

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1783–1791.

LI Chun-yue, HAO Ya-hui, XUE Ying-long, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in the farmland of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1783–1791.



开放科学 OSID

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越^{1,2}, 郝亚辉¹, 薛英龙¹, 王益³, 党廷辉^{4*}

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 地理学国家级实验教学示范中心(陕西师范大学), 西安 710119; 3. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为研究长期不同施肥方式对土壤微生物量碳、氮、磷含量的影响, 以国家黄土高原农业生态试验站长期定位施肥试验为研究对象, 选取不施肥(CK)、单施氮肥(N)、单施磷肥(P)、施氮磷肥(NP)、单施有机肥(M)、氮肥配施有机肥(NM)、磷肥配施有机肥(PM)、氮磷肥配施有机肥(NPM)8个处理, 应用氯仿熏蒸-浸提法和生态化学计量比, 研究了30 a不同施肥方式下土壤微生物量碳、氮、磷含量变化及其与土壤基本理化性状的关系。结果表明: 长期施肥较CK处理均能提高土壤微生物量氮、磷含量; 与CK相比, 施用化肥处理的微生物量碳含量均有所降低, 而微生物量氮、磷含量显著提高; 除NM处理外, 施用有机肥处理的土壤微生物量碳、氮、磷含量较CK处理均显著提高。长期单施化肥、有机肥和化肥有机肥配施处理的微生物量C:N显著低于CK处理, 等量施磷处理(P、NP、PM、NPM)的微生物量C:P、N:P均低于CK和其余施肥处理, 而NM处理的微生物量C:P、N:P显著高于其余处理。冗余分析显示, 土壤全氮($F=13.9, P=0.002$)对土壤微生物生物量影响最大, 解释了微生物量变化的5.3%, 各理化性质的影响顺序为全氮>全磷>pH>有机质; 相关性分析表明, 土壤微生物量碳、磷分别与土壤有机质、全氮、全磷呈显著正相关, 土壤微生物量氮与有机质、全氮呈显著正相关。长期单施化肥使土壤酸碱度发生改变, 对微生物的生命活动产生抑制作用。而长期化肥配施有机肥能不同程度提高土壤养分含量, 促进土壤微生物的生长繁殖, 进而增强微生物对碳、氮、磷等元素的吸收利用, 对于提高土壤肥力和肥料利用率具有重要意义。

关键词: 长期施肥; 土壤微生物生物量; 黄土旱塬; 农田

中图分类号 S154.3 文献标志码 A 文章编号 :1672-2043(2020)08-1783-09 doi:10.11654/jaes.2020-0240

Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in the farmland of the Loess Plateau, China

LI Chun-yue^{1,2}, HAO Ya-hui¹, XUE Ying-long¹, WANG Yi³, DANG Ting-hui^{4*}

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Geography National Experimental Teaching Demonstration Center (Shaanxi Normal University), Xi'an 710119, China; 3. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Studies on the effect of fertilization patterns on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus provide scientific basis for improving the efficiency of fertilizer utilization driven by soil microorganisms and understanding the sustainable development of agriculture. Based on the long-term fertilization experiment in the Changwu Agro-ecological Experimental Station, no fertilizer (CK), single application of nitrogen fertilizer (N), single application of phosphorus fertilizer (P), single application of nitrogen and phosphorus

收稿日期: 2020-03-04 录用日期: 2020-04-02

作者简介: 李春越(1978—), 女, 博士, 副教授, 从事土壤生态方面研究。E-mail: chunyueli@snnu.edu.cn

*通信作者: 党廷辉 E-mail: dangth@ms.iswc.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501602); 国家自然科学基金项目(41501255, 41671269); 陕西省自然科学基金项目(2019JM-518); 中央高校基本科研业务费专项(GK201603073)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2016YFC0501602); The National Natural Science Foundation of China (41501255, 41671269); The Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (2019JM-518); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (GK201603073)

fertilizer (NP), single application of organic fertilizer (M), nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer (NM), phosphorus fertilizer combined with organic fertilizer (PM), and nitrogen fertilizer combined with phosphorus fertilizer and organic fertilizer (NPM) treatment methods were selected to test the soil microbial carbon, nitrogen, and phosphorus by chloroform fumigation-extraction method and ecological stoichiometric ratio method. Moreover, the relationship between soil microbial properties and soil physical and chemical properties were analyzed in this study. The results showed that long-term fertilization improves the nitrogen and phosphorus content of soil microorganism than CK treatment; compared with CK, chemical fertilizer decreased soil microbial biomass carbon while significantly increasing the microbial biomass of nitrogen and phosphorus; organic fertilizer significantly increased the soil microbial biomass of carbon, nitrogen, and phosphorus than CK with the exception of NM treatment; application of fertilizers significantly decreased the microbial biomass C:N than CK; the treatments with phosphorus application (P, NP, PM, and NPM) decreased C:P and N:P than other treatments, while C:P and N:P of NM treatment significantly higher than other treatments. The redundancy analysis showed that the factors which influence soil microbial biomass was in the order of total nitrogen, total phosphorus, pH, and organic matter; soil total nitrogen had the greatest impact ($F=13.9$, $P=0.002$) on soil microbial biomass and explained 5.3% of the change in microbial biomass; the correlation analysis showed that soil microbial biomass carbon and phosphorus were significantly positively correlated with soil organic matter, total nitrogen, and total phosphorus, while soil microbial biomass nitrogen was significantly positively correlated with organic matter and total nitrogen. Long-term application of chemical fertilizers changes the soil pH and inhibits microbial properties in the farmland of the Loess Plateau. Long-term application of chemical fertilizers with organic fertilizers improves soil nutrient content and soil microbial biomass, which facilitate the efficient utilization of nitrogen and phosphorus fertilizers.

Keywords: long-term fertilization; soil microbial biomass; Loess Plateau; farmland

土壤微生物是陆地生态系统的重要组成部分,通过其生长代谢过程促进土壤有机质降解、加快腐殖质形成和能量转换,是土壤养分转化的动力源泉^[1]。土壤微生物生物量是土壤有机质中最为活跃的部分,其含量高低可以表征土壤肥力的变化水平,对维持土壤生态系统平衡有重要意义^[2-3]。土壤微生物生物量是指土壤环境中活动的微生物总量(不包括活体植物),一般包括微生物量碳、微生物量氮、微生物量磷和微生物量硫。土壤微生物生物量变化能敏感反映出土壤养分的变化,并有效表征土壤有机质的代谢强度^[4]。土壤微生物生物量受土壤pH、温度、透气性等环境因子影响^[5],施肥和翻耕等农业管理措施也与其活性关系密切^[6]。

农业生产过程中施肥在提供作物生长所必需营养元素的同时,对土壤中微生物生物量和群落结构产生显著影响^[7-9]。国内外许多学者基于不同地区研究了长期不同施肥方式对土壤微生物生物量和微生物群落结构的影响^[10-12]。研究发现有机肥的施加有利于增加土壤有机质和土壤养分含量,尤其是化肥配施有机肥可显著提高土壤微生物生物量,但由于气候特性、耕作方式以及种植作物类型等的复杂性,导致其对土壤微生物数量、活性和群落结构影响各异。Jangid等^[13]研究发现,长期施肥对土壤微生物群落的影响比不同土地利用方式或季节变化更显著。孙瑞

等^[5]研究发现,长期撂荒和施用化肥处理的土壤微生物量碳、氮含量显著高于不施肥和长期休闲处理,且两两处理间无显著差异。徐一兰等^[14]研究结果表明,长期施肥可以提高双季稻田土壤微生物量碳、氮含量和微生物熵,且化肥配施有机肥显著高于其余处理。臧逸飞等^[15]通过研究长期施肥对小麦连作土壤微生物生物量的影响发现,长期施用有机肥较不施肥能显著提高土壤微生物量碳、氮含量,而施用化肥与不施肥相比,土壤微生物量碳、氮含量无显著差异。Chu等^[16]通过田间试验发现,长期施用有机肥对土壤微生物量碳和脱氧酶活性具有显著影响,平衡施肥的土壤微生物代谢活性明显高于养分缺乏的施肥处理。

虽然以往大量研究均表明化肥配施有机肥是提高土壤微生物量碳、氮、磷和固持土壤养分的主要途径,但由于不同施肥条件下养分投入状况和种植作物类型等的差异,使其对土壤微生物生物量影响的研究结果不尽相同。为深入了解养分输入对黄土旱塬农田土壤微生物特性的影响,本文以位于陕西省黄土高原农业生态试验站长期定位试验为研究平台,通过研究30 a不同施肥方式对土壤微生物生物量和土壤质量的影响,分析土壤微生物生物量与土壤生态化学计量特征之间的联系,以期为黄土旱塬农田土壤选用合理的施肥方式和实现农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于陕西省长武县长武黄土高原农业生态试验站,该地属典型的旱作农业区(35°14'N, 107°41'E),海拔1200 m,年均降水量580 mm,无霜期171 d,年均气温9.1℃。供试土壤为黑垆土(Cumulic Haplustoll, USDA 分类),土体通透性较好。长期定位施肥试验开始于1984年,小麦连作,试验起始时土壤本底值为:有机质(OM)10.50 g·kg⁻¹,全氮(TN)0.80 g·kg⁻¹,全磷(TP)1.26 g·kg⁻¹,pH 8.10。

1.2 试验设计

长期定位试验共8个处理,随机区组设计,每个处理3次重复。试验处理包括:(1)不施肥的小麦田(CK);(2)单施氮肥的小麦田(N);(3)单施磷肥的小麦田(P);(4)施用氮磷肥的小麦田(NP);(5)单施有机肥的小麦田(M);(6)氮肥配施有机肥的小麦田(NM);(7)磷肥配施有机肥的小麦田(PM);(8)氮磷肥配施有机肥的小麦田(NPM)。不同施肥处理作物种植模式均为小麦连作,常规耕作,9月中下旬播种,次年6月收获,一年一熟。施肥量分别为:过磷酸钙(P₂O₅)60 kg·hm⁻²·a⁻¹,尿素(N)120 kg·hm⁻²·a⁻¹,厩肥(M)75 t·hm⁻²·a⁻¹。所有肥料在播种前一次施入,试验田按大田丰产模式进行管理。

1.3 试验方法

2015年8月小麦收获后,采用五点采样法取耕层土(0~20 cm)鲜土样约1 kg,去除砂砾和大于1 cm的杂质,过2 mm筛,调节含水量至田间最大持水量的60%。将过筛土样置于放有去离子超纯水和0.1 mol·L⁻¹ NaOH溶液的4℃黑暗密闭圆形容器平衡一周,然后取其中一半用于测定土壤微生物量碳、氮、磷,剩余土样风干保存,用于土壤基本理化指标测定。

土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、微生物量磷(MBP)采用氯仿-熏蒸法测定。

微生物量碳、氮测定:称取3份相当于风干土壤质量20 g的新鲜土壤于小烧杯中,将土样与盛有50 mL无酒精氯仿的烧杯共同放入真空干燥箱,抽真空至氯仿持续沸腾后关紧阀门,25℃下培养24 h后取出氯仿,再次反复抽真空至完全去除土壤中残余氯仿,加入0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄溶液50 mL,25℃下充分振荡30 min后过滤浸提;另外称取3份土壤样品直接加入0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄溶液50 mL浸提。土壤微生物量碳采用K₂SO₄浸提-TOC仪测定,微生物量氮采用

K₂SO₄浸提-连续流动分析仪测定。

$$\text{微生物量碳}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})=2.64E_c$$

$$\text{微生物量氮}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})=E_c/0.54$$

式中:2.64和0.54分别为氯仿熏蒸杀死的微生物体的碳、氮被硫酸钾浸提出来的比例; E_c 为熏蒸与未熏蒸浸提液中碳质量分数的差值^[17]。

微生物量磷测定:称取3份相当于风干土壤质量5 g的新鲜土壤于小烧杯中,将土样与盛有50 mL无酒精氯仿的烧杯共同放入真空干燥箱中,抽真空至氯仿持续沸腾后关紧阀门,25℃下培养24 h后取出氯仿,再次反复抽真空至完全去除土壤中残余氯仿,加入pH 8.5的0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃溶液100 mL,25℃下充分振荡30 min,滤液磷浓度采用钼锑抗比色法测定;另外称取6份土壤,其中3份加入250 mg·L⁻¹ KH₂PO₄溶液0.5 mL和0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH 8.5)溶液100 mL振荡、过滤,测定滤液中磷浓度,另外3份直接加入0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH 8.5)溶液100 mL浸提测定。

$$\text{微生物量磷}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})=(F-UF)/(KP\times R)$$

式中: F 、 UF 分别为熏蒸与未熏蒸浸提液中磷质量分数; KP 为浸提液测定出的微生物量磷占土壤微生物量磷的比例,即浸提效率,表示微生物量磷系数,取值0.4; R 为外加KH₂PO₄溶液的土样浸提液测定值与未熏蒸土样浸提液测定值的差值,表示加入的无机磷回收率^[18]。

土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤全磷采用高氯酸-浓硫酸法测定;土壤全氮采用全自动凯氏定氮仪测定;有机碳是将土样用0.1 mol·L⁻¹ HCl酸洗去无机态至无气泡后用去离子超纯水反复水洗,风干锡箔包样TOC仪灼烧测定;pH采用水土比2.5:1酸度计测定^[19]。

1.4 数据处理

试验数据为3次重复的平均值±标准差。采用Origin 2017绘图。利用Excel 2009软件处理后,采用SPSS 10.0软件对数据进行单因素方差(ANOVA)分析,Duncan多重比较。采用Canoco 5软件对不同施肥处理的土壤微生物生物量和土壤理化性状进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

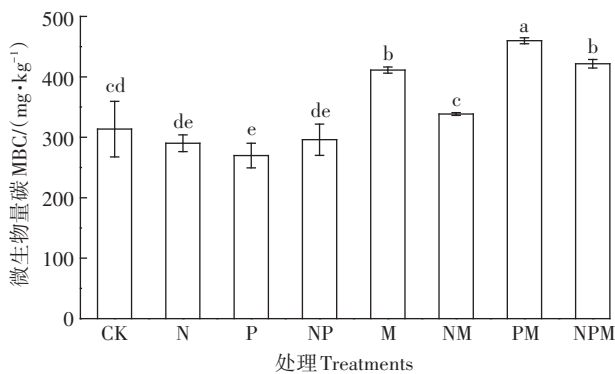
2.1 不同施肥方式对土壤化学性质的影响

长期施肥对土壤化学性质产生了显著影响(表1)。除M和P处理外,长期不同施肥条件下的土壤pH较CK处理有所降低。与CK处理相比,长期施肥可以提高土壤有机质、全磷及全氮含量,其中施加氮

磷有机肥明显增加有机质、全磷、全氮含量,增加量分别为106.74%、47.02%、71.62%;除全磷外,长期单施有机肥和化肥有机肥配施处理的有机质、全氮含量均高于化肥处理(N、P、NP)。长期单施和配施有机肥的土壤全氮含量显著高于CK和其余化肥处理。与CK处理相比,施用等量磷肥处理(P、NP、PM、NPM)可显著提高土壤全磷含量。长期施用化肥处理的土壤有机碳与全氮的比值(C/N)较CK处理降低了2.59%~34.40%,其中N处理C/N降低最多;化肥配施有机肥处理C/N均高于CK处理。

2.2 不同施肥方式对土壤微生物量碳含量的影响

长期不同施肥处理的土壤微生物量碳含量变化范围为269.87~459.71 mg·kg⁻¹(图1)。单施有机肥(M)和化肥配施有机肥处理的微生物量碳含量均高于CK和各化肥处理。与CK处理(313.55 mg·kg⁻¹)相比,长期施用化肥处理的土壤微生物量碳含量均有所



数据为平均值±标准差(n=3);不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同

Data are means±standard deviation(n=3); Different lowercase meant significant difference among treatments at 0.05 level. The same below

图1 长期不同施肥对土壤MBC的影响

Figure 1 Effects of long-term different fertilization on MBC of soil

降低,N、P、NP处理平均降幅分别为7.46%、13.93%、5.59%;而有机肥处理中M、PM、NPM处理的微生物量碳含量显著提高,平均涨幅分别为31.14%、46.62%和34.49%,表明化肥有机肥配施可补充土壤有机碳源,增加土壤有机质含量,为微生物生长繁殖提供良好的生境和所需能源。

2.3 不同施肥方式对土壤微生物量氮含量的影响

长期不同施肥处理的土壤微生物量氮含量变化范围为19.78~150.84 mg·kg⁻¹(图2)。与CK处理(19.78 mg·kg⁻¹)相比,N、P、NP处理的微生物量氮含量分别为CK处理的5.27、3.52、2.76倍,M、NM、PM、NPM分别为CK处理的7.62、5.42、4.26、4.55倍,表明长期施肥可显著提高土壤微生物量氮含量,其中以单施有机肥和氮肥配施有机肥效果更佳。除N处理外,不同有机肥处理的微生物量氮含量均高于其余化肥处理,其中M处理含量显著高于其余处理,表明无机氮肥对土壤微生物量氮含量具有显著影响。

2.4 不同施肥方式对土壤微生物量磷含量的影响

长期不同施肥处理的土壤微生物量磷含量变化范

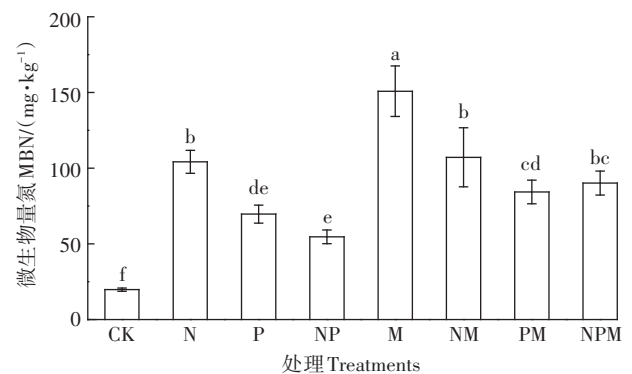


图2 长期不同施肥对土壤MBN的影响

Figure 2 Effects of long-term different fertilization on MBN of soil

表1 长期定位不同施肥对土壤化学性质的影响

Table 1 Effect of long-term different fertilization on soil chemical properties

处理 Treatments	pH(水土比2.5:1)	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	C/N
CK	8.04±0.00ab	16.33±0.69h	0.69±0.01e	0.72±0.01d	8.53±0.44cd
N	7.95±0.04b	17.50±0.96f	0.72±0.02de	0.81±0.01d	5.59±1.01e
P	8.04±0.05ab	16.97±0.35g	0.91±0.04abc	0.72±0.02d	8.31±0.74cd
NP	7.97±0.05b	19.85±0.20e	0.95±0.11ab	0.91±0.03c	7.78±0.46d
M	8.15±0.02a	26.62±1.50c	0.87±0.02bcd	1.19±0.02a	5.34±0.64e
NM	7.95±0.03b	30.04±5.37b	0.79±0.04cde	1.20±0.03a	9.20±0.27bc
PM	7.98±0.05b	25.95±4.80d	1.05±0.03a	1.10±0.04b	9.84±0.64b
NPM	7.72±0.06c	33.76±5.38a	1.01±0.05ab	1.24±0.04a	11.84±0.94a

注:数据为平均值±标准差(n=3);同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Data are means±standard deviation(n=3); Different lowercase in the same column meant significant difference among treatments at 0.05.

围为0.44~4.94 mg·kg⁻¹(图3)。除NM处理外,各施肥处理的微生物量磷含量均显著高于CK处理,且CK和NM处理间无显著差异,表明氮肥配施有机肥处理显著降低了土壤微生物量磷的水平。施用等量磷肥处理(P、NP、PM和NPM)的微生物量磷含量显著高于其余处理,分别为CK处理的6.43、8.05、7.06、10.07倍;等量磷肥配施有机肥处理的微生物量磷含量均高于相应的单施磷肥和氮磷肥处理,表明化学磷肥的施加可显著提高土壤无机磷库,其中以磷肥配施有机肥效果最好。

2.5 施肥方式不同对土壤微生物量碳、氮、磷化学计量比的影响

从土壤微生物量碳、氮、磷化学计量比来看,长期不同施肥处理的土壤微生物量C:N为2.75~15.80,微生物量C:P为76.45~718.03,微生物量N:P为13.97~175.00(图4)。与CK处理相比,长期施肥处理显著降低了土壤微生物量C:N、C:P;NM处理的微生物量C:P显著高于其余处理,且其余施肥处理间无显著差异。与CK处理相比,施用等量磷肥处理(P、NP、PM和NPM)显著降低了微生物量C:P、N:P,且各处理间无显著差异;其中,施用等量磷肥处理的微生物量N:P显著低于CK和其余施肥处理,分别较CK处理降低了51.39%、69.32%、46.45%、59.83%;而NM处理的微生物量N:P最大,较CK处理提高了284.39%。

2.6 土壤微生物量碳、氮、磷含量与土壤基本理化性状的相关性

以不同处理的土壤微生物生物量及化学计量比为响应变量,以土壤各理化指标为解释变量做冗余分析(RDA)。土壤TN含量作用最明显,解释了土壤微生物生物量含量变化的5.3%($F=13.9, P=0.002$),土壤化学性质共解释了土壤微生物生物量含量变化的96.7%,影响顺序为TN>TP>pH>OM。其中,第1轴解

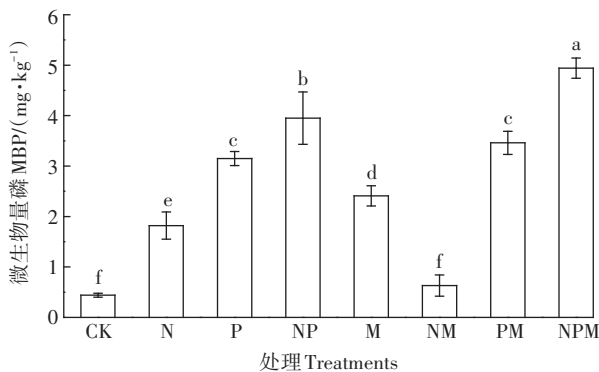


图3 长期不同施肥对土壤MBP的影响

Figure 3 Effects of long-term different fertilization on MBP of soil

释了其变异的86.58%,第2轴解释了6.73%(图5)。土壤微生物生物量与土壤理化性质存在一定的相关性, MBC与有机质、TP、TN呈显著正相关, MBN与OM、TN呈显著正相关, MBP与OM、TP、TN呈显著正相关。

3 讨论

3.1 长期施用化肥对土壤微生物量碳、氮、磷含量的影响

土壤微生物生物量是土壤养分转化的促进者,也是土壤碳、氮、磷等元素循环利用和有机质矿化的主要作用者^[20]。土壤微生物生物量含量高低及变化是

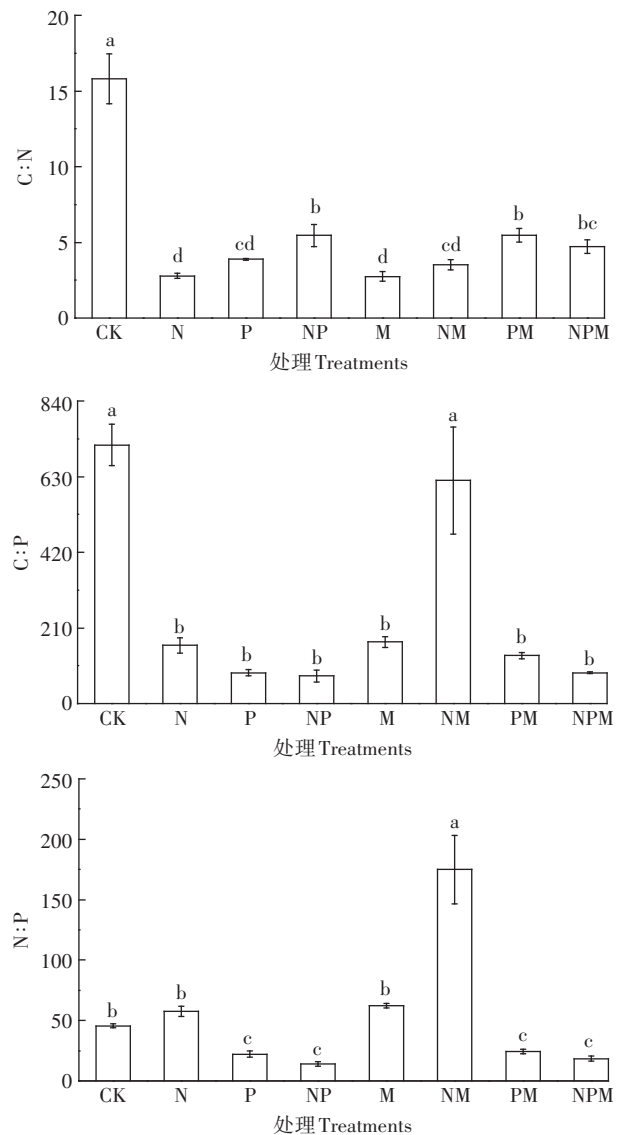


图4 长期不同施肥对微生物量碳、氮、磷化学计量比的影响
Figure 4 Effects of long-term fertilization on the stoichiometric ratio of microbial biomass to C, N and P

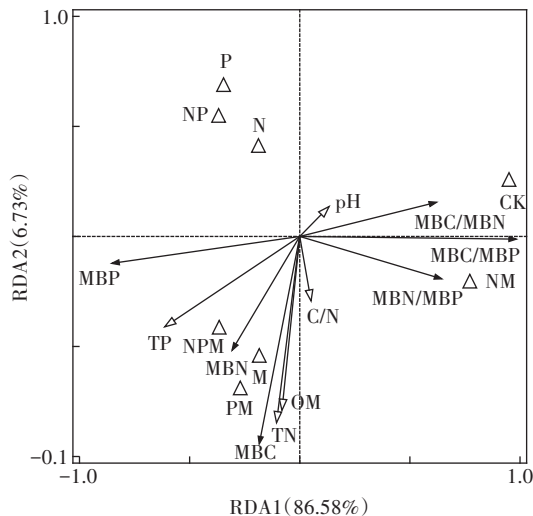


图5 不同施肥处理土壤中微生物量和各项理化指标的冗余分析
Figure 5 Redundancy analysis of microbial biomass and physical and chemical indexes in soil treated with different fertilizers

土壤肥力的重要依据,反映了土壤对有机质的吸收及固化能力^[21]。Zsolnay等^[22]的研究发现,施用有机肥能够增加土壤有机碳含量,单施化肥对土壤有机碳无明显影响。本研究结果表明,长期施用化肥处理的土壤微生物量碳含量较不施肥处理均有所降低,这可能是由于长期无机化肥的施用,使土壤酸化、板结、通气性降低,改变了土壤物理性状,抑制了土壤微生物的生命活动,同时由于无外源有机碳源补充,随着作物生长对土壤碳素的大量消耗,使得土壤有机碳含量逐渐减少,迫使土壤微生物将其体内固持的碳素释放出来以供作物利用,进而降低了土壤微生物量碳含量^[23]。本研究还发现,长期施用化肥处理土壤微生物量氮、磷含量显著高于不施肥处理。臧逸飞等^[15]的研究结果表明,与不施肥相比,长期施用无机肥能够增加土壤微生物量碳、氮含量但均无显著差异。长期合理施用氮、磷肥能够增加作物光合作用产物向地下部的分配,增加根系生物量和根系分泌物,使得供给土壤微生物同化和利用的氮、磷源充足^[24],这也可能是造成微生物量氮、磷含量增加的原因之一。

3.2 长期化肥配施有机肥对土壤微生物量碳、氮、磷含量的影响

本研究中,化肥配施有机肥处理的微生物量碳含量均高于不施肥和单施化肥处理,可能是由于化肥与有机肥配施提高了土壤养分的有效性和保水能力,不仅为土壤微生物补充了所需碳源,还为其创造了适宜的生存环境^[25]。郭振等^[26]通过研究黄壤稻田的土壤微生物生物量也发现,化肥有机肥配施处理的土壤有

机碳、全氮、微生物熵的变化与微生物量碳相一致,且均显著高于其余施肥处理。本研究还表明,长期施肥处理土壤微生物量氮、磷含量均高于不施肥处理,这可能是因为长期施肥可以提高作物的生物量,其中作物地上部生物量的提高能够促进作物的光合作用,使得较多的营养物质分配到作物地下部,而地下部生物量增加不仅能够促进更多的根系分泌物释放,还能增加作物根系残茬的还田量,为土壤微生物生存创造了有利生境^[26]。其中,除单施氮肥处理外,不同配施有机肥处理的微生物量氮含量均高于相应化肥处理。一方面可能是由于施用有机肥不仅能够加速土壤有机质矿化分解,提高土壤养分含量,为土壤微生物提供充足的碳源、氮源,促进其生长发育,而且能够改善土壤的理化性状,进而维持较高的土壤微生物量^[15];另一方面可能是由于长期施加有机肥可使氮的表现利用率提高,有效缓解了土壤中 NH_3 的挥发及 NO_3^- 的淋失,通过同化作用使较多的氮素迁移到微生物体内进行暂时固定^[27]。土壤微生物量磷含量对氮肥的响应与微生物量碳完全不同。长期单施氮肥显著提高了土壤微生物量磷含量,而氮肥配施有机肥处理微生物量磷含量则与不施肥处理间无显著差异,这可能是由于土壤中某些微生物能够将磷素以多聚磷酸盐的形式富集于体内,而施用氮肥也可提高土壤酸度,同时作物根系和微生物对磷素的活化作用都会增加土壤有效磷含量,进而提高土壤微生物量磷含量^[24]。而氮肥配施有机肥处理可能增加了土壤中具有固氮能力的微生物群落丰度,而有限的营养和空间竞争导致土壤中微生物量磷含量降低^[28]。施用等量磷肥处理(P、NP、PM和NPM)的微生物量磷含量显著高于其余处理,表明施加磷肥后土壤有效磷含量增加,一方面对作物的生长发育产生了积极作用,另一方面对土壤微生物量和活性也产生了直接或间接的影响,进而使更多的无机磷被同化固持到微生物体内。磷肥配施有机肥对微生物量磷增加作用更明显,这是因为施用有机肥不仅为土壤微生物生命活动提供了所需的营养物质和能量,也改善了土壤通气性等理化性状,促使微生物大量生长繁殖,将部分有机磷和矿化后的无机磷同化为微生物量磷^[29]。另外,有机肥本身含有的微生物在进入土壤后也会迅速繁衍,这也使得土壤微生物量磷含量相应增加^[30]。

3.3 长期施肥对土壤微生物量碳、氮、磷化学计量比的影响

本研究发现,长期施肥处理的土壤微生物量C:N、

C:P均显著低于不施肥处理,表明长期施肥会对土壤微生物活性产生显著影响,这与王传杰等^[31]的研究结果相同。一方面可能是因为长期施用无机肥降低了土壤C/N,加速土壤中原有有机碳矿化分解,导致土壤碳库中积累的有机碳总量较少^[26],同时由于作物生长加速了对土壤碳源的消耗,而土壤碳库并未得到进一步补充,迫使微生物将其固持的碳素释放出来以供植物吸收利用^[31];另一方面可能是因为随着氮、磷肥施入土壤后微生物量碳、氮含量明显增加,尤其是外源磷肥施加对土壤微生物量磷含量的增加更为显著,导致微生物量C:N、C:P降低。而长期施用有机肥能向土壤直接提供大量的有机氮、磷等营养元素,有利于土壤微生物的生长繁殖,同时外源有机物质的施入不仅调节了土壤氮素的供应能力,也改善了土壤磷的有效性,加强了微生物对氮、磷素的固持作用^[32],进而也降低了土壤微生物量C:N、C:P。但在本研究中,不施肥和氮肥配施有机肥处理的微生物量C:P均显著高于其余处理,这可能是由于长期不施肥条件下,随着作物对土壤磷素消耗的加剧,使得微生物量磷将自身固持的磷素释放出来,而氮肥配施有机肥处理增加了土壤有机氮含量,使得微生物可固定的氮素增加,由于固氮微生物对土壤养分的竞争而抑制了磷素的转化分解,导致土壤微生物量磷含量降低,进而提高了土壤微生物量C:P,降低了微生物量N:P。本研究还发现,施用等量磷肥处理(P、NP、PM、NPM)的微生物量C:P、N:P均显著低于不施肥处理,这是因为长期施用磷肥会使土壤有效磷增加,这加速了微生物对土壤难溶性无机磷溶解和有机磷矿化,使得较多的磷素被固持在土壤微生物体内^[29],进而降低了微生物量C:P、N:P。

3.4 土壤微生物生物量和土壤基本理化性状的相关性

土壤微生物生物量和土壤基本理化性状的相关分析显示,微生物量碳、氮、磷含量均与有机质、全氮含量存在显著或极显著相关关系,表明土壤微生物生物量可作为土壤肥力的重要评价指标,并有效表征土壤有机物质的代谢强度。这是由于长期施肥处理调节了土壤C/N,改善了土壤含水率、透气性和水热平衡等物理性状,使得土壤中碳、氮、磷等元素含量发生变化,加速了土壤微生物对有机质的分解速率,作物在吸收更多养分促进其生长的同时,会导致更多的凋落物积聚在表层土壤,进而增加了土壤碳、氮等元素含量,因此土壤微生物生物量与理化性质表现出显著的相关性,宋震震等^[33]的研究结果也验证了这一观

点。长期施肥的土壤微生物量磷含量与全磷存在极显著相关关系,表明微生物量磷含量变化是评价土壤磷素转化的重要指标,这与刘恩科等^[27]的研究结果相同。土壤微生物生物量与pH呈不同程度的负相关关系,表明长期施肥处理使土壤酸碱度发生变化,对微生物的生命活动产生了抑制作用。本研究结果表明,长期施用化肥处理的土壤微生物量碳含量较不施肥处理均有不同程度的减少,而土壤微生物量氮、磷对化肥的响应则完全不同。施入化肥后土壤微生物量碳、氮含量显著提高,可能是由于作物生长消耗了大量养分,而长期施用化肥虽然能够调节土壤氮素的供应能力,也改善了土壤磷的有效性^[32],但无外源有机碳源补充,降低了土壤C/N,进而对土壤微生物生物量和活性产生明显影响^[23]。除氮肥配施有机肥处理外,化肥配施有机肥处理的土壤微生物量碳、氮、磷含量均显著高于不施肥处理,这可能是由于施用有机肥不仅改善了土壤理化性质,而且还能够维持和提高土壤微生物的生态环境和群落结构,同时为微生物生长繁殖提供所需养分,进而促进土壤中原有和新加有机质的降解和转化,使得土壤微生物量也得到相应的增加^[29]。

4 结论

(1)长期施肥显著改变土壤微生物量碳、氮、磷及其生态化学计量比。施用化肥明显降低了土壤微生物量碳含量,但微生物量氮、磷对施用化肥的响应与之相反;有机肥及有机肥配施对微生物量氮、磷含量增加作用显著。土壤微生物量碳、磷与土壤有机质、全氮、全磷呈显著正相关,微生物量氮与有机质、全氮呈显著正相关。长期单施化肥使土壤酸碱度发生改变,对微生物的生命活动产生抑制作用。

(2)长期连续施用化肥可导致板结等问题而对土壤养分产生一定限制,化肥配施有机肥则可以缓解胁迫,在满足作物和土壤微生物养分需求的同时能够提高土壤微生物活性和生态代谢效率。因此,长期化肥配施有机肥能不同程度地提高土壤养分含量,促进土壤微生物的生长繁殖,进而增强微生物对碳、氮、磷等元素的吸收利用,对于提高土壤肥力和肥料利用率具有重要意义。土壤微生物活性、数量和群落结构是一个不断变化的动态过程,气温、降水和翻耕等因素的共同作用也会导致长期不同施肥条件下农田土壤水热条件、土壤肥力和有机质含量发生明显变化,进而也对土壤养分转化和土壤微生物特性产生影响,因此

需要建立长期的观测研究,为黄土旱塬地区选择最佳的培肥措施提供科学依据。

参考文献:

- [1] Degens B P, Schipper L A, Sparling G P, et al. Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 189-196.
- [2] Zhao X, Wang Q, Kakubari Y. Stand-scale spatial patterns of soil microbial biomass in natural cold-temperate beech forests along an elevation gradient[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1466-1474.
- [3] Fanin N, Hättenschwiler S, Fromin N. Litter fingerprint on microbial biomass, activity, and community structure in the underlying soil[J]. *Plant and Soil*, 2014, 379(1/2): 79-91.
- [4] 王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 等. 不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(1): 125-133.
- WANG Ning, LUO Jia-lin, ZHAO Ya-hui, et al. Effects of different models of wheat straw return on paddy soil microbial activities and community compositions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 125-133.
- [5] 孙瑞, 孙本华, 高明霞, 等. 长期不同土地利用方式下土壤微生物特性的变化[J]. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(3): 655-663.
- SUN Rui, SUN Ben-hua, GAO Ming-xia, et al. Changes of soil microbial characteristics under long-term different land use patterns on an anthropogenic loess soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3): 655-663.
- [6] 朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 等. 秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(12): 2785-2792.
- ZHU Xing-juan, LI Gui-hua, TU Shu-xin, et al. Effects of maize straw and straw biochar on soil fertility and the nitrogen mineralization process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2785-2792.
- [7] 杨亚东, 王志敏, 曾昭海. 长期施肥和灌溉对土壤细菌数量、多样性和群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(2): 290-301.
- YANG Ya-dong, WANG Zhi-min, ZENG Zhao-hai. Effects of long-term different fertilization and irrigation managements on soil bacterial abundance, diversity and composition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(2): 290-301.
- [8] Liang B, Yang X, He X, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 47(2): 121-128.
- [9] Ge G, Li Z, Fan F, et al. Soil biological activity and their seasonal variations in response to long-term application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Plant and Soil*, 2009, 326(1/2): 31-44.
- [10] 高明霞, 孙瑞, 崔全红, 等. 长期施用化肥对壤土微生物多样性的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(6): 1572-1580.
- GAO Ming-xia, SUN Rui, CUI Quan-hong, et al. Effect of long-term chemical fertilizer application on soil microbial diversity in anthropogenic loess soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1572-1580.
- [11] 杨宇虹, 晋艳, 黄建国, 等. 长期施肥对植烟土壤微生物的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2014, 20(5): 1186-1193.
- YANG Yu-hong, JIN Yan, HUANG Jian-guo, et al. Effects of long-term fertilization on soil microorganisms in tobacco fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1186-1193.
- [12] Kibblewhite M G, Ritz K, Swift M J. Soil health in agricultural systems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 685-701.
- [13] Jangid K, Williams M A, Franzluebbers A J, et al. Relative impacts of land-use, management intensity and fertilization upon soil microbial community structure in agricultural systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(11): 2843-2853.
- [14] 徐一兰, 唐海明, 肖小平, 等. 长期施肥对双季稻田土壤微生物学特性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5847-5855.
- XU Yi-lan, TANG Hai-ming, XIAO Xiao-ping, et al. Effects of different long-term fertilization regimes on the soil microbiological properties of a paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5847-5855.
- [15] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1445-1451.
- ZANG Yi-fei, HAO Ming-de, ZHANG Li-qiong, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1445-1451.
- [16] Chu H, Lin X, Fujii T, et al. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2971-2976.
- [17] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(3): 167-177.
- [18] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14: 319-329.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] 吕盛, 王子芳, 高明, 等. 秸秆不同还田方式对紫色土微生物量碳、氮、磷及可溶性有机质的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 267-272.
- LÜ Sheng, WANG Zi-fang, GAO Ming, et al. Effects of different straw returning methods on soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and soluble organic matter in purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 267-272.
- [21] 贺若阳, 杨万勤, 杨开军, 等. 川西亚高山3种森林土壤碳氮磷及微生物生物量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 606-611.
- HE Ruo-yang, YANG Wan-qin, YANG Kai-jun, et al. Soil C, N, P and microbial biomass properties of three dominant subalpine forests

- of western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22(4):606-611.
- [22] Zsolnay A, Görlitz H. Water extractable organic matter in arable soils: Effects of drought and long-term fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(9):1257-1261.
- [23] 王会, 孟凡, 诸葛玉平, 等. 有机和常规生产施肥方式对棕壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2):180-191.
- WANG Hui, MENG Fan, ZHUGE Yu-ping, et al. Effects of organic and conventional fertilizing methods on microbial biomass and enzyme activity in brunisolic soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):180-191.
- [24] 齐莎, 赵小蓉, 郑海霞, 等. 内蒙古典型草原连续5年施用氮磷钾土壤生物多样性的变化[J]. *生态学报*, 2010, 30(20):5518-5526.
- QI Sha, ZHAO Xiao-rong, ZHENG Hai-xia, et al. Changes of soil biodiversity in Inner Mongolia steppe after 5 years of N and P fertilizer applications[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20):5518-5526.
- [25] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17):5502-5511.
- MA Xiao-xia, WANG Lian-lian, LI Qing-hui, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17):5502-5511.
- [26] 郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5):1168-1174.
- GUO Zhen, WANG Xiao-li, XU Hu, et al. A large number of long-term application of organic fertilizer can effectively increase microbial biomass carbon and nitrogen in yellow paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5):1168-1174.
- [27] 刘恩科, 梅旭荣, 赵秉强, 等. 长期不同施肥制度对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(3):63-68.
- LIU En-ke, MEI Xu-rong, ZHAO Bing-qiang, et al. Long-term effects of different fertilizer management on microbial biomass C, N and P in a fluvo-aquic soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(3):63-68.
- [28] 徐万里, 唐光木, 葛春辉, 等. 长期施肥对新疆灰漠土土壤微生物群落结构与功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(2):468-477.
- XU Wan-li, TANG Guang-mu, GE Chun-hui, et al. Effects of long-term fertilization on diversities of soil microbial community structure and function in grey desert soil of Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2):468-477.
- [29] 韩颖, 辛晓通, 韩晓日, 等. 不同模式长期定位施肥对土壤微生物区系的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2016, 37(2):51-58.
- HAN Ying, XIN Xiao-tong, HAN Xiao-ri, et al. Effects of different long-term fertilization patterns on soil microflora[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2016, 37(2):51-58.
- [30] 王晔青, 韩晓日, 马玲玲, 等. 长期不同施肥对棕壤微生物量磷及其周转的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2):322-327.
- WANG Ye-qing, HAN Xiao-ri, MA Ling-ling, et al. Effect of long-term fertilization on the content and turnover of soil microbial biomass P[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2):322-327.
- [31] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 等. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(11):3848-3858.
- WANG Chuan-jie, WANG Qi-qi, XU Hu, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11):3848-3858.
- [32] 刘益仁, 郁洁, 李想, 等. 有机无机肥配施对麦-稻轮作系统土壤微生物学特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5):989-994.
- LIU Yi-ren, YU Jie, LI Xiang, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microbiological characteristics in a wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):989-994.
- [33] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3):525-533.
- SONG Zhen-zhen, LI Xu-hua, LI Juan, et al. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3):525-533.