

DOI: 10.11766/trxb201910310367

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[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 235–245.

LI Yanlong, LIU Ziya, YAN Jing, MI Nana, GAI Jingping, FENG Gu. Spatial Distribution of Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Phosphorus Pools in Typical Farmland Soils in North China Plain—A Case Study of Quzhou County[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 235–245.

# 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

李炎龙, 刘梓雅, 严景, 米娜娜, 盖京苹, 冯固<sup>†</sup>

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 土壤微生物生物量是土壤中的活性养分库, 直接参与土壤碳氮磷硫等元素的形态转化与生物地球化学循环过程, 是反映土壤肥力与质量的重要生物指标。基于网格法采样, 运用地统计学方法分析华北平原典型农田土壤微生物生物量碳氮磷库的空间分布特征及影响因子。结果表明: 河北省曲周县域农田耕层(0~30 cm)土壤微生物生物量库在空间上呈斑块状分布, 具有中等变异强度和明显的空间自相关性, 微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、微生物生物量磷(MBP)库储量分别为(C)  $64.14 \times 10^3$  t、(N)  $24.55 \times 10^3$  t、(P)  $2.80 \times 10^3$  t, 作物产量与 MBC 和 MBN 存在显著正相关关系。不同种植体系下单位质量土壤 MBC、MBN、MBP 的量存在显著差异, 小麦/玉米轮作体系下单位质量土壤微生物生物量的平均量高于棉花连作。土壤微生物生物量库的大小和空间分布均受种植体系和土壤肥力的影响, 其中土壤有机碳含量是影响土壤微生物生物量库容及空间分布的一个主要因子。研究结果表明土壤微生物生物量库是我国北方典型农田土壤中不可忽视的潜在有效养分库。

**关键词:** 土壤微生物生物量; 碳氮磷养分库; 生物肥力; 土壤健康; 空间分布特征

中图分类号: S154.3 文献标志码: A

## Spatial Distribution of Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Phosphorus Pools in Typical Farmland Soils in North China Plain—A Case Study of Quzhou County

LI Yanlong, LIU Ziya, YAN Jing, MI Nana, GAI Jingping, FENG Gu<sup>†</sup>

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

**Abstract:** 【Objective】 Soil microbial biomass (SMB) is a pool of soil available nutrients, directly participating in the

\* 国家重点研发计划项目(2017YFD0200203)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFD0200203)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fenggu@cau.edu.cn

作者简介: 李炎龙(1994—), 男, 河南郑州人, 硕士, 主要从事土壤微生物学研究。E-mail: 2220180261@qq.com

收稿日期: 2019-10-31; 收到修改稿日期: 2020-04-03; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-06-01

transformation and biogeochemical cycling of soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus(P)and sulphur (S). Soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN), and soil microbial biomass phosphorus (SMBP)are main components of the SMB, which serves as a hub for material cycling in the pedosphere. Since SMB is sensitive to environmental conditions, any change in SMB will affect turnover of soil elements. Therefore, SMB is considered to be a sensitive and effective indicator of soil fertility and biological quality. The study on rules of spatial distribution of SMB pool is of important significance to grasp how soil nutrients recycle in situ and how to manage soil nutrients regionally. 【Method】 In the present study, to explore how SMBC, SMBN and SMBP distribute spatially and what their influential factors are in the farmland ecosystem. A soil survey was conducted in Quzhou County, a typical agricultural county in the North China Plain with 56 740 hm<sup>2</sup> of farmlands. Using the grid sampling (2.5 km × 2.5 km) method, soil samples were collected from the topsoil layer (0-30 cm) of a tract of farmland for analysis of spatial distributions of SMBC, SMBN and SMBP pool with the geostatistical method. 【Result】 Results show: (1) The average reserve of the SMBC, SMBN and SMBP pool was 64.14×10<sup>3</sup> t, 24.55×10<sup>3</sup> t and 2.8×10<sup>3</sup> t, respectively, in the topsoil (0-30 cm) layer of Quzhou County. SMB was distributed in patch, featuring moderate spatial variability and obvious spatial autocorrelation; (2) Crop yield was significantly and positively related to MBC and MBN; (3) The mean content of carbon, nitrogen and phosphorus in soil microbial biomass per unit weight varied sharply with planting system, being higher in the wheat/maize rotation system than in the cotton monocropping system, which indicates that rotation system is superior to monocropping system to some extent, and favorable to maintaining a large soil microbial biomass pool; (4) Size and spatial distribution of SMB pools were governed by planting systems and soil fertility. MBC, MBN and MBP were closely related to soil fertility (e.g., soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, available kalium), among which soil organic carbon is the most important factor. 【Conclusion】 For the first time, sizes of SMBC, SMBN and SMBP pools were quantified, and spatial distribution pattern and influential factors of SMB were specified in the farmland of the North China Plain. In the farmland soil of Quzhou County, soil organic carbon is the most important factor affecting SMB pool, which suggests that soil microorganisms are limited by C. Therefore, it is advisable to strengthen application of organic manure, return straw to the field and reduce mineral fertilizer application rate so as to regulate and utilize the SMB pool in the future. All the findings in this study indicate that soil microbial biomass is a potential available nutrient pool in farmland in North China and may serve as a scientific basis for regionalized nutrient management and precise agriculture.

**Key words:** Soil microbial biomass; Carbon, nitrogen and phosphorus nutrient pool; Biological fertility; Soil health; Characteristics of spatial distribution

土壤微生物生物量是指土壤中生存的活体微生物总量,具有很强的动态性,因为土壤微生物既可通过对养分的矿化作用,作为植物速效养分的“源”,又可通过对无机养分的固定,作为储存养分的“库”<sup>[1]</sup>。土壤微生物生物量虽然只占土壤营养库中小部分,但却是土壤中最活跃的养分库,具有较高的养分释放和储存能力,是土壤速效养分的重要来源,在土壤养分转化与循环过程中扮演着重要角色。Xu等<sup>[2]</sup>研究表明,全球陆地生态系统0~30 cm土壤微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)库的储量分别为16.7和2.6 Pg,其周转对于土壤养分的供应有着重要作用,是不可忽视的潜在有效养分库。

空间异质性是土壤的重要属性之一,土壤是非

均质体,常表现出强烈的空间异质性<sup>[3-5]</sup>。土壤微生物也不是随机分布的,它们在不同的空间尺度上表现出不同的空间聚集模式,具有尺度依赖的驱动因素<sup>[6]</sup>。因此,土壤微生物生物量在不同空间位置的分布也呈现出明显的空间变异性。地统计学是研究空间变异的重要工具,能够定量揭示土壤中各属性变量因子在空间上的分布、变异特征<sup>[7]</sup>,被广泛应用于分析土壤物理性质<sup>[8]</sup>、化学性质<sup>[9]</sup>、生物学性质<sup>[10]</sup>、重金属含量<sup>[11]</sup>和养分流失风险<sup>[12]</sup>等空间分布格局和变异特征。然而,与土壤其他性状相比,由于土壤微生物在空间和时间上的高度异质性以及取样和测量方法的局限性,前人对土壤微生物生物量空间分布模式的研究成果相对较少。

近年来,国内外学者对土壤微生物生物量的空

间分布特征已有一些研究<sup>[13-18]</sup>, 例如, 范夫静等<sup>[19]</sup>研究了西南峡谷型喀斯特坡地土壤 MBC、MBN 和微生物生物量磷 (MBP) 的空间变异特征, Aşkin 和 Kizilkaya<sup>[20]</sup>研究了牧草土壤 MBC 的空间分布规律。但是, 这些研究多集中于对田间试验小区域范围内土壤微生物生物量空间含量变化的揭示, 对于大尺度农田土壤微生物生物量库容的大小及应用潜力的研究少见报道。研究农田土壤微生物生物量库容和空间分布特征对掌握土壤肥力状况以及优化作物生产系统的养管理具有重要意义。本文以华北平原典型粮食产区河北省曲周县的农田土壤为研究对象, 基于均匀网格法采样、运用地统计学知识和 GIS 空间分析技术, 在县域尺度上定量农田土壤微生物生物量库容的大小和空间分布特征, 揭示影响土壤微生物生物量的重要因子, 以期理解我国北方农田土壤生物肥力特征和养分原地循环的能力以及指导土壤健康管理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

曲周县位于 36°35'43"—36°57' N, 114°50'22.3"—115°13'27.4" E, 地处河北省南部, 全县总面积达 667 km<sup>2</sup>, 农业用地面积占土地总面积的 83.84%, 为

典型的平原农业县, 土壤呈弱碱性, 是中国北方典型的石灰性农田土壤, 土壤类型以潮土为主, 并有少量盐土和褐土分布。属温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温 13.1℃, 多年平均降水量 556.2 mm, 60% 的降水集中于 6—9 月, 全年无霜期平均为 210 d, 耕地种植作物以小麦、玉米、棉花和蔬菜为主, 主要作物种植体系为冬小麦夏玉米轮作、棉花连作、大棚蔬菜和大田蔬菜。全县化肥年消费总量达 23.3 万 t, 在以冬小麦夏玉米轮作为主的农田管理中, 冬小麦氮、磷、钾肥用量分别为 262.1、187.6、51.8 kg·hm<sup>-2</sup>; 夏玉米氮、磷、钾肥用量分别为 199.0、51.9、29.5 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[21]</sup>。

### 1.2 研究方法

在曲周全县范围内, 采用 2.5 km × 2.5 km 网格进行样地采样 (如图 1 所示), 运用手机 GPS 定位, 尽可能兼顾种植体系和土壤养分梯度。共采集耕作层 (0~30 cm) 土样 100 个, 其中大田小麦/玉米轮作体系 57 个样点, 大田棉花连作体系 26 个样点, 大棚蔬菜连作体系 9 个样点, 大田蔬菜连作体系 8 个样点。每个采样点均采用“S”型采样法, 5 个取样点混匀为一个土壤样品置于冰盒, 并记录种植作物的种类。一部分土壤样品 4℃ 保存用于土壤微生物生物量的测定, 另一部分风干, 用于土壤理化性质的测定。

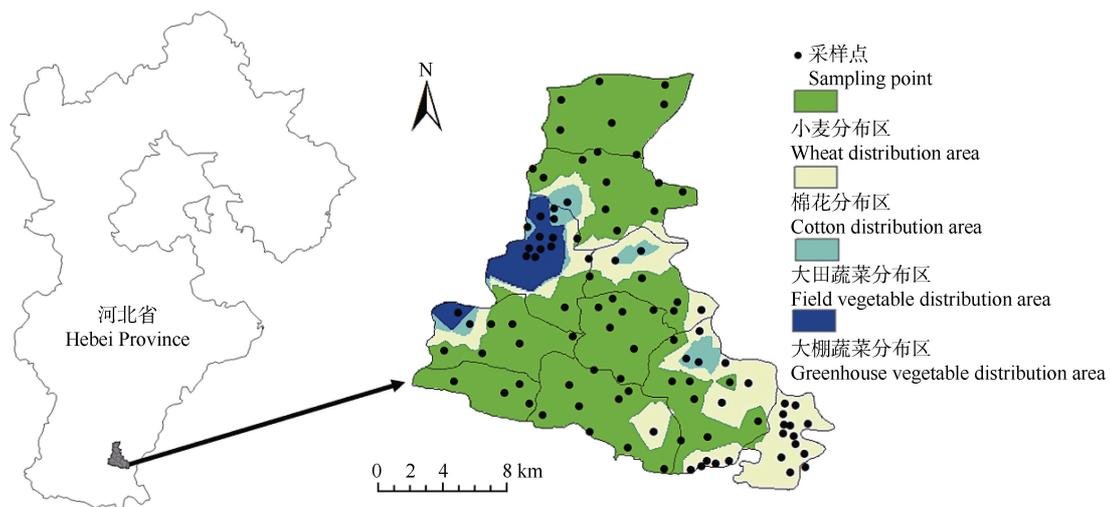


图 1 采样区的位置 (左) 和采样点分布图 (右)

Fig. 1 Distribution map of the sampling area (left) and of the sampling point (right)

采集的土壤样品需要进行预处理, 将 4℃ 保存的土壤样品, 过 2 mm 的筛子去除较大的土块和砂砾等

杂质, 然后挑除根及其他动植物遗体, 测定土壤含水率, 并将土壤含水率调至合适范围, 在恒温培养箱里

培养一周,最后,称取一定量土壤进行测定。

土壤理化性质的测定参照文献[22],土壤 pH 使用 pH 计测定(水:土=2.5:1),电导率使用电导仪测定(水:土=5:1),有机质采用浓  $H_2SO_4-K_2CrO_4$  外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,有效磷采用 Olsen-P 法测定,速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定。磷酸酶活性按照 Joner 和 Johansen<sup>[23]</sup> 的方法测定。土壤微生物生物量采用氯仿熏蒸浸提法测定。其中,土壤 MBC、MBN 采用氯仿熏蒸— $K_2SO_4$  浸提法<sup>[24]</sup>,用碳氮分析仪进行测定;MBP 采用氯仿熏蒸— $NaHCO_3$  浸提法<sup>[25]</sup>,用酶标仪测定。

### 1.3 数据处理与统计分析

数据在 SPSS 24.0 软件中运用 K-S 法在 5% 的检验水平下进行非参数检验,看数据是否符合正态分布,对不符合正态分布的数据进行对数转换,使其符合正态分布。描述性统计和典型相关性分析在 SPSS 24.0 和 Excel 2016 软件中完成,半方差函数理论计算、理论模型拟合在 GS+ 7.0 软件中完成,土壤微生物生物量库的空间分布图使用克里金插值法在 ArcGIS 10.2 软件中完成,冗余分析在 Canoco 5.02 软件中完成。

半方差函数是地统计学研究土壤变异性的特有函数。区域化变量  $Z(x)$  在点  $x$  和  $(x+h)$  处的值  $Z(x)$  与  $Z(x+h)$  差的方差的一半称为区域化变量  $Z(x)$  的半方差函数,记为  $r(h)$ 。半方差函数值计算公式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中,  $h$  为样本距,是两样本点之间的空间距离,  $N(h)$  为样本距为  $h$  时的样点对数,  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i+h)$  分别为变量  $Z$  在空间位置  $x_i$  和  $(x_i+h)$  上的取值。

土壤微生物生物量的空间相关性可以用块金值  $C_0$  与基台值  $(C_0+C)$  的比值来表示,简称块基比,该比值不仅表示空间相关性程度,而且还反映了随机因素引起的空间变异占总变异的大小。当  $C_0/(C_0+C) < 25\%$  时,表现为强空间相关性,主要受结构性因素的影响;当  $25\% < C_0/(C_0+C) < 75\%$  时,表现为中等程度空间相关,主要受结构性和随机性因素影响;当  $C_0/(C_0+C) > 75\%$  时,空间相关性较弱,主要受随机性因素的影响。

曲周县农田耕层土壤微生物生物量库的计算公式如下:

MBC 库储量 (C) = 土壤容重 × 农业用地面积 × 土层深度 × (单位质量土壤 MBC 的 C 量)

MBN 库储量 (N) = 土壤容重 × 农业用地面积 × 土层深度 × (单位质量土壤 MBN 的 N 量)

MBP 库储量 (P) = 土壤容重 × 农业用地面积 × 土层深度 × (单位质量土壤 MBP 的 P 量)

式中,曲周县农业用地面积为  $567.4 \text{ km}^2$ ,土层深度为  $30 \text{ cm}$ 。

## 2 结果

### 2.1 土壤微生物生物量描述性统计

运用 K-S 法在 5% 的检验水平下进行非参数检验发现,曲周县农田土壤 MBC 和 MBN 服从正态分布,MBP、微生物生物量碳磷比 (MBC/MBP) 和微生物生物量氮磷比 (MBN/MBP) 经过对数 (lg) 转换后服从正态分布,但对数转换后的微生物生物量碳氮比 (MBC/MBN) 仍不符合正态分布,后面地统计学的所有相关分析均采用对数转换后的数据。如表 1 所示,曲周县农田土壤 MBC、MBN、MBP 的量的平均值分别为  $324.8 \pm 15.7$ 、 $124.3 \pm 5.8$  和  $14.2 \pm 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;从变异程度上看,土壤 MBC、MBN、MBP 的变异系数分别为 48.13%、41.76% 和 33.98%,均属于中等变异程度。

### 2.2 土壤微生物生物量空间结构特征

采用 GS+ 7.0 软件完成半方差函数理论模型拟合,拟合结果及相关参数如表 2 所示,曲周县农田土壤 MBC 的变异函数最佳拟合模型为高斯模型,MBN 的变异函数最佳拟合模型为指数模型,MBP、MBC/MBP、MBN/MBP 的变异函数最佳拟合模型均为线性模型,最优半方差模型为 GS+ 7.0 软件默认最优。由表 2 可知,曲周县农田土壤 MBC 的块基比值为 11.8%,小于 25%,表明 MBC 有较强的空间相关性,其空间变异主要是土壤结构性而非随机性因素引起的。MBN 的块基比值为 46.7%,介于 25%~75% 之间,为中等空间相关性,表明 MBN 的空间变异主要受结构性和随机性因素影响。MBP、MBC/MBP、MBN/MBP 的块基比值为 1,表现为纯块金效应,它们的变异是随机性因素引起的,在整

个空间尺度上具有恒定的变异。土壤微生物生物量的块金值  $C_0$  均大于 0，表明存在抽样分析误差和小于最小抽样距离内的变化或由随机和其他固有变异引起的各种正基底效应。变程 ( $A_0$ ) 可以用来表征土壤微生物生物量有效空间自相关距离。MBC 的  $A_0$  值较小，为 1 400 m，表明 MBC 在较小的空间范围内存在很强的空间相关性；MBP、MBC/MBP、

MBN/MBP 的  $A_0$  值较大，分别为 20 267、20 269、20 290 m，表明它们的空间连续性较好。分维数  $D$  可以用来表示由随机因素引起的空间异质性程度，一般来说， $D$  值越小，由随机变异引起的空间异质性越小。MBP、MBC/MBP、MBN/MBP 的  $D$  值相对较大，表明它们的空间异质性主要由随机因素引起的，其本身固有的空间异质性相对较弱。

表 1 土壤微生物生物量描述性统计分析 & 正态分布检验结果

Table 1 Descriptive statistics and K-S tests of soil microbial biomass

微生物生物量 Microbial biomass	最小值 Minimum/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	最大值 Maximum/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	均值 Mean/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	标准误差 Standard error	变异系数 CV/%	K-S 值 Value of K-S test	分布类型 Distribution type
MBC	15.56	747.5	324.8	15.7	48.13	0.2	<i>N</i>
MBN	10.12	224.1	124.3	5.8	41.76	0.2	<i>N</i>
MBP	1.34	40.52	14.2	1.0	68.52	0	*
lgMBP	0.13	1.61	1.03	0.04	33.98	0.069	<i>LN</i>
MBC/MBN	0.21	21.39	3.46	0.28	76.3	0	*
lg (MBC/MBN)	-0.68	1.33	0.46	0.03	56.52	0.002	<i>L*</i>
MBC/MBP	5.75	402.9	90.24	7.51	81.93	0	*
lg (MBC/MBP)	0.76	2.61	1.82	0.04	20.33	0.2	<i>LN</i>
MBN/MBP	0.85	149	35.34	3.44	90.83	0	*
lg (MBN/MBP)	-0.07	2.17	1.38	0.04	28.99	0.2	<i>LN</i>

注：lgMBP：对数转换后的微生物生物量磷；lg (MBC/MBN)：对数转换后的微生物生物量碳氮比；lg (MBC/MBP)：对数转换后的微生物生物量碳磷比；lg (MBN/MBP)：对数转换后的微生物生物量氮磷比。“lg”：对数转换后的结果；“\*”：非正态分布，“*N*”：正态分布；“*LN*”：对数转换后呈正态分布；“*L\**”：对数转换后仍为非正态分布。Note: lgMBP: Microbial biomass phosphorus after logarithmic conversion; lg (MBC/MBN): Microbial biomass carbon/nitrogen ratio after logarithmic conversion; lg (MBC/MBP): Microbial biomass carbon/phosphorus ratio after logarithmic conversion; lg (MBN/MBP): Microbial biomass nitrogen/phosphorus ratio after logarithmic conversion; “lg”: The results after logarithmic conversion; “\*”: Abnormal distribution; “*N*”: Gaussian distribution; “*LN*”: Gaussian distribution after logarithmic conversion; “*L\**”: Abnormal distribution after logarithmic conversion.

表 2 土壤微生物生物量半方差函数理论模型及相关参数

Table 2 Semivariance theoretical models and relevant parameter of soil microbial biomass

微生物生物量 Microbial biomass	理论模型 Theory model	块金值 Nugget $C_0$	基台值 Sill ( $C_0+C$ )	块金值/基台值 Nugget/Sill $C_0/(C_0+C)$	变程 Range $A_0/m$	分维数 Fractal dimension $D$	决定系数 Determination coefficient $R^2$
MBC	高斯 Gaussian	2 870	24 370	0.118	1 400	1.92	0.757
MBN	指数 Exponential	1 334	2 854	0.467	3 710	1.92	0.762
lgMBP	线性 Linear	0.124	0.124	1	20 267	1.99	0.011
lg (MBC/MBP)	线性 Linear	0.141	0.141	1	20 269	1.95	0.554
lg (MBN/MBP)	线性 Linear	0.17	0.17	1	20 290	1.98	0.018

### 2.3 土壤微生物生物量库空间分布格局

结合土壤容重, 估算出曲周县农田耕层(0~30 cm)土壤微生物生物量库的平均储量, MBC、MBN、MBP 分别为  $64.14 \times 10^3 \text{ t}$ ,  $24.55 \times 10^3 \text{ t}$ ,  $2.80 \times 10^3 \text{ t}$ 。利用克里金插值法在 ArcGIS 10.2 软件中绘制的土壤 MBC、MBN、MBP 库的空间分布图(图 2), 土壤微生物生物量库的空间异质性明显, 从它们的空间分布图中可以更直观看出这一分布规律。不仅如此, 它们在空间分布特征上也存在较大差异。如图 2 所示, 曲周县农田土壤 MBC 库低值区呈大块状分布, 具有很强的空间相关性, 高值区的分布斑块较小、并且破碎, 分布不集中, 空间相关性相对

较弱。MBN 库以及 MBC/MBN 呈大块状分布, 高值和低值区分布相对集中, MBN 库的高值区主要分布于北部和中下部, 低值区主要在中部和东南部。MBP 库、MBC/MBP 和 MBN/MBP 的空间连续性较好, 其中, MBP 库低值区呈块状分布, 集中分布在南部, 高值区呈斑块状分布, 斑块小而破碎、且分布不集中。MBC/MBP 和 MBN/MBP 呈条带状分布, 高值区主要集中分布在中部的一个环形区域内。总体而言, 曲周县农田土壤 MBC 库、MBN 库、MBP 库、MBC/MBN、MBC/MBP、MBN/MBP 均表现出明显的空间异质性, 这可能与研究区内复杂的生境条件以及土壤养分管理措施有关。

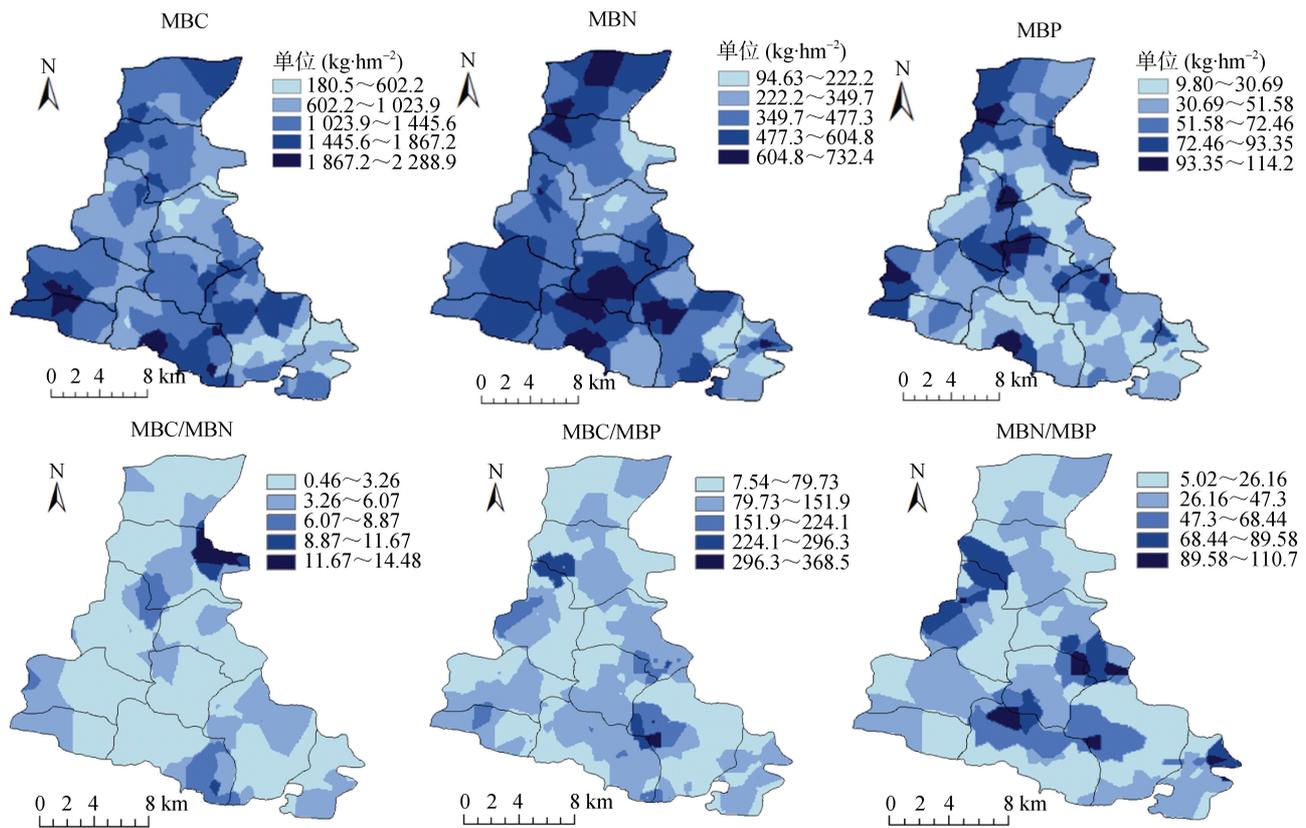


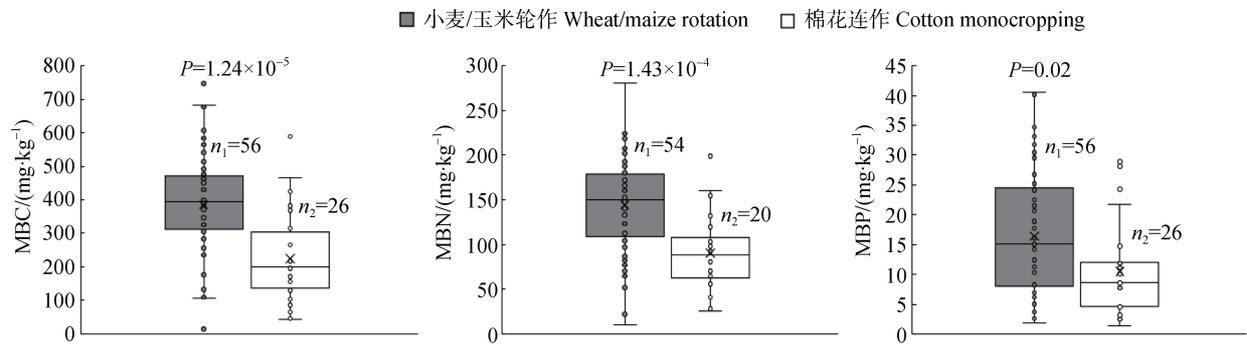
图 2 土壤微生物生物量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil microbial biomass

### 2.4 不同种植体系下土壤微生物生物量的含量特征

不同种植体系下土壤微生物生物量均值的对比发现, 曲周县农田土壤小麦/玉米轮作体系下土壤 MBC、MBN、MBP 的平均量分别为 384.7、144.2、16.4 mg·kg<sup>-1</sup>; 棉花连作体系下三者的平均量分别为 224.4、90.3、10.5 mg·kg<sup>-1</sup>, 同时, 对不同种植体系

下 MBC、MBN、MBP 两组数据在 5% 的检验水平上进行双样本异方差 t 检验, 结果发现, 双尾检验的 P 值分别为  $1.24 \times 10^{-5}$ 、 $1.43 \times 10^{-4}$  和 0.02, 均小于 0.05 (图 3)。即小麦/玉米轮作体系与棉花连作体系土壤微生物生物量均值存在显著差异, 曲周县农田土壤 MBC、MBN、MBP 的均值在不同种植体系下均表现为小麦/玉米轮作体系大于棉花连作体系。



注：n<sub>1</sub>：小麦/玉米轮作样本数；n<sub>2</sub>：棉花连作样本数。Note: n<sub>1</sub>: Number of samples from the field under wheat/maize rotation; n<sub>2</sub>: Number of samples from the field under cotton monocropping.

图 3 不同种植体系下土壤微生物生物量的含量  
Fig. 3 Content of soil microbial biomass relative to cropping system

### 2.5 土壤微生物生物量与土壤特性和作物产量的相关性

运用 SPSS 24.0 软件分析土壤微生物生物量与土壤特性和作物产量相关性,如表 3 所示,土壤 MBC 与土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、有效磷 (AP)、速效钾 (AK)、碱性磷酸酶 (ALP)、酸性磷酸酶 (ACP) 显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与土壤容重 (VW) 极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 土壤 MBN 与 SOC、TN、ALP 极显著正相关, 与土壤 VW 极显著负相关, 但

与土壤 AP 不相关 ( $P > 0.05$ ); 土壤 MBP 与 SOC、TN、AK、ALP 极显著正相关, 与容重显著负相关, 但与 AP 不相关。MBN 与土壤 pH 存在极显著负相关关系, 但 MBC、MBP 与土壤 pH 无关。土壤微生物生物量与电导率 (EC) 无关, 但是与土壤肥力指标紧密相关, 其中, 土壤有机碳是影响土壤微生物生物量的一个主要因子 (图 4, 表 4)。作物产量与 MBC 和 MBN 显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 表明土壤微生物生物量库对于作物产量有一定的潜在贡献。

表 3 土壤微生物生物量与土壤特性和作物产量相关性

Table 3 Correlation coefficient of soil microbial biomass with soil properties and crop yield

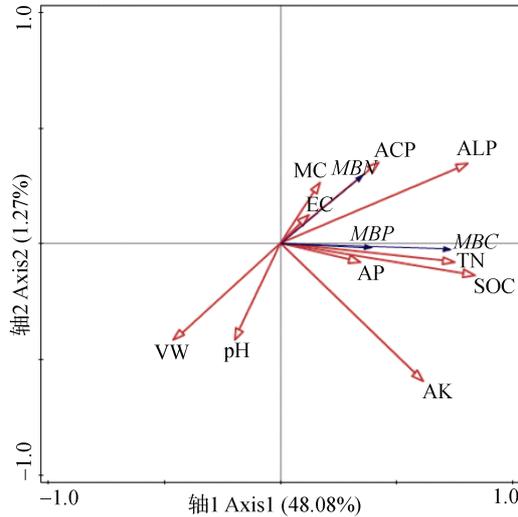
微生物生物量 Microbial biomass	pH	电导率 EC	土壤有机 碳 SOC	全氮 TN	有效磷 AP	速效钾 AK	碱性磷酸酶 ALP	酸性磷酸酶 ACP	容重 VW	产量 Yield
MBC	-0.156	0.099	0.627**	0.563**	0.254*	0.468**	0.599**	0.297**	-0.335**	0.406**
MBN	-0.268*	0.145	0.378**	0.318**	0.008	0.168	0.412**	0.268*	-0.322**	0.265*
MBP	-0.119	0.032	0.466**	0.392**	0.163	0.312**	0.333**	0.111	-0.209*	0.163

\*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ .

## 3 讨论

土壤微生物生物量是土壤有机质组分中最为活跃的部分, 对土壤养分转化和物质循环起着重要的驱动作用, 是评价土壤生物学性状和土壤质量的重要生物指标, 对于研究土壤肥力的变化具有重要意义<sup>[26]</sup>。以往的研究表明, 我国农田土壤中 MBC 和 MBN

的平均量分别为 321.29、48.19  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[27]</sup>, 本研究中曲周县农田土壤 MBC 的平均量 ( $324.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 与我国农田土壤平均量基本相当, 但 MBN 的平均量 ( $124.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 却远高于我国农田土壤的平均量, MBP 的量大多介于  $12.07 \sim 40.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 远高于我国北方石灰性土壤  $12.4 \sim 15.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[28]</sup>。这可能与当地农民的施肥习惯有关, 具体表现为过量或超量施用化肥, 与牛新胜和张宏彦<sup>[21]</sup>研究结果一致。



注：在进行 RDA 时，将数据进行了标准化处理，蓝色箭头表示土壤微生物生物量（因变量），红色箭头表示土壤理化指标和磷酸酶活性（解释变量）。Note: Data was standardized for RDA. Blue arrows represent soil microbial biomass (dependent variable), and red arrows represent soil physical and chemical properties and phosphatase activity (explanatory variables).

图 4 土壤微生物生物量与土壤理化性质和磷酸酶活性的冗余分析 (RDA)

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) of soil microbial biomass with soil physical and chemical properties and phosphatase activity

曲周县农田土壤 MBC、MBN、MBP 库空间分布受随机性和结构性因素共同影响而表现出明显的异质性（表 2 和图 2）。本研究中不同种植方式下土壤微生物生物量存在显著差异，这是因为在农业生产过程中，种植方式对土壤微生物生物量有显著影响<sup>[29-30]</sup>。小麦/玉米轮作体系土壤中 MBC、MBN 和 MBP 的平均量均高于棉花连作，可能是由于轮作体系中多种作物的根系分泌物、根茬以及当地普遍采

用小麦和玉米秸秆还田，为土壤微生物提供了更加丰富的碳源，与棉花体系相比提高了微生物多样性、活性和生物量。施肥也是影响土壤微生物生物量的一个重要因素<sup>[31-32]</sup>。曲周县不同农户对冬小麦单季施氮量介于 112.5~652.5 kg·hm<sup>-2</sup>，施磷量介于 0~690 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[21]</sup>，土壤微生物生物量与土壤肥力紧密相关，施肥可通过改变土壤肥力间接影响土壤微生物生物量。曲周县不同地块农户的这种不均衡施肥方式在一定程度上影响着土壤微生物生物量在空间上的分布格局。大量研究已经证明，土地利用方式<sup>[33]</sup>和耕作方式<sup>[34-35]</sup>也是影响土壤微生物生物量的重要因素。曲周县 30 年以来土地利用方式变化很大，全县土地利用方式大致分为旱地、水浇地、林地、其他用地和一些未利用地，分别占全县总面积的 25.3%、56.9%、1.2%、13.3%、3.3%<sup>[36]</sup>。近 10 年来，随着曲周县农业生产结构的调整，机械化程度不断提高，人类干扰活动不断加强，对土壤微生物生物量的影响程度也在加强。此外，土壤微生物生物量还受土壤类型等土壤结构性因素的影响<sup>[37]</sup>。土壤分布的特征是具有地带性，曲周县域农田土壤有潮土、盐土和褐土三种土壤类型。其中，潮土分布广泛，是全县耕地面积最大的土壤类型，包括潮土、盐化潮土、褐土化潮土三个亚类；盐化潮土主要分布在曲周县北部及中部，褐土化潮土主要分布在曲周县东南部和西南部<sup>[36]</sup>。本研究中褐土化潮土微生物生物量较低，土壤微生物生物量也受这种地带性土壤类型的影响。总体而言，曲周县域农田土壤微生物生物量空间分布的影响因子有很多。其中，土壤有机碳对土壤微生物生物量的影响最大，是影响土壤微生物生物量的一个主要因子，但关于土壤微生物

表 4 土壤微生物生物量预测变量的冗余分析排序结果

Table 4 Permutation test of redundancy analysis on predictor variables of soil microbial biomass

变量	解释度	贡献度	F	P	变量	解释度	贡献度	F	P
Variable	Explains/%	Contribution/%			Variable	Explains/%	Contribution/%		
SOC	33.8	68.5	49.1	0.002	pH	0.7	1.5	1.3	0.222
ALP	9.2	18.6	15.3	0.002	TN	0.6	1.1	1	0.322
AK	2.9	5.8	5	0.014	VW	0.2	0.3	0.3	0.722
AP	1.2	2.4	2.1	0.14	MC	0.1	0.3	0.2	0.772
ACP	0.7	1.5	1.3	0.24	EC	<0.1	<0.1	<0.1	0.99

生物量空间格局的形成机制还需进一步的探讨。

土壤微生物生物量是土壤中活性的养分库,对作物 C、N、P 等养分的供应起着重要作用,郭晓霞等<sup>[38]</sup>的田间试验表明,燕麦产量与土壤 MBC、MBN 和 MBP 呈极显著正相关,本研究的结果也表明,作物产量与土壤 MBC 和 MBN 存在显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ ),但与 MBP 不相关(表 3),这可能与曲周县农田的田间养分管理状况有关,具体表现为化肥的过量投入,有机肥的投入相对不足,导致土壤中的碳源不足,土壤微生物受碳限制,生物活性较低。

## 4 结论

曲周县域农田尺度上土壤 MBC、MBN、MBP 库在空间上呈斑块状分布,具有中等变异强度和明显的空间自相关性,它们分别在 1.4、3.7、20.3 km 的空间范围内存在自相关性。不同种植体系下土壤微生物生物量的含量存在显著差异,小麦/玉米轮作体系下土壤 MBC、MBN、MBP 的含量均大于棉花连作。曲周县农田生态系统表层(0~30 cm)土壤 MBC、MBN、MBP 库储存养分的数量分别为(C)  $64.14 \times 10^3$  t、(N)  $24.55 \times 10^3$  t、(P)  $2.80 \times 10^3$  t,土壤微生物生物量库容的大小受土壤有机碳含量的限制,今后应加强有机肥的施用和秸秆还田、减少化肥用量,合理调控和利用土壤微生物生物量库,充分发挥土壤微生物生物量库供应养分的潜力。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Yevdokimov I, Larionova A, Blagodatskaya E. Microbial immobilisation of phosphorus in soils exposed to drying-rewetting and freeze-thawing cycles[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52 ( 5 ): 685—696.
- [ 2 ] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22 ( 6 ): 737—749.
- [ 3 ] Li C J, Li Y, Ma J. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut desert[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 ( 2 ): 302—310. [李从娟, 李彦, 马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征[J]. *土壤学报*, 2011, 48 ( 2 ): 302—310.]
- [ 4 ] Chang Q W, Xue J F, Chen G Z. The study on a local area random distribution method in analyzing the spatial distribution of soil nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 ( 6 ): 1155—1161. [曾绮微, 薛剑峰, 陈桂珠. 土壤养分空间分析的局部随机法研究[J]. *土壤学报*, 2009, 46 ( 6 ): 1155—1161.]
- [ 5 ] Niu L A, Hao J M, Tan L, et al. Spatio-temporal variability of soil nutrients in salt-affected soil under amelioration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 ( 1 ): 84—90. [牛灵安, 郝晋珉, 覃莉, 等. 盐渍土改造区土壤养分的时空变异性研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42 ( 1 ): 84—90.]
- [ 6 ] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, 17 ( 4 ): 177—183.
- [ 7 ] Fang X, Xue Z J, Li B C, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2012, 88 ( 1 ): 6—13.
- [ 8 ] Wang Y Q, Shao M A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the loess plateau of PR China subject to wind and water erosion[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24 ( 3 ): 296—304.
- [ 9 ] Wang Y H, Dong Y J, Zhang M, et al. Spatial variability characteristics of slope soil nutrients in small watershed of the middle of Shandong Province[J]. *Soils*, 2011, 43 ( 2 ): 179—183. [王艳华, 董元杰, 张民, 等. 鲁中山区小流域坡面侵蚀土壤养分空间分异特征研究[J]. *土壤*, 2011, 43 ( 2 ): 179—183.]
- [ 10 ] Liu S L, Li Y, Wu J S, et al. Spatial variability of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in a hilly red soil landscape in subtropical China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56 ( 5 ): 693—704.
- [ 11 ] Solgi E, Solgi M, Rodríguez Martín J A. Spatial variability of heavy metal concentrations in vineyard soils on Malayer Plains ( Iran ) [J]. *Environmental Forensics*, 2016, 17 ( 1 ): 87—96.
- [ 12 ] Mabit L, Bernard C, Makhlof M, et al. Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from <sup>137</sup>Cs measurements and geostatistics[J]. *Geoderma*, 2008, 145 ( 3/4 ): 245—251.
- [ 13 ] Liu L, Song T Q, Peng W X, et al. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 ( 1 ): 207—214. [刘璐, 宋同清, 彭晚霞, 等. 木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局[J]. *生态学报*, 2012, 32 ( 1 ): 207—214.]
- [ 14 ] Yang B L, Zheng A B, Ruan H H. The spatial distribution characteristics of soil microbial biomass in roadside soils along Shanghai-Nanjing highway[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43 ( 5 ): 192—193. [杨宝玲, 郑阿宝, 阮宏华. 沪宁高速公路两侧土壤微生物量空间分布特征分析[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43 ( 5 ): 192—193.]
- [ 15 ] Gavrilenko E G, Susyan E A, Anan'eva N D, et al. Spatial variability in the carbon of microbial biomass and

- microbial respiration in soils of the south of Moscow oblast[J]. *Eurasian Soil Science*, 2011, 44 (10): 1125—1138.
- [16] Dequiedt S, Saby N P A, Lelievre M, et al. Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20 (4): 641—652.
- [17] Corre M D, Schnabel R R, Stout W L. Spatial and seasonal variation of gross nitrogen transformations and microbial biomass in a Northeastern US grassland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 (4): 445—457.
- [18] Zhang L Q, Peng W X, Song T Q, et al. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a Karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (7): 2056—2065.
- [19] Fan F J, Huang G Q, Song T Q, et al. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping field in a groge Karst region, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (12): 3293—3301. [范夫静, 黄国勤, 宋同清, 等. 西南峡谷喀斯特坡地土壤微生物量 C、N、P 空间变异特征[J]. *生态学报*, 2014, 34 (12): 3293—3301.]
- [20] Aşkin T, Kizilkaya R. Spatial distribution patterns of soil microbial biomass carbon within the pasture[J]. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 2007, 72 (1): 75—79.
- [21] Niu X S, Zhang H Y. Analysis on fertilizer management of winter wheat and summer maize in north China plain[J]. *Tillage and Cultivation*, 2010 (5): 1—4, 8. [牛新胜, 张宏彦. 华北平原冬小麦-夏玉米生产肥料管理现状分析[J]. *耕作与栽培*, 2010 (5): 1—4, 8.]
- [22] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [23] Joner E J, Johansen A. Phosphatase activity of external hyphae of two arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Mycological Research*, 2000, 104 (1): 81—86.
- [24] Joergensen R G, Brookes P C. Quantification of soil microbial biomass by fumigation-extraction[M]//*Soil biology*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 281—295.
- [25] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1982, 14 (4): 319—329.
- [26] Khan K S, Mack R, Castillo X, et al. Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 115—123.
- [27] Wang C J, Xiao J, Cai A D, et al. Capacity and characteristics of soil microbial biomass under various climate and fertilization conditions across China croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (6): 1067—1075. [王传杰, 肖婧, 蔡岸冬, 等. 不同气候与施肥条件下农田土壤微生物生物量特征与容量分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (6): 1067—1075.]
- [28] Lin Q M. Interference of soil soluble inorganic P in measurement of soil microbial biomass P[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (6): 993—996. [林启美. 土壤可溶性无机磷对微生物生物量磷测定的干扰[J]. *生态学报*, 2001, 21 (6): 993—996.]
- [29] Lin Y J, Gao F, Zhang J L, et al. Soil microbial biomass and respiration rate under effects of different planting patterns of peanut[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (9): 2323—2328. [林英杰, 高芳, 张佳蕾, 等. 不同种植方式对花生土壤微生物生物量及活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (9): 2323—2328.]
- [30] Yong T W, Yang W Y, Xiang D B, et al. Effects of different cropping modes on crop root growth, yield, and rhizosphere soil microbes' number[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (1): 125—132. [雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 不同种植模式对作物根系生长、产量及根际土壤微生物数量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (1): 125—132.]
- [31] Ren F L, Zhang X B, Sun N, et al. A meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (1): 119—128. [任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (1): 119—128.]
- [32] Chu H Y, Lin X G, Fujii T, et al. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39 (11): 2971—2976.
- [33] Singh M K, Ghoshal N. Variation in soil microbial biomass in the dry tropics: Impact of land-use change[J]. *Soil Research*, 2014, 52 (3): 299.
- [34] Chen J, Ma Z M, Liu L L, et al. Effect of tillage system on soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (3): 667—675. [陈娟, 马忠明, 刘莉莉, 等. 不同耕作方式对土壤有机碳、微生物量及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (3): 667—675.]
- [35] Sun B H, Hallett P D, Caul S, et al. Distribution of soil carbon and microbial biomass in arable soils under different tillage regimes[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338 (1/2): 17—25.
- [36] Zhang L E, Shuang W Y, Yun A P, et al. Spatio-temporal variability and the influencing factors of soil available potassium in 30 years in Quzhou County, Hebei

- Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(5): 923—933. [张玲娥, 双文元, 云安萍, 等. 30年间河北省曲周县土壤速效钾的时空变异特征及其影响因素[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 923—933.]
- [ 37 ] Liu W N, Wu W L, Wang X B, et al. Effects of soil type and land use pattern on microbial biomass carbon[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 406—411. [刘文娜, 吴文良, 王秀斌, 等. 不同土壤类型和农业用地方式对土壤微生物量碳的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 406—411.]
- [ 38 ] Guo X X, Liu J H, Zhang X J, et al. Effects of non-tillage on soil microbial C, N and P in plough layer of oat field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 575—582. [郭晓霞, 刘景辉, 张星杰, 等. 免耕对旱作燕麦田耕层土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 575—582.]

(责任编辑: 卢 萍)