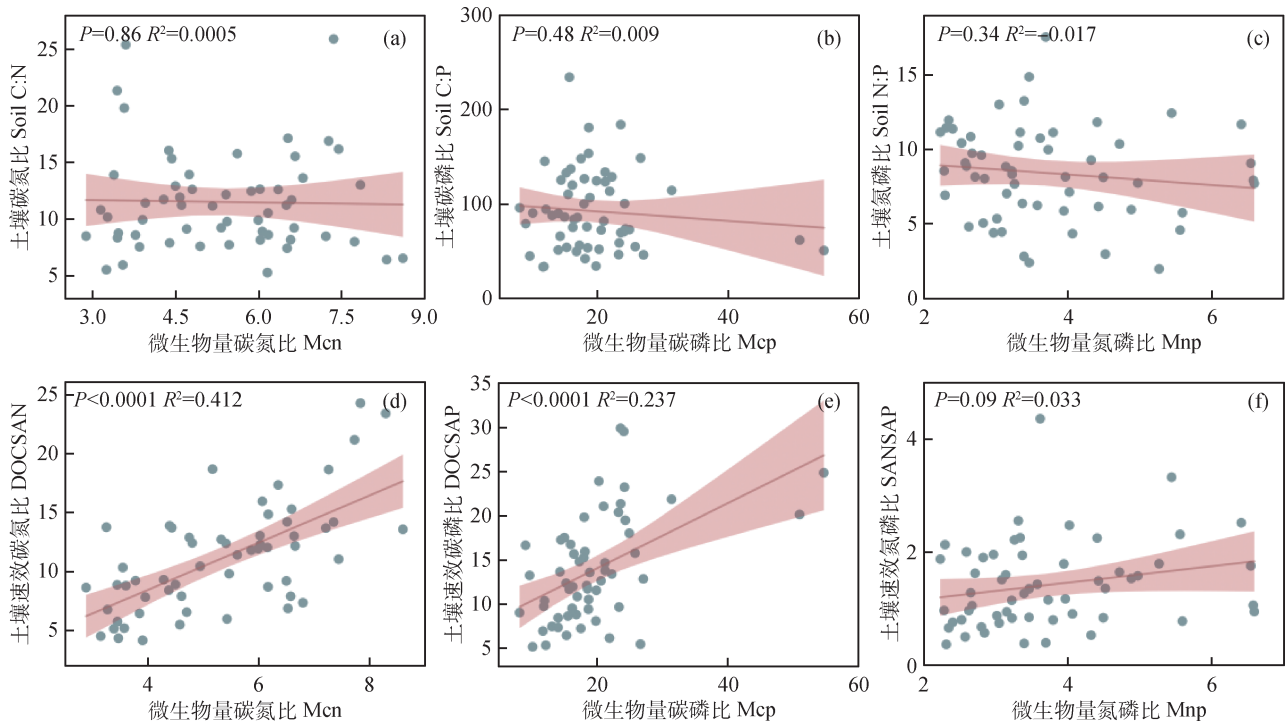


图 2 微生物与土壤化学计量比的关系

Fig. 2 Relationship between microbial and soil stoichiometric ratios

表 2 气候及土壤环境因素

Table 2 Climate and soil environmental factors

	标准差 Std	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min
土壤干旱度 Aridity	0.11	0.74	0.88	0.50
年降水量 MAP/mm	74.82	301.75	447.00	195.00
年平均气温 MAT/°C	2.37	1.35	6.03	-3.33
土壤容重 SBD/(g·cm ⁻³)	0.25	1.31	1.85	0.84
土壤酸碱度 pH	0.44	7.33	8.09	6.69

2.4 土壤微生物碳氮磷及其生态化学计量比与环境因子的相关性热图

由图 3 表明,Mnp 与 Aridity、MAT 及土壤 pH 值都呈显著正相关,Mcp 与 Aridity、MAT 呈显著正相关,与 MAP 成显著负相关,而 Mcn 与 Aridity 呈显著正相关,与 MAP 呈显著负相关。

2.5 土壤微生物碳氮磷生态化学计量比变化的主要驱动因子

由随机森林的结果表明,影响 Mcn 的主要因子是 Aridity 和 MAP,影响 Mcp 的主要因子是 Aridity,而土壤 pH 值则对 Mnp 影响最大(图 4)。

3 讨论

内蒙古草地 Mcn 和 Mcp 分别为 8.6 和 54.6,与

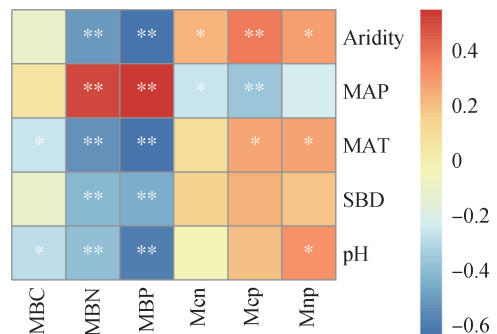


图 3 土壤微生物碳氮磷及其生态化学计量比与环境因子的相关性热图

Fig. 3 Correlation heat map of soil microbial carbon, nitrogen and phosphorus and their ecostoechiometric ratios with environmental factors

注:Aridity,干旱度指数;MAP,年平均降水量;MAT,年平均气温;SBD,土壤容重;pH,土壤酸碱度;Mnp,微生物量氮磷比;Mcp,微生物量碳磷比;Mcn,微生物量碳氮比;MBP,微生物量磷;MBN,微生物量氮;MBC,微生物量碳;*,表示 $P<0.05$,即结果在 0.05 水平上显著;**表示 $P<0.01$,即结果在 0.01 水平上显著。下同

Note: Aridity, soil aridity; AMP, nean annual precipitation; AMT, annual temperature; SBD, soil bulk density; pH, soil pH; Mnp, microbial biomass nitrogen to phosphorus ratio; Mcp, microbial biomass carbon-phosphorus ratio; Mcn, microbial biomass carbon-to-nitrogen ratio; MBP, microbial biomass phosphorus; MBN, microbial biomass nitrogen; MBC, microbial biomass carbon; *, indicates $P<0.05$, meaning the result is significant at the 0.05 level; **, indicates $P<0.01$, meaning the result is significant at the 0.01 level. The same as below

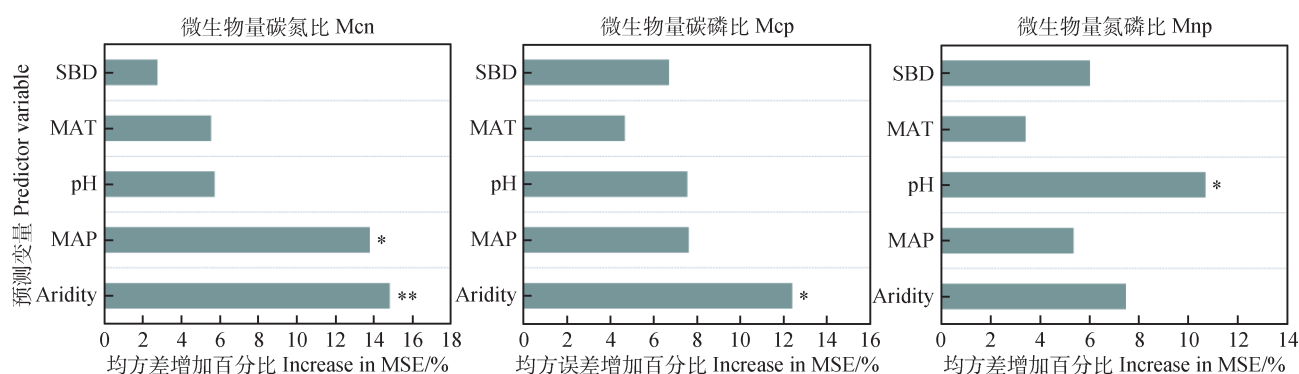


图4 各预测因子对土壤微生物碳氮磷比值的相对重要性

Fig. 4 Relative importance of predictors on the soil microbial carbon, nitrogen, and phosphorus ratios

注:*,表示 $P < 0.05$,即结果在0.05水平上显著;**表示 $P < 0.01$,即结果在0.01水平上显著

Note:*, indicates $P < 0.05$, meaning the result is significant at the 0.05 level; **, indicates $P < 0.01$, meaning the result is significant at the 0.01 level

全球森林和全球草地的Mcn和Mcp相比Mcp明显较低^[20],呈现出明显的空间变异特征,这一现象可能与内蒙古草地区域干旱气候和土壤贫瘠化特征密切相关^[21]。相较于青藏高原高寒草地和南方湿润草地,内蒙古草地年降水量减少约40%,在干旱胁迫下,微生物群落可能通过提高磷保留效率(表现为较低的Mcp)来应对水分限制所加剧的磷有效性不足,且土壤有效氮含量($0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著偏低,导致MBN同化效率降低^[22],表明微生物在资源受限环境中能够通过优化元素利用效率实现生态适应^[23]。此外,Mcn与MAP的显著负相关关系表明,随着水分条件的改善,微生物对氮的相对需求可能降低,暗示降水梯度可能是调控微生物氮代谢策略的关键因素。

在探讨微生物化学计量与土壤化学计量之间的相互作用时,我们发现微生物化学计量特征主要受土壤速效碳、氮、磷调控,而与土壤总碳氮磷含量无显著相关性。这可能是由于土壤中大部分碳氮磷以腐殖质结合态或矿物固定形态存在,难以被微生物直接利用^[24]。而速效养分作为微生物代谢的主要底物,对微生物的生长和代谢具有决定性作用,主要体现在以下几个方面:微生物对速效态碳、氮、磷的利用效率直接影响其生长速率和生物量积累;速效态碳、氮、磷的供应状况决定了微生物群落的结构和多样性;微生物在利用速效态碳、氮、磷的过程中,会调整其体内的化学计量学,以适应营养供应的变化^[25]。

多项研究显示,环境因素在微生物碳氮磷转化过程中发挥着决定性作用^[26, 27]。本研究结果表明,相较于土壤因子,气候因子对微生物碳氮磷计量比变异的解释力更高。首先,汪香君等^[28]研究发现温

度是微生物代谢活动的关键调节因子,对微生物的生长速率和代谢效率具有显著影响。究其原因是因为温度的波动会改变微生物细胞内酶的活性,进而影响其对碳、氮、磷等元素的吸收、转化和释放过程,导致微生物碳氮磷化学计量比的变动^[29]。本研究结果与其相关,即MAT与Mcp、Mnp呈显著正相关关系。此外,朱义族等^[30]研究表明降水作为微生物生存和代谢的基础,其水分含量的多少直接关系到微生物的生理状态和代谢活动。水分不足会限制微生物的代谢速率,减少碳氮磷的转化效率,从而影响微生物化学计量比的稳定性^[31]。另一方面,Zhang等^[32]研究发现干旱程度越高,对于草地地上及地下生物多样性的负面影响就越大,其中凋落物多样性减少会对土壤微生物含量产生显著影响^[33]。本研究中,MBN、MBP与MAP呈显著负相关,Aridity是Mcn与Mcp的主要影响因子。这可能是由于MAP和Aridity通过调控土壤水分有效性与蒸发需求,直接影响微生物活性、底物扩散速率及其结构变化。其次,本研究结果显示,土壤pH值是影响Mnp的主要驱动因子且呈显著正相关关系,土壤pH值也是微生物生长环境的重要参数,其变化会直接影响微生物细胞内酶的活性和稳定性^[34]。然而,不同微生物对pH值的适应范围存在差异,pH值的改变可能会抑制或促进特定微生物的生长,进而影响碳氮磷的转化效率和微生物体内化学计量比的构成^[35]。本研究中在接近中性pH值的土壤里,典型草原(pH值为7.15)中较大比例的底物分配给了微生物生物量合成,且pH值与MBN具有显著效应,这可能是典型草原较高的有机质积累为微生物群落提供了丰富的基质,从而具有更高的MBN^[18]。然而,草原生态系统内植物与微生物之间存在显著

的共生关系,植物群落结构的改变可能对土壤微生物多样性产生显著影响^[16]。所以,降水梯度变化下,不同草地类型植物群落物种组成及凋落物的改变对微生物群落的影响,仍有待进一步探究。

4 结论

本研究揭示了内蒙古草地生态系统土壤微生物碳氮磷化学计量比的空间变异格局及其主导驱动机制,Mcn、Mcp与MAP呈显著负相关,Mcn、Mcp及Mnp与Aridity呈显著正相关,Mnp与土壤pH值呈显著正相关。因此,内蒙古草地土壤微生物碳、氮、磷含量变化的主要驱动因子为Aridity、MAP与土壤pH值,为全球气候变化背景下草地生态系统微生物养分循环环境响应机制提供了一定的理论基础。

参考文献

- [1] 刘雨晴. 内蒙古草原土壤微生物C:N:P化学计量比特征及其驱动因子[D]. 南京:南京师范大学,2019:15-25
LIU Y Q. Ecological C: N: P stoichiometry of soil microorganisms and its driving factors in grassland of Inner Mongolia[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019: 15-25
- [2] 梁元也,范连连,马学喜,等. 新疆北部六种草地类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 干旱区研究,2024,41(10):1708-1718
LIANG Y Y, FAN L L, MA X X, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in six grassland types in northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(10): 1708-1718
- [3] 冯德枫,包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2017,23(2):400-408
FENG D F, BAO W K. Review of the temporal and spatial patterns of soil C: N: P stoichiometry and its driving factors[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, 23(2): 400-408
- [4] 陈婕妮,石思雨,钟羨芳,等. 武夷山不同海拔土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 生态学杂志,2024,43(10):2999-3004
CHEN J N, SHI S Y, ZHONG X F, et al. Soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus contents and their ecological stoichiometric characteristics along an elevation gradient in the Wuyi Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(10): 2999-3004
- [5] QIAO Y, WANG J, LIU H M, et al. Depth-dependent soil C-N-P stoichiometry in a mature subtropical broadleaf forest[J]. Geoderma, 2020(370): 114357
- [6] HUANG L, HU H, BAO W K, et al. Shifting soil nutrient stoichiometry with soil of variable rock fragment contents and different vegetation types[J]. Catena, 2023, 220: 106717
- [7] BI X, LI B, NAN B, et al. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under various grassland types along a transect in a mountain-basin system in Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(4): 612-627
- [8] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere[J]. Journal of Plankton Research, 2002, 25(9): 1183
- [9] LI Y, WU J S, LIU S L, et al. Is the C: N: P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China?[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): 2012GB004399
- [10] XU X F, THORNTON P E, POST W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems: global soil microbial biomass C, N and P[J]. Global Ecology and Biogeography, 2013, 22(6): 737-749
- [11] 万宏伟. 内蒙古高原成熟和退化羊草草原群落物种功能特性与土壤微生物量C、N、P对氮素添加响应[D]. 北京:中国科学院研究生院(植物研究所),2006:18-25
WAN H W. Responses of plant traits and soil microbial biomass C, N, P to nitrogen addition in mature and degraded Leymus chinensis steppe ecosystems in Inner Mongolia plateau[D]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2006: 18-25
- [12] 王锡媛,李邵宇,王琪,等. 中国北方温带草原土壤微生物残体碳含量及驱动因素[J]. 草地学报,2026,34(2):573-580
WANG X Y, LI S Y, WANG Q, et al. The Content and driving factors of soil microbial necromass carbon in temperate grasslands of northern China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 573-580
- [13] MOOSHAMMER M, WANEK W, SCHNECKER J, et al. Stoichiometric controls of nitrogen and phosphorus cycling in decomposing beech leaf litter[J]. Ecology, 2012, 93(4): 770-782
- [14] 潘越. 极端干旱对内蒙古不同退化程度温带典型草原土壤氮矿化的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024:18-19
PAN Y. The impact of extreme drought on soil nitrogen mineralization in typical temperate grasslands of Inner Mongolia with different degrees of degradation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024: 18-19
- [15] 徐龙超,李邵宇,白梅,等. 内蒙古不同类型草原植物群落叶片氮、磷含量变化研究[J]. 草地学报,2025,33(2):465-471
XU L C, LI S Y, BAI M, et al. Study on the changes of nitrogen and phosphorus contents in leaves of different types of grassland plant communities in Inner Mongolia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 465-471
- [16] 杨子琼,屈志强,田磊,等. 内蒙古荒漠草原典型植物物候对增温和氮添加的响应[J]. 草业科学,2025,42(10):2455-2465
YANG Z Q, QU Z Q, TIAN L, et al. Response of typical plant phenology to warming and nitrogen addition in Inner Mongolian desert steppe[J]. Rangeland Science, 2025, 42(10): 2455-2465
- [17] 田地,严正兵,方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. 植物生态学报,2021,45(7):682-713
TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry[J]. Chinese

- Journal of Plant Ecology, 2021, 45(7):682-713
- [18] 张峰,李邵宇,杨立山,等. 内蒙古不同草地类型植物群落地上净初级生产力的影响因素[J]. 草地学报, 2025, 33(3):902-909
ZHANG F, LI S Y, YANG L S, et al. Influencing factors of above-ground net primary productivity of plant communities under different grassland types in Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(3):902-909
- [19] 周清格,李邵宇,白梅,等. 内蒙古两种草地类型土壤微生物量氮、磷分布特征及影响因素[J]. 草地学报, 2024, 23(9):2854-2861
ZHOU Q G, LI S Y, BAI M, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil microbial biomass nitrogen and phosphorus in two grassland types in Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 23(9):2854-2861
- [20] GAO Y, LIU J, WANG D J, et al. Synergy and trade-off between plant functional traits enhance grassland multifunctionality under grazing exclusion in a semi-arid region [J]. Journal of Environmental Management, 2025(373):123877
- [21] 陈新月,姚晓东,曾文静,等. 北方农牧交错带草地土壤微生物量碳空间格局及驱动因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(2):250-260
CHEN X Y, YAO X D, ZENG W J, et al. Spatial pattern and driving factors of soil microbial biomass carbon in grassland in northern agro-pastoral transition zone [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(2):250-260
- [22] FENG L X, CAO B. Plant-root-litter-soil C, N, P stoichiometry and plant phosphorus accumulation and utilization response to warming and phosphorus input in desert steppe [J]. Global Ecology and Conservation, 2024(56):e03266
- [23] 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
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
- [24] 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):192-202
- [25] 聂秀青,王冬,周国英,等. 三江源地区高寒湿地土壤微生物生物量碳氮磷及其化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2021, 45(9):996-1005
NIE X Q, WANG D, ZHOU G Y, et al. Soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometric characteristics in Alpine wetlands in the Three Rivers Sources Region [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(9):996-1005
- [26] 马源,李林芝,张德罡,等. 高寒草甸根际土壤化学计量特征对草地退化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9):3039-3048
MA Y, LI L Z, ZHANG D G, et al. Responses of stoichiometric characteristics of rhizosphere soil to the degradation of Alpine meadow [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9):3039-3048
- [27] 王守兴,阿的哈则,欧立鹏,等. 三江源区人工草地建植对土壤-微生物化学计量特征的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(1):98-106
WANG S X, A D, OU L P, et al. Effects of Artificial Grassland Establishment on Soil--Microbial Stoichiometric Characteristics in the Three-River-Source Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):98-106
- [28] 汪香君,姜美彤,李森,等. 玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析[J]. 环境科学, 2023, 44(12):7014-7023
WANG X J, JIANG M T, LI S, et al. Functional genomics analysis of nitrogen and phosphorus transformation in maize rhizosphere microorganisms [J]. Environmental Science, 2023, 44(12):7014-7023
- [29] 徐贺光,李娅丽,何国兴,等. 陇中地区温性草原土壤化学计量特征对气候因子的响应[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11):3003-3010
XU H G, LI Y L, HE G X, et al. Response of soil stoichiometric characteristics to climatic factors in temperate steppe of Longzhong region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(11):3003-3010
- [30] 朱义族,李雅颖,韩继刚,等. 水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12):4323-4332
ZHU Y Z, LI Y Y, HAN J G, et al. Effects of changes in water status on soil microbes and their response mechanism: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12):4323-4332
- [31] 刘明蕊,刘世婷,马春燕,等. 草地植物和土壤对温度和降水变化的响应研究进展[J]. 生态学杂志, 2024, 43(12):3787-3796
LIU M R, LIU S T, MA C Y, et al. Research progress of the responses of grassland plants and soil to the variation of temperature and precipitation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(12):3787-3796
- [32] ZHANG M N, DELGADO-BAQUERIZO M, LI G Y, et al. Experimental impacts of grazing on grassland biodiversity and function are explained by aridity [J]. Nature Communications, 2023(14):5040
- [33] 王小平,杨雪,杨楠,等. 凋落物多样性及组成对凋落物分解和土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(17):6264-6272
WANG X P, YANG X, YANG N, et al. Effects of litter diversity and composition on litter decomposition characteristics and soil microbial community [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17):6264-6272
- [34] 王攀,余海龙,许艺馨,等. 宁夏燃煤电厂周边土壤、植物和微生物生态化学计量特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(16):6513-6524
WANG P, YU H L, XU Y X, et al. C:N:P ecological stoichiometry in soils, plants, microbes, and their influencing factors around the coal-fired power plants in Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16):6513-6524
- [35] 余雅楠,葛楠,王博,等. 内蒙古中西部荒漠草原区植物根系-土壤系统生态化学计量变化及环境响应[J]. 草地学报, 2025, 33(9):2921-2930
YU Y N, GE N, WANG B, et al. Ecological stoichiometric changes and responses to environment of plant root-soil system in desert grassland region of central and western Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(9):2921-2930