

# 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征

贾培龙<sup>1</sup>, 安韶山<sup>1,2</sup>, 李程程<sup>1</sup>, 曾全超<sup>1</sup>, 王宝荣<sup>1</sup>, 白雪娟<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨陵 712100;

2.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 选择黄土高原森林带自东向西8个地区优势植物的土壤作为研究对象,探究不同经度下土壤养分和土壤微生物生物量生态化学计量特征。结果表明:土壤碳、氮和微生物生物量碳、氮、磷含量随经度整体呈现出先减少后增加的变化趋势,土壤微生物生物量碳氮磷与土壤碳氮之间存在耦合关系,对环境因子的响应具有一致性。土壤磷含量空间分布比较稳定。土壤碳氮比为8左右,土壤有机碳与全氮的空间分布具有一致性。土壤微生物生物量碳氮比为9左右,微生物生物量氮磷比为5左右,反映了土壤微生物生物量碳氮、氮磷的比值较稳定,但土壤微生物生物量碳磷比呈现出先增大后减小的变化趋势。土壤养分及土壤微生物量碳氮磷与土壤水分含量相关性较强。土壤养分与土壤微生物量碳氮磷及其生态化学计量是环境因子综合作用的结果。

**关键词:** 黄土高原; 土壤碳氮磷; 土壤微生物生物量碳氮磷; 生态化学计量学; 经度

中图分类号:S154.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)01-0315-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.045

## Dynamics of Soil Nutrients and Their Ecological Stoichiometry Characteristics Under Different Longitudes in the East-West Forest Belt of the Loess Plateau

JIA Peilong<sup>1</sup>, AN Shaoshan<sup>1,2</sup>, LI Chengcheng<sup>1</sup>, ZENG Quanchao<sup>1</sup>, WANG Baorong<sup>1</sup>, BAI Xuejuan<sup>1</sup>

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** This study selected the forest soils from 8 regions under different longitudes in the Loess Plateau as research objects, and explored the soil nutrients, soil microbial biomass and their ecological stoichiometry under different longitudes. The results showed that the contents of soil carbon, nitrogen and microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus overall gave a trend of decreasing first and then increasing with the change of longitudes. There was a coupling relationship between soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and soil carbon and nitrogen, and the response to environmental factors was consistent. The spatial distribution of soil phosphorus content was stable. The soil carbon-nitrogen ratio was around 8, and the spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen was consistent. The soil microbial biomass carbon-nitrogen ratio was about 9, and the microbial biomass nitrogen-phosphorus ratio was about 5, which reflected that the soil microbial biomass carbon-nitrogen and nitrogen-phosphorus ratio were relatively stable, but the soil microbial biomass carbon-phosphorus ratio showed a trend of increasing first and then decreasing. Soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus had a strong correlation with soil moisture. Soil nutrients and soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and their ecological stoichiometry were the result of the comprehensive action of environmental factors.

**Keywords:** the Loess Plateau; soil carbon, nitrogen and phosphorus; soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus; ecological stoichiometry; longitude

收稿日期:2019-07-14

资助项目:国家自然科学基金项目(41671280)

第一作者:贾培龙(1993-),男,在读硕士研究生,主要从事水土保持效应评价研究。E-mail:458650325@qq.com

通信作者:安韶山(1972-),男,研究员,博士生导师,主要从事植被恢复与土壤质量评价、土壤微生物多样性、土壤结构与碳固定研究。E-mail:shan@ms.iswc.ac.cn

土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是植物生长发育所需养分的主要来源,土壤碳、氮、磷是主要的土壤养分成分。土壤微生物生物量是指土壤中除活的植物体外体积小于  $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$  的生物总量,主要包括细菌、真菌、藻类和原生动物等<sup>[1]</sup>。土壤微生物作为陆地生态系统的主要分解者,是联系植物和土壤的重要因素<sup>[2]</sup>。土壤微生物在获取资源构建自身生物量的同时,驱动着生态系统物质和能量的流通,调控土壤—植物—大气连续体之间的养分循环,进而影响生态系统的结构与功能<sup>[3]</sup>。土壤微生物生物量可以灵敏地反映环境因子、土地利用模式、农业生产活动和气候条件的变化,被用做评价土壤质量和反映微生物群落状态与功能变化的指标,能够较早地指示生态系统功能的变化<sup>[4]</sup>。而生态化学计量学是研究多种化学物质在生态系统相互作用和转化过程中平衡的科学<sup>[5]</sup>,是土壤养分循环与限制作用研究的重要工具<sup>[6]</sup>。土壤中元素比的动态变化能够指示生态系统中土壤质量的变化状况<sup>[7]</sup>,且土壤养分及土壤微生物碳、氮、磷元素循环以及他们之间的相互作用,对植被恢复过程中土壤元素比的组成有很大影响<sup>[8]</sup>。因此,研究土壤养分与土壤微生物生物量及其生态化学计量特征间的联系对理解陆地生态系统养分循环十分重要。

黄土高原历史上强烈的土壤侵蚀,导致水土流失严重。近年来开展了一系列的退耕还林(草)等生态工程的建设,并取得了初步的成效。随着植被恢复,植被的次生演替使得地面植物数量和物种多样性增加,导致土壤养分循环、生态系统等发生重大的变化。针对黄土高原,有关土壤养分和土壤微生物生物量生态化学计量学研究主要集中在植被恢复年限<sup>[9]</sup>、演替阶段<sup>[10]</sup>、植被类型<sup>[11]</sup>、土地利用方式<sup>[12]</sup>等对土壤养分和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响方面。黄土高原作为中国最大的土壤侵蚀区,地形复杂,沟壑纵横,植被多样,在黄土高原东西森林带,因经度不同,带来海陆位置、地形、土壤质地等变化,造成湿润程度、气温、土壤养分含量、容重和水分含量的差异,从而导致土壤微生物生物量变化,但目前黄土高原区域上对土壤养分和土壤微生物生物量及其生态化学计量特征随经度变化的研究并不多见。基于此,本研究针对黄土高原东西森林带,以随经度变化的 8 个地区优势植物林的土壤作为研究对象,探讨在黄土高原东西森林带上,土壤养分和土壤微生物生物量及其生态化学计量特征和经度变化及环境因子之间的关系,了解黄土高原土壤养分和土壤微生物相互作用及养分循环规律,为黄土高原退化生态系统的植被恢复与重建提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于黄土高原地区东西森林带( $34^{\circ}40'52.22''$ — $36^{\circ}49'40.06''\text{N}$ ,  $104^{\circ}17'12.70''$ — $113^{\circ}20'45.81''\text{E}$ ),属于半干旱大陆性季风气候区,平均气温  $7.1 \sim 11.9^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $453 \sim 571.2 \text{ mm}$ ,海拔  $1025 \sim 2134 \text{ m}$ 。黄土高原东西森林带,从东到西横跨山西、陕西和甘肃 3 省,跨南温带和中温带 2 个温度带,本次研究从东到西依次选取武乡县、古县、吉县、黄龙县、西峰市、平凉市、庄浪县、定西县 8 个相对具有代表性的地点进行研究(图 1)。

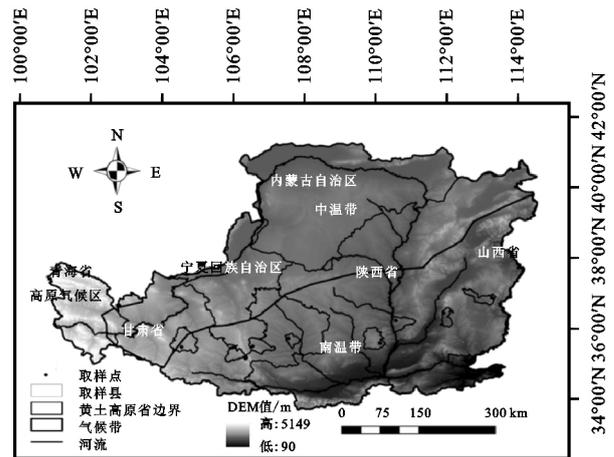


图 1 研究区域及样点分布

## 2 材料与方法

### 2.1 土壤样品采集

土壤样品于 2017 年 7 月采集,在 8 个研究地点林区中各选择 3 个优势物种作为研究对象(表 1)。在每个树种内设置 3 个样方,并保证其坡位坡向相似,样方大小为  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,在各个小样方按照“S”形路线选择 6 个样点进行采样,轻轻剥掉上层枯落叶层,用土钻分别采集 0—20 cm 深度土壤样品。将采集的土壤样品进行充分混匀后,按照“四分法”保留约 1 kg 土壤样品。带回实验室过 2 mm 筛,并去除植物根系、石块和凋落物等。其中一部分鲜土  $4^{\circ}\text{C}$  保存并尽快测定土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)含量,其余土壤样品经自然风干后先过 1 mm 筛,得到土壤样品再过 0.149 mm 筛,用于测定土壤有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)。

### 2.2 测定项目与方法

土壤养分和土壤微生物生物量于 2017 年 9—12 月在实验室进行测量,土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾—外加热容量法;土壤全氮测定使用凯氏定氮法测定;土壤全磷测定使用硫酸—高氯酸消化—钼蓝比色法,700 nm 波长测定(UV—2450 型紫外分光光度计)。土壤微生物生物量碳、氮、磷含量测定采用氯仿熏蒸法<sup>[13]</sup>。MBC 采用氯仿熏蒸— $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提—

TOC 分析仪(Phoenix, 800TOC)测定;MBN 采用氯仿熏蒸— $K_2SO_4$  浸提—过硫酸钾氧化法,220,275 nm 双波长测定;MBP 采用氯仿熏蒸— $NaHCO_3$  浸提—钼蓝比色法,700 nm 波长测定。

表 1 各样地基本情况

地点	纬度	经度	海拔/m	年平均气温/ $^{\circ}C$	年降水量/mm	优势物种
武乡	36°49'40.06"	113°20'45.81"	1851	9.86	524.42	辽东栎( <i>Quercus wutaishanica</i> ) 山杨( <i>Populus davidiana</i> ) 华北落叶松( <i>Larix principis-rupprechtii</i> Mayr)
古县	36°27'8.43"	111°53'50.10"	1429	11.55	481.78	油松( <i>Pinus tabulaeformis</i> ) 鹅耳枥( <i>Carpinus turczainowii</i> Hance) 栓皮栎( <i>Quercus variabilis</i> Bl)
吉县	36°11'9.95"	110°35'43.70"	1419	11.73	495.81	石榆( <i>Ulmus pumila</i> L.) 辽东栎( <i>Quercus wutaishanica</i> ) 白皮栎( <i>Quercus fabri</i> )
黄龙	35°36'22.75"	110°6'30.04"	1027	11.92	546.75	侧柏( <i>Platycladus orientalis</i> ) 栓皮栎( <i>Quercus variabilis</i> Bl) 油松( <i>Pinus tabulaeformis</i> )
西峰	35°42'13.54"	107°33'16.46"	1173	9.60	506.74	刺槐( <i>Robinia pseudoacacia</i> ) 油松( <i>Pinus tabulaeformis</i> ) 侧柏( <i>Platycladus orientalis</i> )
平凉	35°29'17.25"	106°36'4.48"	1724	9.01	483.90	山杨( <i>Populus davidiana</i> ) 蔷薇( <i>Rosa multiflora</i> Thumb) 榆树( <i>Ulmus pumila</i> L.)
庄浪	35°11'7.82"	106°20'11.96"	2023	9.01	500.00	落叶松( <i>Larix gmelinii</i> ) 锐齿槲栎( <i>Quercus alienavar. acuteserrata</i> Maxim) 山杨( <i>Populus davidiana</i> )
定西	34°40'52.22"	104°17'12.70"	2040	6.97	473.61	山杨×2( <i>Populus davidiana</i> ) 栎栎( <i>Quercus serrata</i> Thunb)

### 2.3 数据处理

土壤微生物生物量碳、氮、磷化学计量比采用质量比表示(摩尔比在生理学和生态学研究中的应用很普遍,而在关于陆地生态系统研究中多使用质量比<sup>[14]</sup>)。试验数据采用 Excel 2010 软件进行数据计算和整理,使用 OriginPro 2016 软件作图。使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,数据分析之前进行同质性检验,对于方差齐性不齐的数据进行对数转化。采用 Pearson 相关分析分析土壤养分、土壤微生物生物量碳、氮、磷含量以及相应的碳氮比、碳磷比、氮磷比之间及与气候、海拔、土壤含水量、植被类型等环境因子间关系(其中植被类型在采用 Pearson 分析时选作类型变量,不同植被类型赋不同值)。

## 3 结果与分析

### 3.1 黄土高原不同经度林地土壤微生物生物量碳氮磷分布特征

土壤 MBC、MBN、MBP 含量变化范围分别为 98.55~760.47, 10.42~65.95, 1.47~19.67 mg/kg(图 2),经计算得均值分别为 354.51, 35.53, 9.22 mg/kg, 变异系数分别为 75.6%, 52.4%, 30.1%。整体来看, MBC、MBN、MBP 含量均由西向东大致呈现出先

减少后增加的变化趋势,均在西峰达到最低值,但是均在吉县出现了突然增高的点。

### 3.2 黄土高原不同经度林地土壤有机碳、全氮和全磷含量分布特征

土壤 C、N、P 含量变化范围分别为 7.12~42.99, 0.95~4.11, 0.24~0.66 g/kg(图 3),经计算得均值分别为 18.88, 2.22, 0.51 g/kg, 变异系数分别为 60.38%, 54.35%, 11.04%。整体来看,土壤 C、N 含量均由西向东大致呈现出先减少后增加的变化趋势,且均在黄龙和西峰地区较小,且均在吉县出现与总体趋势不符的变化,土壤 C 含量在武乡最大, N 含量在定西最大。P 含量由西向东整体变化不大,在平凉地区 P 含量略低于其他地区。

### 3.3 黄土高原不同经度下土壤养分和土壤微生物生物量碳、氮、磷生态化学计量特征

土壤 C : N、C : P、N : P 变化范围分别为 6.14~10.80, 11.29~62.91, 1.83~6.84(图 4),计算得平均值分别为 8.15, 36.79, 4.42, 变异系数分别为 18.86%, 50.84%, 41.15%。土壤 MBC : MBN、MBC : MBP、MBN : MBP 变化范围分别为 6.66~14.19, 15.99~90.79, 3.52~8.27(图 4),计算得平均值分别为 9.22, 49.94,

5.15, 变异系数分别为 26.37%, 54.67%, 30.21%。

整体来看, 土壤 C : N 由西向东变化不大, 整体值在 8 左右浮动, 土壤 C : P 和 N : P 均由西向东大致呈现出先减小后增大的变化趋势, 均在西峰地区达到最低值。MBC : MBN 整体值在 9 左右浮动。MBC : MBP 由西向东大致呈现出先增大后减小的变化趋势。MBN : MBP 整体值在 5 左右浮动。

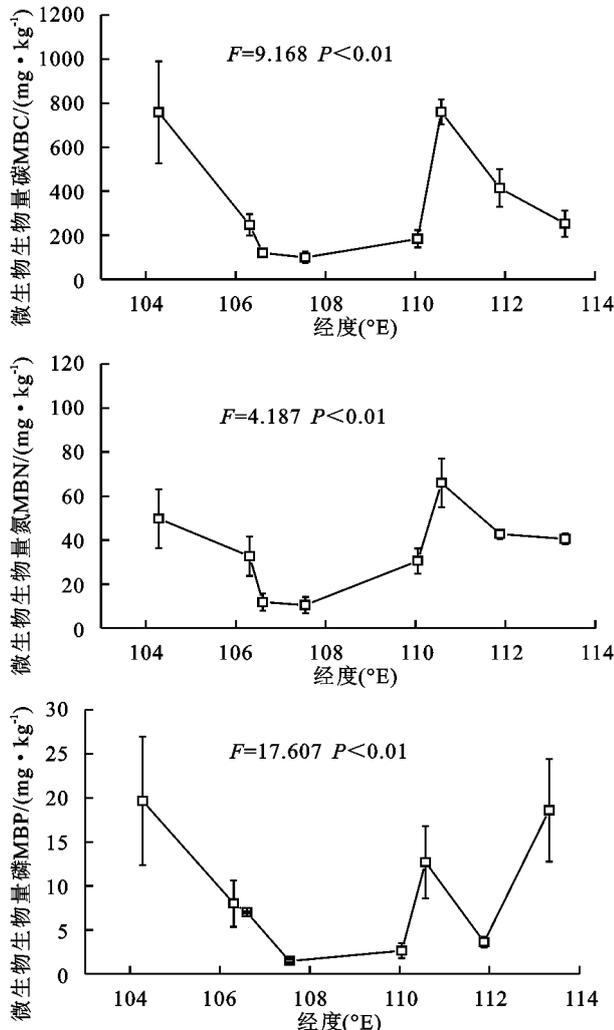


图 2 不同经度林地土壤微生物生物量碳、氮、磷的分布

### 3.4 土壤养分和土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征的相关性

由表 2 可知, 土壤 MBC 与 MBN 间存在极显著性相关关系, 与 MBP、N、N : P 之间存在显著性相关关系。土壤 MBN 与 MBP、C、N、N : P 间存在极显著性相关关系, 与 MBC : MBN、N : P 间存在显著性相关关系。土壤 MBP 与 C、N、N : P 间存在极显著性相关关系, 与 P、MBC : MBP、C : P 间存在显著性相关关系。土壤 C 与 N、C : P、N : P 间存在极显著性相关关系, 与 P、MBC : MBN、MBC : MBP 间存在显著性相关关系。土壤 N 与 P、N : P 间存在极显著性相关关系, 与 MBC : MBN、C : P 间存在显著性相关关系。土壤 MBC : MBP 与 C : P 间存在显著性相关关系。土壤 C : N 与 C : P 间存在极显著性相关关系。土壤 C :

P 与 N : P 间存在极显著性相关关系。

### 3.5 土壤养分和土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征与环境因子的关系

Pearson 相关分析结果(表 3)表明, 土壤养分和土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征中除了土壤 MBC 和 MBN : MBP 外都与环境因子有一定相关性。年均降水与土壤 C : N 显著相关, 与其他无相关关系; 年均气温与土壤 MBC : MBP 极显著相关, 与其他无相关关系; 海拔与土壤 C : P 和 MBC : MBP 显著相关, 与 N、MBP 和 N : P 极显著相关; 土壤含水量与土壤 MBN、MBP、C、N、P 极显著相关, 与 MBC : MBN、N : P 显著相关; 植被类型与土壤 MBP、N 和 N : P 显著相关。

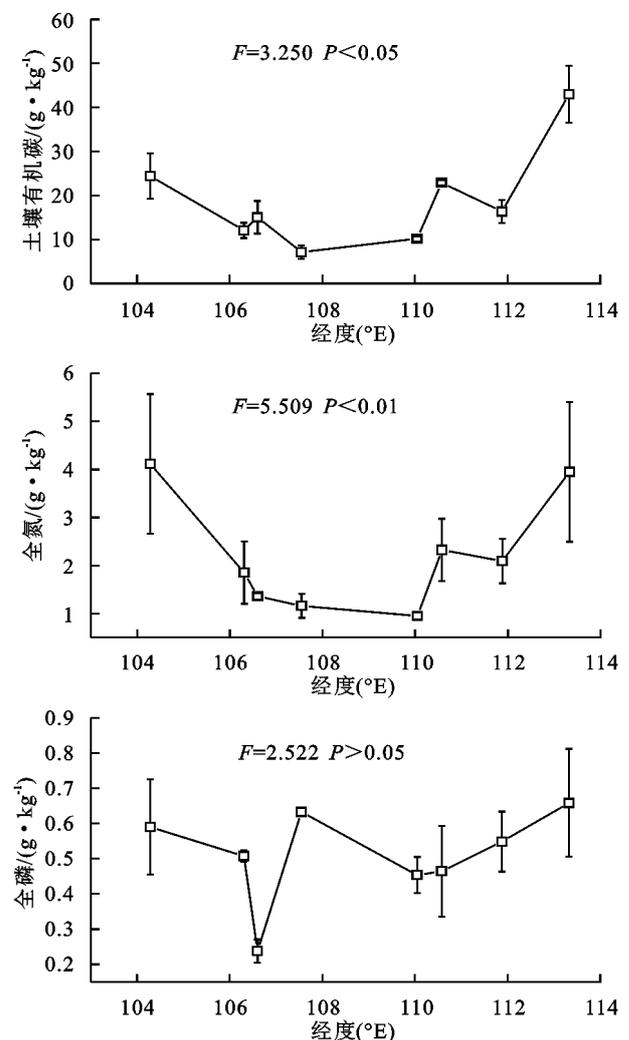


图 3 不同经度林地土壤有机碳、全氮、全磷含量分布特征

## 4 讨论

### 4.1 经度变化对土壤养分和土壤微生物生物量碳氮磷含量的影响

本研究结果表明, 随经度变化土壤 C、N 整体呈现出先减少后增加的变化趋势。这主要是由于在黄土高原森林带, 不同经度下气温、降水、海拔和成土作用机制均存在差异, 造成植被类型、土壤水分含量不

同,从而影响凋落物的质和量以及土壤微生物量,同时凋落物层能够调节微气候如水分、温度等,以致影响微生物活性和养分循环,这些因素共同作用导致土壤 C、N 空间分布变化较大。这与胡良军等<sup>[15]</sup>研究中,关于土壤 C、N 空间分布受气候条件和成土作用机制的控制,由于水热、植物、土壤微生物等的影响,造成空间分布变化较大的结论相符。与土壤 C、N 空

间变异性不同,土壤 P 的空间变异性很小,是因为磷是一种沉积元素,主要来源于岩石风化,方式单一,受成土母质影响,因此土壤 P 含量空间分布比较稳定。这与闫俊华等<sup>[10]</sup>研究结果基本相符。但研究中平凉地区 P 含量略低于其他地区,可能因为该地区土壤保水保肥能力较差,以及小气候影响导致水土流失, P 含量降低。

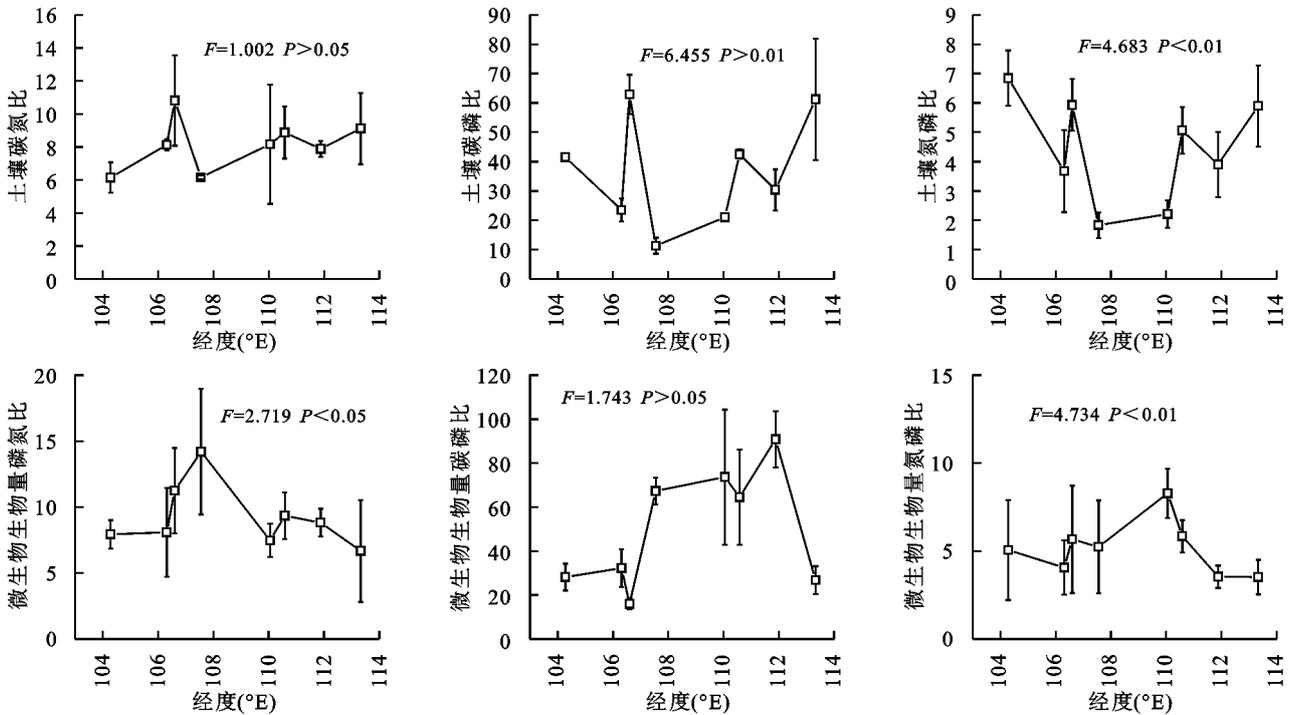


图 4 不同经度林地土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征

表 2 土壤和土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征的相关系数

指标	MBC	MBN	MBP	C	N	P	MBC:MBN	MBC:MBP	MBN:MBP	C:N	C:P	N:P
MBC	1.000	0.768**	0.515*	0.287	0.500*	0.163	0.122	0.065	-0.072	-0.241	0.111	0.462*
MBN		1.000	0.729**	0.539**	0.729**	0.385	-0.410*	-0.223	0.050	-0.122	0.238	0.422*
MBP			1.000	0.713**	0.792**	0.447*	-0.324	-0.488*	-0.373	-0.102	0.490*	0.720**
C				1.000	0.833**	0.426*	-0.407*	-0.430*	-0.271	0.246	0.762**	0.708**
N					1.000	0.538**	-0.422*	-0.251	-0.139	-0.232	0.460*	0.797**
P						1.000	-0.052	-0.007	0.004	-0.362	-0.304	-0.056
MBC:MBN							1.000	0.049	-0.261	-0.109	-0.191	-0.206
MBC:MBP								1.000	0.387	-0.284	-0.506*	-0.315
MBN:MBP									1.000	-0.068	-0.362	-0.242
C:N										1.000	0.522**	-0.120
C:P											1.000	0.735**
N:P												1.000

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

本研究结果土壤 MBC、MBN、MBP 变化较大,主要是在森林带上植被类型不同,土壤质地存在差异,且不同地点成林前土地利用方式及林龄不同,这些因素共同影响了土壤有机质的质与量,造成微生物生物量值变化。这与曾全超等<sup>[16]</sup>和李国辉等<sup>[17]</sup>关于土壤有机物质影响微生物生物量的结论相一致。

本研究中土壤 MBC、MBN、MBP 与 C、N 变化趋势大致相同,这与 Liptzin 等<sup>[18]</sup>关于土壤 C 和 N 主要与生物因素有关,且间存在良好的耦合关系研究结果相一致;黄土高原森林带上随经度变化,土壤 MBC、MBN、MBP 与 C、N 之间存在耦合关系,两者的空间分布具有同步性,对环境因子的响应具有一致性。

#### 4.2 经度变化对土壤养分和土壤微生物生物量碳氮磷生态化学计量特征的影响

本研究中土壤的 C : N 整体值在 8 左右, 变异系数为 18.86%, 随经度变化的差异性较小。这是由于在黄土高原森林带虽然土壤 C、N 含量随经度变化较大, 但是土壤 C、N 空间分布具有一致性, 因此土壤 C : N 较为稳定, 这与曾全超等<sup>[6]</sup>研究结果相一致。土壤 C : P、N : P 随经度变化大致呈现出先减小后增大的变化趋势, 变化趋势与土壤 C、N 变化趋势基本相同, 主要是土壤 P 相对而言变化幅度小且较稳定, 而土壤 C、N 的变化受气候影响显著且土壤 C、N 的空间分布具有一致性所致。这与李婷等<sup>[19]</sup>的研究结果相似。

表 3 土壤和土壤微生物生物量碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征与环境因子相关系数

指标	年均降水	年均气温	海拔	土壤含水量	植被类型
MBC	-0.310	-0.012	0.133	0.299	-0.329
MBN	-0.075	-0.158	0.263	0.556**	-0.255
MBP	-0.242	-0.339	0.477**	0.666**	-0.447*
C	0.082	-0.187	0.376	0.643**	-0.404
N	-0.146	-0.381	0.523**	0.799**	-0.450*
P	0.180	-0.121	-0.011	0.621**	-0.225
MBC : MBN	-0.305	0.243	-0.307	-0.488*	-0.041
MBC : MBP	0.359	0.494**	-0.353*	0.013	0.009
MBN : MBP	0.279	0.195	-0.221	0.118	0.107
C : N	0.414*	0.277	-0.234	-0.156	0.075
C : P	-0.040	-0.146	0.352*	0.217	-0.299
N : P	-0.337	-0.366	0.620**	0.506*	-0.474*

本研究中土壤 MBC : MBN 随经度变化整体值在 9 左右。土壤 MBN : MBP 整体值稳定在 5 左右。一定程度上可以说明土壤微生物在外界环境随经度变化下, 具有保持体内化学成分不变的能力, 即内稳性, 与王宝荣等<sup>[20]</sup>研究结果大致相符。而土壤 MBC : MBP 却随经度变化呈现出先增大后减小的趋势, 这可能是在不同经度下, 土壤 P 含量较低且稳定, 而微生物生物量变化较大, 使其对土壤磷素活化效率存在差异, 在微生物内稳性与土壤 P 含量限制的共同作用下, 土壤 MBP 的变化速率大于 MBC, 从而导致土壤 MBC : MBP 随经度变化呈现出先增大后减小的趋势。

#### 4.3 土壤养分和土壤微生物生物量碳氮磷生态化学计量特征之间及其与环境因子间的相关关系

本研究中 MBC 与 MBP 呈显著相关, MBN 与 MBC、MBP 呈极显著相关, 土壤 C、N 与土壤微生物量呈显著或极显著相关, 土壤 P 与 MBC、MBN 之间无显著关系。这是土壤 C、N、MBC、MBN 和 MBP 空间分布的变化较大且对环境因子的响应具有一致性, 而土壤 P 相对变化幅度小所造成的。土壤 C、N、P 计量关系与土壤 MBC、MBN、MBP 计量关系间几乎不存在相关性, 但土

壤 C : P 和 MBC : MBP 呈显著负相关。这是由于微生物具有一定内稳性, 但同时存在土壤 P 养分限制作用, 二者共同影响致使土壤 MBC : MBP 随经度变化呈现出先增大后减小的趋势, 土壤 C、P 空间分布造成土壤 C : P 随经度变化呈现出先减小后增大的趋势, 从而造成两者呈显著负相关。

土壤含水量与土壤 N、P 和土壤 MBC、MBN、MBP 呈极显著相关, 这是因为土壤含水量会影响微生物活性, 从而影响有机质分解速率, 导致土壤养分及微生物生物量碳氮磷含量变化, 这与李洪杰等<sup>[21]</sup>研究结果基本一致。土壤 MBP、N 与植被类型显著相关, 而土壤 MBC、MBN、C、P 与植被类型无关; 海拔与土壤 MBP、N 呈极显著正相关, 与土壤 C、P、MBC、MBN 无相关关系; 年均温度仅与土壤 MBC : MBP 相关; 降水仅与土壤 C : N 相关。这是由于环境因子随经度发生变化, 各因子综合作用降低了植被类型、海拔、温度和降水等单一环境因子对土壤与土壤微生物间的元素循环及其相互作用的影响程度。土壤养分与土壤微生物量碳氮磷及其生态化学计量, 受环境因子的影响, 与以往许多其他区域尺度上如李洪杰等<sup>[21]</sup>、吴建平<sup>[22]</sup>和李丹维等<sup>[23]</sup>研究结果并不完全一致, 这可能是在黄土高原森林带上研究样地随经度变化, 其海陆位置、地形等均有所改变, 从而带来研究地点之间的湿润程度和气温等环境因子变化及共同作用更为复杂。环境因子综合作用掩盖了单一环境因子对土壤养分及土壤微生物的作用。

## 5 结论

(1) 黄土高原森林带土壤 C、N 随经度变化整体呈现出先减少后增加的变化趋势, 土壤 P 空间变异性小, 整体随经度变化不大, 土壤 MBC、MBN、MBP 整体变化趋势与土壤 C、N 变化相似, 表明土壤 P 空间分布比较稳定, 土壤 MBC、MBN、MBP 与土壤 C、N 之间存在耦合关系, 对环境因子的响应具有一致性。

(2) 黄土高原森林带土壤的 C : N 随经度变化无明显的变化, 比值在 8 左右, 表明土壤有机碳与全氮的空间分布具有一致性。相比土壤的 C : N, 土壤 C : P、N : P 与土壤 C、N 间均呈显著性或极显著性相关关系, 整体呈现出先减少后增加的变化趋势。土壤 MBC : MBN 在 9 左右, 土壤 MBN : MBP 在 5 左右, 反映了 MBC : MBN、MBN : MBP 较稳定, 但土壤 MBC : MBP 呈现出先增大后减小的变化趋势。

(3) 土壤含水量与土壤 MBC、MBN、MBP、N、P 极显著相关, 植被类型与土壤 MBP、C、N 显著相关。土壤养分与土壤微生物量碳氮磷及其生态化学计量是环境因子综合作用的结果。

## 参考文献:

- [1] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [2] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 0-227.
- [3] 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化[J]. 植物生学报, 2016, 40(12): 1257-1266.
- [4] He Z L, Yang X E, Baligar V C, et al. Microbiological and biochemical indexing systems for assessing quality of acid soils [J]. Advances in Agronomy, 2003, 78(2): 89-138.
- [5] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003, 25(9): 1183-1183.
- [6] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 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, 2015, 30(5): 870-879.
- [7] Michaels A F. Biogeochemistry: The ratios of life [J]. Science, 2003, 300(5621): 906-907.
- [8] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An analysis of global change [J]. Quarterly Review of Biology, 1997, 54(4): 353-423.
- [9] 杨菁, 谢应忠, 吴旭东, 等. 不同种植年限人工苜蓿草地植物和土壤化学计量特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 870-879.
- [10] 闫俊华, 刘兴诏, 褚国伟, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.
- [11] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3467-3476.
- [12] 袁大刚, 张甘霖. 不同利用方式下南京城市土壤碳、氮、磷的化学计量学特征[J]. 中国土壤与肥料, 2013(3): 19-25.
- [13] 吴金水, 肖和艾, 陈桂秋, 等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 70-78.
- [14] Sabine G Å. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance [J]. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [15] 胡良军, 邵明安, 杨文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J]. 草业学报, 2004, 13(6): 14-20.
- [16] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3598-3605.
- [17] 李国辉, 陈庆芳, 黄懿梅, 等. 黄土高原典型植物根际对土壤微生物生物量碳、氮、磷和基础呼吸的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 976-983.
- [18] Liptzin C D. C : N : P Stoichiometry in soil: Is There a "redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [19] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [20] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 247-259.
- [21] 李洪杰, 刘军伟, 杨林, 等. 海拔梯度模拟气候变暖对高山森林土壤微生物生物量碳氮磷的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 599-605.
- [22] 吴建平, 韩新辉, 许亚东, 等. 黄土丘陵区不同植被类型下土壤与微生物 C、N、P 化学计量特征研究[J]. 草地学报, 2016, 24(4): 783-792.
- [23] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 160-170.
- [24] and bioavailability are controlled by rhizosphere pH in rape grown in an acidic Cu-contaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(12): 3363-3369.
- [33] 高文文, 刘景双, 王洋. 有机质对冻融黑土重金属 Zn 赋存形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 147-151.
- [34] 赵一鸣, 董颖博, 林海, 等. 土壤理化性质对重金属形态的影响[J]. 农业工程, 2018, 8(12): 38-43.
- [35] 郑顺安, 陈春, 郑向群, 等. 污染土壤不同粒级团聚体中铅的富集特征及其与叶类蔬菜铅吸收之间的相关性[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 556-564.
- [36] 李益斌. 解磷菌改良典型重金属污染土壤的应用研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2018.

(上接第 314 页)

- [28] 张良运, 李恋卿, 潘根兴, 等. 重金属污染可能改变稻田土壤团聚体组成及其重金属分配[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2806-2812.
- [29] 陈岩, 朱先芳, 季宏兵, 等. 北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 219-228.
- [30] 邓秋凤, 胡慧萍, 李珊珊, 等. 贵州土法炼锌废渣的矿物学特征及综合利用[J]. 矿产综合利用, 2013(5): 55-59.
- [31] 吴婷, 李小平, 蔡月, 等. 铅污染不同粒径土壤的重金属地球化学行为与风险[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4212-4221.
- [32] Chaignon V, Quesnoit M, Hinsinger P. Copper availability