

DOI: 10.5846/stxb202010122597

李炎龙, 季荣博, 吴云, 秦泽峰, 彭懿, 盖京苹, 冯固. 我国北方 3 种典型土壤-作物体系中微生物量磷库特征. 生态学报, 2022, 42(8): 3325-3332.

Li Y L, Ji R B, Wu Y, Qin Z F, Peng Y, Gai J P, Feng G. Soil microbial biomass phosphorus pool in farmlands of the Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3325-3332.

我国北方 3 种典型土壤-作物体系中微生物量磷库特征

李炎龙, 季荣博, 吴云, 秦泽峰, 彭懿, 盖京苹*, 冯固

中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

摘要: 土壤微生物量磷 (Microbial Biomass Phosphorus, MBP) 是土壤磷组分中最为活跃的形态, 在土壤磷素的形态转化与生物地球化学循环过程中起着关键作用, 是植物可利用磷的重要来源。研究土壤 MBP 库容的大小对于充分认识微生物的固磷潜力和掌握土壤磷素循环与转化能力意义重大。以我国北方农田 3 种典型的土壤-作物体系为研究对象, 基于定点采样, 通过分析测定采集的 362 个表层 (0—30 cm) 土壤样品来量化不同土壤-作物体系 MBP 库容的大小。结果表明: 黑土-春玉米、潮土-冬小麦/夏玉米、灰漠土-棉花体系表层土壤 MBP 平均含量分别为 17.36、14.45、8.75 mg/kg, 且不同土壤-作物体系间 MBP 含量存在显著差异; 3 种土壤-作物体系表层土壤 (0—30 cm) MBP 库容的大小分别为 83.60、54.26、39.80 kg P/hm², 其储存的磷在数量上相当于当季作物需磷量的 1.10—2.73 倍, 表明土壤 MBP 库是农田生态系统中一个不容忽视的巨大有效养分磷储库。其库容的大小受土壤性质和气候因素的共同影响, 土壤 pH、有机碳、年均气温和年均降雨量是我国北方农田土壤 MBP 库容大小的主要影响因素, 它们能够解释 3 种典型土壤-作物体系 MBP 的 57% 变异。研究结果有助于深入理解土壤 MBP 库潜在供磷能力, 可为磷肥的减施增效提供理论参考。

关键词: 土壤微生物量磷库容; 供磷能力; 土壤磷素循环与转化能力; 生物资源

Soil microbial biomass phosphorus pool in farmlands of the Northern China

LI Yanlong, JI Rongbo, WU Yun, QIN Zefeng, PENG Yi, GAI Jingping*, FENG Gu

College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Microbial biomass phosphorus (MBP) is one of the most active forms of phosphorus in soil. Soil MBP plays a pivotal role in the transformation and biogeochemical cycling of soil phosphorus, which is considered to be an important source of available phosphorus for plants. Exploring size of the soil MBP pool is of important significance to fully understand the potential of phosphorus fixation in microorganisms, and grasp the capacity of soil phosphorus transformation and circulation. Three typical soil-crop systems in farmlands of the Northern China were selected to investigate size of soil MBP pool in agroecological system. A total of 362 surface soil samples (0—30 cm) were collected from the research area based on fixed-point sampling. The results showed that there were significant differences in MBP content among three typical soil-crop systems. The average contents of soil MBP in the topsoil (0—30 cm) layer under black soil-spring maize, fluvo-aquic soil-winter wheat/summer maize and grey desert soil-cotton systems were 17.36, 14.45 and 8.75 mg/kg, respectively. Sizes of soil MBP pool of black soil-spring maize system, fluvo-aquic soil-winter wheat/summer maize system and grey desert soil-cotton system were 83.60, 54.26 and 39.80 kg P/hm², respectively, in the topsoil (0—30 cm) layer. In the three typical soil-crop systems, the amount of phosphorus stored in the soil MBP pool was 1.10—2.73 times of the amount of phosphorus required by one season crop, which indicates soil MBP pool is a huge source of available phosphorus for plants in agroecological system. Further analysis showed the size of MBP pool was influenced by the physical-chemical properties of

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200203)

收稿日期: 2020-10-12; 网络出版日期: 2021-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaijp@cau.edu.cn

soil and climate factors. A linear mixed-effects model showed that soil pH, organic carbon, mean annual temperature and mean annual precipitation are the main factors affecting the size of soil MBP pool, which can explain 57% of the variation of soil MBP in three typical soil-crop systems. This is the first study that size of soil MBP pool in different soil-crop systems is quantified in the farmland in the Northern China, which is of great importance to further understanding the potential phosphorus supply capacity of soil MBP pool. Our results indicate that soil MBP pool is a potential available phosphorus pool and may serve as a scientific basis for reduction of phosphorus fertilizer application and regionalized nutrient management. In the present study, we emphasize that the importance of microorganisms as a potential available phosphorus nutrient pool, and suggest regulating soil MBP pool size by changing content of soil organic carbon so as to utilize its phosphorus supply capacity in the future.

Key Words: soil microbial biomass phosphorus pool size; phosphorus supply capacity; soil phosphorus circulation and transformation capacity; biological resource

土壤微生物量磷(Microbial Biomass Phosphorus, MBP)既是土壤磷素循环与转化的“中转站”,又是土壤磷素生物肥力的主要贡献者,在植物磷素生物有效性的再分配过程中发挥着关键作用^[1]。尽管 MBP 在土壤中仅占总磷库的 1.6%左右^[2],但其周转快、易矿化,是土壤磷组分中最为活跃的形态,能够随着微生物自身不断更新而周转释放出来供植物和土壤中其他的微生物吸收利用,调节着土壤磷素的矿化和固定过程,在很大程度上能够反映土壤活性磷库的容量和周转强度^[3-5]。此外,土壤 MBP 对周围环境条件变化极为灵敏,能及时准确反映生境条件改变和人类活动引起的土壤磷素固定和周转,可作为表征土壤供磷能力早期变化的敏感指标^[6-7]。

近年来,学者们对于土壤 MBP 进行了大量的研究,从空间“点”上的研究到宏观“面”上的研究均有报道。然而,这些研究大多集中在它的季节性含量或浓度变化特征^[8-10]、周转通量^[11-13]、影响因素^[14-17]和对其在小区域尺度上空间含量变化规律的揭示^[18-20]等方面,仅有少数文献报道了土壤 MBP 库容的大小及其对植物磷营养的潜在贡献能力。例如,Achat 等^[21]估算了法国西南地区松树林表层(0—15 cm)土壤 MBP 库容的大小为 10.6—21.6 kg P/hm²,远高于松树林每年 0.3—2 kg P/hm²的需磷量。张成娥和王栓全^[22]的研究结果也表明,在不同作物秸秆腐熟过程中土壤 MBP 的年流通量在数量上是植物每年吸磷量的 4—10 倍。因此,土壤 MBP 库是一个巨大的活性磷养分储库,在补充土壤速效磷库和调控植物磷有效性再分配过程中扮演着重要的角色。尽管土壤 MBP 库在提高土壤磷素生物有效性等方面发挥着巨大的潜在贡献,但我们在农田生态系统中土壤 MBP 库对于植物养分磷吸收的贡献潜力方面的认识还很有限。

目前,由于大空间尺度样品采集和保存的困难性以及后期样品测定任务的繁重性,我国北方集约化农田生态系统中 MBP 库容的大小及其影响因素尚未被系统研究。定量农田土壤 MBP 库容的大小有助于深入了解土壤磷素循环与转化能力以及掌握土壤微生物的固磷潜力。本研究以我国北方农田 3 种典型的农田土壤-作物体系(黑土-春玉米体系、潮土-冬小麦/夏玉米轮作体系和灰漠土-棉花体系)为研究对象,基于 GIS 定点采样,通过大尺度的调查案例分析,来量化我国北方农田典型土壤-作物体系 MBP 库容的大小,揭示其在大空间农田尺度上的影响因素,以期优化我国农田土壤磷肥管理、评估土壤微生物的固磷能力及其对改善作物磷营养的贡献潜力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究自 2017—2019 年期间分别从我国北方三大农产区(东北区、华北区、西北区)45 个采样点收集土壤样品,这些采样点包括我国北方地区广泛分布的土壤(黑土、潮土和灰漠土)、作物(小麦、玉米和棉花)和气候(半湿润、干旱)类型,在空间上横跨一个较大的纬度梯度(33°11'49"—44°20'),年均气温为 4.6—14.5℃,年

均降雨量为 152.6—868 mm。研究区各采样点的分布如下所示(图 1)。

1.2 研究方法

运用“S”型采样法,采集耕作层(0—30 cm)土壤样品,每个采样点随机选取 5 个取样点混匀后作为一个土壤样品放入装有冰袋的冰盒。回实验室后,去除动植物残体和较大的石土块,过 2 mm 筛,筛过的土壤样品分为两份,一份保存至 4℃ 冰箱,用于土壤 MBP 的测定,另一份置于室温条件下自然风干,用于土壤理化指标的测定。本次采集黑土-春玉米体系土壤样品 159 个,潮土-冬小麦/夏玉米轮作体系土壤样品 135 个,灰漠土-棉花体系土壤样品 68 个,共计 362 个土壤样品。

土壤 MBP 采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L 碳酸氢钠溶液浸提—钼锑抗比色法测定^[23],运用酶标仪测定比色后的吸光度值,在进行熏蒸之前,将土壤含水率调至合适范围(10%—15%,干基),在恒温培养箱里培养一周后,称取一定量土壤样品进行熏蒸测定。土壤 MBP 的计算公式为:

$$MBP = (F - U_F) / (K_p \times R) \quad (1)$$

式中, F 为熏蒸土壤中碳酸氢钠溶液所浸提的磷量(mg/kg), U_F 为不熏蒸土壤中碳酸氢钠溶液所浸提的磷量(mg/kg), K_p 为土壤 MBP 的转换系数,取值为 0.4, R 为加入的无机磷的回收率。回收率(R)计算公式为:

$$R = (U_A - U_F) / V \times 100\% \quad (2)$$

式中, U_A 为土壤中加入 250 μ g/mL 磷酸二氢钾溶液后,用碳酸氢钠溶液浸提所得到的磷量(mg/kg), V 为加入磷酸二氢钾的体积,为 0.5 mL。

土壤 MBP 库容的计算公式为:

$$P = D \times W \times C \quad (3)$$

式中, P 表示土壤 MBP 库容(kg P/hm²); D 表示采样深度(cm); W 表示土壤容重(g/cm³); C 表示土壤 MBP 含量(mg/kg),不同地区当季作物需磷量数据来源于张福锁等《中国主要作物施肥指南》^[24]。

土壤理化指标的测定参照鲁如坤^[25]的方法,土壤 pH 使用 pH 计测定(水:土=2.5:1),土壤电导率使用电导仪测定(水:土=5:1),土壤含水率采用烘干法测定,土壤容重采用环刀法测定,土壤有机质采用浓 H₂SO₄-K₂CrO₄ 外加热法测定,土壤速效磷采用 Olsen-P 法测定。

1.3 数据处理与统计分析

采样点的定位图是基于 2000 年全国 1:400 万土壤类型的矢量图(来源于中科院南京土壤所),运用 Arcgis10.7 软件进行筛选和检索以确定采样点的土壤类型。采用 Excel 2019 和 Origin Pro 2017 软件对试验数据进行整理、计算和绘图,运用 SPSS 25.0 软件对不同土壤-作物 MBP 含量数据进行单因素方差统计分析(One-way ANOVA),利用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验,显著性水平为 0.05,运用 R 4.0.3 软件的 nlme 3.1-152 包的 lme 模块构建线性混合效应模型^[26],该模型以土壤 MBP 为因变量,土壤因子和气候因子为固定效应因子,采样地点为随机效应因子^[27-28]。

2 结果与分析

2.1 采样区土壤理化性质和作物产量

不同土壤-作物体系的土壤 pH、电导率、有机碳、速效磷、碳磷比(C/P)、含水率和容重等土壤理化指标及作物产量的数据如下所示(表 1)。在 3 种典型的农田土壤中,黑土的有机碳和速效磷含量较高,土壤 C/P 比

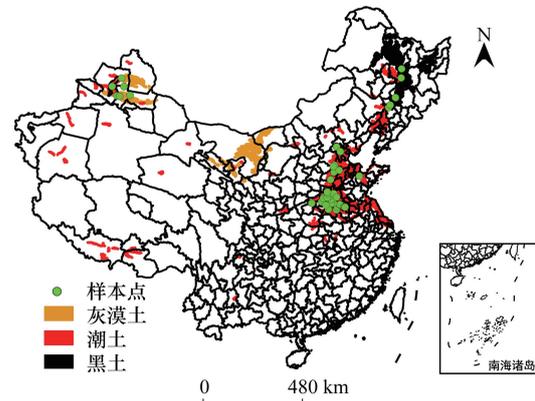


图 1 采样点的分布图

Fig.1 Distribution map of sampling points

介于 189.73—1968.65,且土壤呈弱酸性。潮土和灰漠土是两种典型的石灰性农田土壤,但灰漠土的盐分较高,两者的土壤 C/P 比分别为 94.56—2496.45 和 92.15—1430.98。在黑土-春玉米、潮土-冬小麦、潮土-夏玉米和灰漠土-棉花种植体系中,当季作物的产量分别为 7639—15056 kg/hm²、6750—8250 kg/hm²、6750—9750 kg/hm²和 1773—2595 kg/hm²。

表 1 不同土壤-作物体系土壤理化性质及作物产量

Table 1 Soil physical-chemical properties and crop yield of different soil-crop systems

土壤-作物体系 Soil-crop systems	黑土-春玉米 Black soil-spring maize	潮土-冬小麦 Fluvo-aquic soil- winter wheat	潮土-夏玉米 Fluvo-aquic soil- summer maize	灰漠土-棉花 Grey desert soil-cotton
样本数 Number of samples	159	93	42	68
pH	4.85—5.59	7.46—8.87	7.51—8.41	7.94—9.68
电导率 Electric conductivity/($\mu\text{s}/\text{cm}$)	607.00—1851.00	640.00—3150.00	518.00—2930.00	692.00—6840.00
有机碳 Organic carbon/(g/kg)	12.83—28.06	4.67—19.25	7.07—17.82	2.42—12.89
速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	12.12—101.65	4.23—109.14	4.40—75.30	3.95—46.19
土壤碳磷比 Soil carbon phosphorus ratio	189.73—1968.65	94.56—2496.45	132.20—1990.63	92.15—1430.98
含水率 Moisture content/%	11.49—14.08	5.00—19.79	6.26—15.93	10.54—17.18
容重 Bulk density/(g/cm ³)	1.27—1.52	1.20—1.50	1.04—1.56	1.19—1.66
产量 Yield/(kg/hm ²)	7639.00—15056.00	6750.00—8250.00	6750.00—9750.00	1773.00—2595.00

2.2 不同土壤-作物体系微生物量磷含量变化

不同土壤-作物体系表层土壤 MBP 含量如下所示(图 2)。黑土-春玉米、潮土-冬小麦、潮土-夏玉米和灰漠土-棉花体系土壤 MBP 的含量分别在 1.14—43.83 mg/kg、2.07—32.57 mg/kg、3.47—25.54 mg/kg 和 1.13—23.76 mg/kg 范围内变化,平均含量分别为 17.36、14.58、14.20 mg/kg 和 8.75 mg/kg,且不同土壤-作物体系间 MBP 的含量存在显著差异($P<0.05$)。在所有作物种植体系中,以黑土-春玉米体系中 MBP 含量最高,其次是潮土-冬小麦、潮土-夏玉米、灰漠土-棉花体系。然而,在潮土-冬小麦和潮土-夏玉米体系中,土壤 MBP 含量无显著差异。因此,在华北平原典型的潮土-冬小麦/夏玉米轮作体系中,土壤 MBP 的平均含量为 14.45 mg/kg。

2.3 不同土壤-作物体系耕层土壤微生物量磷库容大小

基于土壤容重,我们初步估算出了不同土壤-作物体系土壤 MBP 库容的大小,结果如下(表 2)。黑土-春玉米、潮土-冬小麦、潮土-夏玉米和灰漠土-棉花体系耕

作层(0—30 cm)土壤 MBP 库容的变化范围分别为:49.42—97.98 kg P/hm²、9.28—121.23 kg P/hm²、42.16—54.1 kg P/hm²和 22.61—57.58 kg P/hm²,平均库容大小分别为 83.60、58.16、50.36 kg P/hm²和 39.80 kg P/hm²,其中,在潮土冬小麦/夏玉米轮作体系中,土壤 MBP 库容的大小为 54.26 kg P/hm²。

结合张福锁等^[24]《中国主要作物施肥指南》的数据,发现在黑土-春玉米、潮土-冬小麦、潮土-夏玉米和灰漠土-棉花体系中,土壤 MBP 库储存的磷在数量上分别相当于当季作物需磷量的 2.73、1.63、1.73 倍和

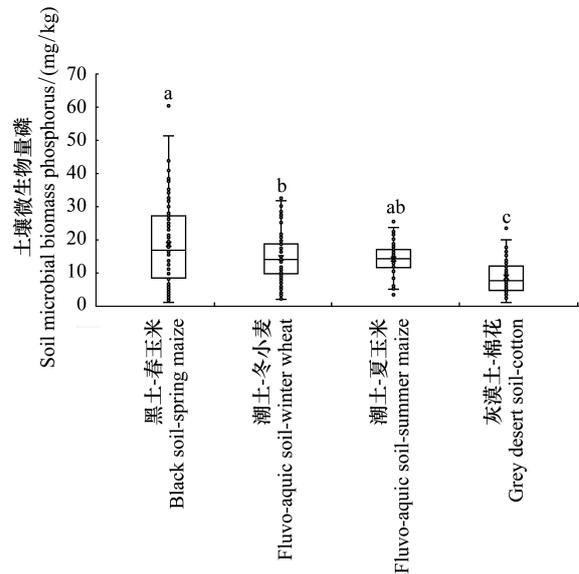


图 2 不同土壤-作物体系微生物量磷含量

Fig.2 Content of soil microbial biomass phosphorus of different soil-crop systems

不同小写字母代表不同土壤-作物体系间差异显著($P<0.05$)

1.10 倍。表明土壤 MBP 库是我国北方农田土壤中一个潜在的巨大养分磷储存库。

表 2 不同土壤-作物体系微生物量磷库容的大小

Table 2 The size of soil microbial biomass phosphorus pool of different soil-crop systems

土壤-作物体系 Soil-crop systems	最小值 Minimum/ (kg P/hm ²)	最大值 Maximum/ (kg P/hm ²)	平均值 Mean/ (kg P/hm ²)	相当于当季作物需磷量 Equivalent to the amount of phosphorus needed for one season crop/%
黑土-春玉米 Black soil-spring maize	49.42	97.98	83.60	273
潮土-冬小麦 Fluvo-aquic soil -winter wheat	9.28	121.23	58.16	163
潮土-夏玉米 Fluvo-aquic soil -summer maize	42.16	54.10	50.36	173
灰漠土-棉花 Grey desert soil-cotton	22.61	57.58	39.80	110

2.4 土壤微生物量磷与土壤理化性质之间的关系

土壤 MBP 与土壤理化性质的相关性分析结果如下所示(表 3)。在黑土-春玉米体系中,土壤 MBP 与土壤 pH、土壤 C/P 比极显著负相关($P<0.01$),与土壤速效磷极显著正相关,与土壤电导率、有机碳和容重显著正相关($P<0.05$)。在潮土-冬小麦/夏玉米轮作体系中,土壤 MBP 与土壤 pH 极显著负相关,与土壤 C/P 比和容重显著负相关,与土壤有机碳和速效磷极显著正相关,与土壤电导率无关。在灰漠土-棉花体系中,土壤 MBP 与土壤 pH 和容重极显著负相关,与土壤有机碳和速效磷极显著正相关,与土壤电导率和 C/P 比无关。在我国北方农田 3 种典型土壤作物体系中,土壤 MBP 与土壤理化性质相关性较好,表明在我国集约化农业生产系统中土壤 MBP 能够作为反映土壤质量变化的一个重要生物指标。

表 3 不同土壤-作物体系微生物量磷与土壤理化性质相关分析

Table 3 Correlations between physical-chemical properties and microbial biomass phosphorus under different soil-crop systems

土壤-作物体系 Soil-crop systems	指标 Index	pH	电导率 Electric conductivity	有机碳 Organic carbon	速效磷 Available phosphorus	C/P	容重 Bulk density
黑土-春玉米 Black soil-spring maize	MBP	-0.492 **	0.222 *	0.211 *	0.418 **	-0.357 **	0.255 *
潮土-冬小麦/夏玉米 Fluvo-aquic soil -winter wheat/ summer maize		-0.460 **	0.096	0.392 **	0.588 **	-0.303 *	-0.323 *
灰漠土-棉花 Grey desert soil-cotton		-0.519 **	0.151	0.470 **	0.570 **	-0.193	-0.336 **

“*”: $P<0.05$,”**”: $P<0.01$; MBP:微生物量磷 Microbial biomass phosphorus

2.5 影响土壤微生物量磷的多因素综合分析

为进一步解析采样点环境变量对于土壤 MBP 的综合影响作用,应用线性混合效应模型分析了环境变量与 MBP 的关系,结果表明,土壤 pH、有机碳、年均气温和年均降雨量能够解释我国北方农田 3 种典型土壤-作物体系 MBP 的 57% 变异,且土壤 MBP 随着 pH 的增加而降低,随着有机碳和年均气温的增加而增加(图 3,表 4)。

3 讨论

本文在 GIS 定位土壤类型的基础上,分别在我国北方三大农产区代表作物种植范围内进行取样,比较系统地研究了我国北方农田典型土壤-作物体系 MBP 的含量特征。虽然在黑土和灰漠土上采样点未覆盖整个分布区,但选择的采样点集中于当地典型作物分布优势区域,例如,在新疆灰漠土上,所有采样点广泛分布于

新疆主棉区、重棉区和次重棉区。因此,这些采样点在一定程度上能够代表所在区域典型的土壤-作物体系。

土壤 MBP 是土壤磷素中最为活跃的形态,但其在土壤中的含量较小,且易受环境因素的影响,因此,在大多数集约农业系统中,土壤 MBP 的含量变化很大。在本研究中,黑土-春玉米、潮土-冬小麦/夏玉米和灰漠土棉花体系土壤 MBP 含量分别在 1.14—43.83 mg/kg、2.07—32.57 mg/kg 和 1.13—23.76 mg/kg 范围内变化,这一结果与前人研究的结果基本一致^[29-31]。但我国北方农田生态系统中 MBP 的平均含量 13.52 mg/kg 要略低于全球农田平均水平 15.5 mg/kg^[2]。这可能与我国农民的施肥习惯有关,表现为化肥的过量施用和有机肥投入的相对不足,加剧了我国农田土壤中微生物的碳限制,降低了微生物的活性。此外,不同土壤-作物类型之间 MBP 的含量存在显著差异,以黑土-春玉米体系中的 MBP 含量最高,灰漠土棉花体系中 MBP 含量最低。这可能是由于一方面黑土自然肥力高,含有丰富的有机碳,为土壤微生物提供了丰富的碳源,提高了微生物活性,从而导致了较高的 MBP 含量;另一方面可能是因为水分状况,本次采样黑土区年均降雨量为 567 mm,而灰漠土区年均降雨量不足 200 mm,微生物受干旱胁迫,活性较低。

表 4 采样点土壤微生物量磷线性混合效应模型的相关系数

Table 4 Regression coefficients of linear mixed-effects model of soil microbial biomass phosphorus at all sampling sites

变量 Variable	估计值 Estimation	标准误差 Standard error	P 值
截距 Intercept	48.12	19.19	0.01
pH	-4.87	2.04	0.02
有机碳 Organic carbon	0.71	0.29	0.01
年均气温 Mean annual temperature	2.09	0.71	<0.01
年均降雨量 Mean annual precipitation	-0.03	0.01	<0.05

土壤微生物调节着包括碳、氮、磷等元素循环与转化在内的多种土壤生态过程,在能量流动与养分释放过程中发挥着关键作用,然而,微生物控制的这些生态过程强烈依赖于微生物的生物量和活性^[32]。影响土壤微生物生物量的因素有许多,本研究从土壤性质和气候因素等方面较为系统分析了采样点环境变量对土壤 MBP 的多因素综合影响作用,发现土壤 MBP 与土壤 pH、有机碳、速效磷和容重等指标显著相关,表明在农田土壤中 MBP 与土壤性质具有紧密联系,能够作为反映土壤质量变化的一个敏感生物学指标,进一步验证前人的研究结果^[33-36]。此外,采样点的年均气温和年均降雨量对土壤 MBP 也有显著效应,增温能够提高微生物活性,促进其生长,进而提高土壤 MBP 的含量,与前人所做结论一致^[37-38]。

土壤微生物具有溶解、矿化和固定磷的能力,被认为是土壤活性磷的“源”和“库”,在土壤磷素循环和对植物磷生物有效性等方面扮演着重要角色。本研究发现土壤 MBP 库是我国北方农田土壤中一个潜在的巨大养分磷储库,其储存磷的数量相当于当季作物需磷量的 1.10 至 2.73 倍,这与前人在其他生态系统研究中得到的结论相符^[21-22]。在土壤磷素充足时,土壤微生物将更多的磷固持在自身生物量中,避免了其在土壤中被固定和淋失,降低了农田生态系统磷的损失途径。然而,微生物的这种固持作用只是暂时的,由于土壤微生物的寿命较短以及种间捕食关系的发生,土壤 MBP 库极易发生周转,将这部分磷释放出来供植物吸收利用,进而

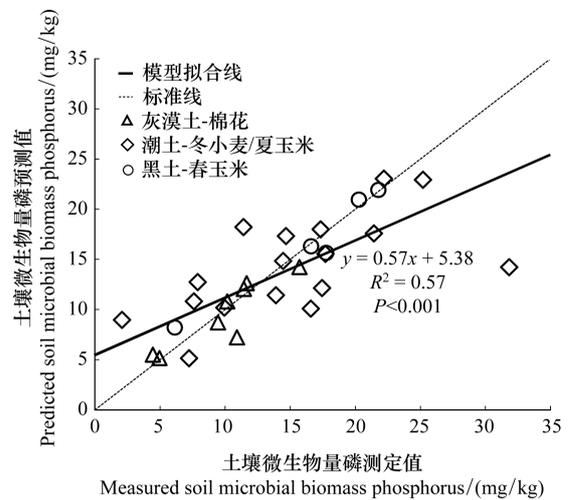


图 3 采样点土壤微生物量磷的线性混合效应模型

Fig. 3 Linear mixed-effects model of soil microbial biomass phosphorus at all sampling sites

改善植物的磷营养状况^[39-40]。

4 结论

土壤 MBP 库是我国北方农田土壤中一个巨大的养分磷储库,其在改善作物磷营养状况方面所发挥的潜在作用不容忽视。在我国北方 3 种典型农田土壤中,耕层(0—30 cm)土壤微生物固持在自身生物量中的磷的数量为 39.80—83.60 kg P/hm²,在数量上相当于当季作物需磷量的 1.10—2.73 倍。其库容的大小受土壤肥力的影响,其中,土壤有机碳含量是我国北方农田 3 种典型土壤-作物体系中 MBP 库容大小的主要影响因素。今后应当加强有机肥的施用和秸秆还田、合理调控土壤微生物资源活性、培育较大的 MBP 库容,并将其供磷能力纳入农业磷肥管理模型,以达到优化磷肥施用量的目标。

参考文献 (References):

- [1] Chen J, Seven J, Zilla T, Dippold M A, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Microbial C:N:P stoichiometry and turnover depend on nutrients availability in soil: a ¹⁴C, ¹⁵N and ³³P triple labelling study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131: 206-216.
- [2] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749.
- [3] Chen H, Zhao X R, Chen X J, Lin Q M, Li G T. Seasonal changes of soil microbial C, N, P and associated nutrient dynamics in a semiarid grassland of North China. *Applied Soil Ecology*, 2018, 128: 89-97.
- [4] Čapek P, Choma M, Tahovska K, Kaňa J, Kopáček J, Šantrůčková H. Coupling the resource stoichiometry and microbial biomass turnover to predict nutrient mineralization and immobilization in soil. *Geoderma*, 2021, 385: 114884.
- [5] Van Dinh M, Guhr A, Spohn M, Matzner E. Release of phosphorus from soil bacterial and fungal biomass following drying/rewetting. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 110: 1-7.
- [6] Schneider K D, Voroney R P, Lynch D H, Oberson A, Frossard E, Bünemann E K. Microbially-mediated P fluxes in calcareous soils as a function of water-extractable phosphate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 106: 51-60.
- [7] Sugito T, Yoshida K, Takebe M, Shinano T, Toyota K. Soil microbial biomass phosphorus as an indicator of phosphorus availability in a Gleyic Andosol. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(3): 390-398.
- [8] Boitt G, Simpson Z P, Tian J H, Black A, Wakelin S A, Condon L M. Plant biomass management impacts on short-term soil phosphorus dynamics in a temperate grassland. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(3): 397-409.
- [9] Shi Y C, Lalonde R, Hamel C, Ziadi N, Gagnon B, Hu Z Y. Seasonal variation of microbial biomass, activity, and community structure in soil under different tillage and phosphorus management practices. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(7): 803-818.
- [10] 吴晓玲, 张世熔, 蒲玉琳, 徐小逊, 李云. 川西平原土壤微生物量碳氮磷含量特征及其影响因素分析. *中国生态农业学报*, 2019, 27(10): 1607-1616.
- [11] 朱晓亚, 李子豪, 林启美, 李贵桐, 赵小蓉. 模拟不同春季降雨量下典型草原土壤微生物磷周转特征. *生态学报*, 2020, 40(8): 2655-2661.
- [12] Spohn M, Widdig M. Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 53-59.
- [13] Liebisch F, Keller F, Huguenin-Elie O, Frossard E, Oberson A, Bünemann E K. Seasonal dynamics and turnover of microbial phosphorus in a permanent grassland. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(3): 465-475.
- [14] Wu G H, Wei K, Chen Z H, Jiang D Q, Xie H T, Jiang N, Chen L J. Crop residue application at low rates could improve soil phosphorus cycling under long-term no-tillage management. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(4): 499-511.
- [15] Xu Z, Qu M S, Liu S L, Duan Y S, Wang X, Brown L K, George T S, Zhang L, Feng G. Carbon addition reduces labile soil phosphorus by increasing microbial biomass phosphorus in intensive agricultural systems. *Soil Use and Management*, 2020, 36(3): 536-546.
- [16] Zhang L, Ding X D, Peng Y, George T S, Feng G. Closing the loop on phosphorus loss from intensive agricultural soil: a microbial immobilization solution?. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 104.
- [17] Liu D, Huang Y M, An S S, Sun H Y, Bhople P, Chen Z W. Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. *Catena*, 2018, 162: 345-353.
- [18] 范夫静, 黄国勤, 宋同清, 曾履平, 彭晚霞, 杜虎, 文丽, 何铁光. 西南峡谷型喀斯特坡地土壤微生物量 C、N、P 空间变异特征. *生态学报*, 2014, 34(12): 3293-3301.

- [19] 张利青, 彭晚霞, 宋同清, 邹冬生, 曾馥平, 宋敏, 俞孜, 刘艳. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布. 生态学报, 2012, 32(7): 2056-2065.
- [20] 刘璐, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 杜虎, 鹿士杨, 曾馥平. 木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局. 生态学报, 2012, 32(1): 207-214.
- [21] Achat D L, Morel C, Bakker M R, Augusto L, Pellerin S, Gallet-Budynek A, Gonzalez M. Assessing turnover of microbial biomass phosphorus: combination of an isotopic dilution method with a mass balance model. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2231-2240.
- [22] 张成娥, 王健全. 作物秸秆腐解过程中土壤微生物量的研究. 水土保持学报, 2000, 14(3): 96-99.
- [23] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [24] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] Pinheiro J C, Bates D J, DebRoy S D, Sarkar D, R Core Team. *Nlme: linear and nonlinear mixed effects models*. R package version 3.1-137, 2018.
- [27] 李春明. 基于广义线性混合效应模型的蒙古栎林单木枯损建模及影响因子分析. 林业科学研究, 2020, 33(6): 105-113.
- [28] 邱华, 舒皓, 吴兆飞, 李明鲁, 殷正, 张春雨, 赵秀海. 长白山阔叶红松林乔木幼苗组成及多度格局的影响因素. 生态学报, 2020, 40(6): 2049-2056.
- [29] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 朱平, 任军, 梁成华, 彭畅, 高红军. 长期培肥黑土微生物量磷动态变化及影响因素. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1897-1902.
- [30] 艾超. 长期施肥下根际碳氮转化与微生物多样性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [31] 段一盛. 施肥和秸秆还田对土壤微生物量磷库影响的量化分析[D]. 北京: 农业大学, 2016.
- [32] Chen H, Li D J, Mao Q G, Xiao K C, Wang K L. Resource limitation of soil microbes in karst ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 241-248.
- [33] Pietri J C A, Brookes P C. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1396-1405.
- [34] 李炎龙, 刘梓雅, 严景, 米娜娜, 盖京苹, 冯固. 华北平原典型农田土壤微生物生物量碳氮磷库的县域分布特征——以河北省曲周县为例. 土壤学报, 2021, 58(1): 235-245.
- [35] Huang J S, Hu B, Qi K B, Chen W J, Pang X Y, Bao W K, Tian G L. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in a subalpine spruce plantation. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 72: 35-41.
- [36] Li C H, Ma B L, Zhang T Q. Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (*Zea Mays* L.) planted in large pots under field exposure. *Canadian Journal of Soil Science*, 2002, 82(2): 147-154.
- [37] Gong S W, Zhang T, Guo J X. Warming and nitrogen deposition accelerate soil phosphorus cycling in a temperate meadow ecosystem. *Soil Research*, 2019, 58(1): 109-115.
- [38] Wu Y P, He Y, Wang H Z, Xu J M. Effects of soil water content on soil microbial biomass and community structure based on phospholipid fatty acid analysis//Xu J M, Huang P M, eds. *Molecular Environmental Soil Science at the Interfaces in the Earth's Critical Zone*. Berlin: Springer, 2010: 334-336.
- [39] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 989-996.
- [40] Miltner A, Bombach P, Schmidt-Brücken B, Kästner M. SOM genesis: microbial biomass as a significant source. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 41-55.