

DOI: 10.5846/stxb202003050411

李春越, 苗雨, 薛英龙, 张蓓蓓, 王益, 党廷辉, 张文婷, 常顺. 长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2022, 42(1): 370-378.

Li C Y, Miao Y, Xue Y L, Zhang B B, Wang Y, Dang T H, Zhang W T, Chang S. Ecological stoichiometric characteristics of soil-microorganism-plant system in the Loess upland under long-term fertilization. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 370-378.

长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征

李春越^{1,*}, 苗雨¹, 薛英龙¹, 张蓓蓓¹, 王益², 党廷辉³, 张文婷¹, 常顺¹

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 探讨长期不同施肥制度对农田土壤、植物生态系统的碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其生态化学计量比的影响, 可为揭示该系统能量平衡和养分循环, 实现农业生态系统元素平衡及可持续发展提供参考意义。以位于黄土高原半干旱地区的长武国家黄土高原农业生态实验站长期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, 分析了黄土旱塬典型农田土壤-微生物-植物生态系统中 C、N、P 含量及其生态化学计量变化规律。研究表明: 1) 长期单施有机肥和化肥配施有机肥处理可显著提高土壤和有机质 C、N、P 含量。2) 氮、磷肥的输入显著降低了土壤和小麦 C:N、N:P, 施 P 显著降低了有机态 C:P 和小麦 C:P; 有机肥配施对微生物生物量和小麦 C:N:P 的影响更为明显。3) 长期有机肥配施条件下土壤养分和小麦化学计量比存在较强的相关关系。微生物生物量碳与有机 C、N、P 呈显著正相关, 土壤微生物生物量氮与土壤 N、P 总量呈显著正相关, 微生物生物量磷与土壤 C、N、P 总量含量呈显著负相关; 植株碳含量与微生物生物量氮呈显著正相关, 植物磷含量与土壤有机磷呈显著正相关。黄土区农田生态系统土壤 TC:TP 与 TC:TN, TN:TP 呈正相关, 土壤 TN:TP 与有机碳和有机磷比呈正相关, 植物植株 C:N 与 BC:BP, BN:BP 呈正相关。长期施肥明显改变了土壤和植物 C、N、P 含量及化学计量比。氮肥配施有机肥可明显提高微生物对土壤碳素的转化分解, 导致有机质和微生物量的化学计量比发生变化, 进而提高作物对土壤碳素的固定能力, 增强植株对外源养分的输入。

关键词: 长期施肥; 黄土旱塬; 土壤-微生物-植物系统; 生态化学计量

Ecological stoichiometric characteristics of soil-microorganism-plant system in the Loess upland under long-term fertilization

LI Chunyue^{1,*}, MIAO Yu¹, XUE Yinglong¹, ZHANG Beibei¹, WANG Yi², DANG Tinghui³, ZHANG Wenting¹, CHANG Shun¹

1 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: To explore the effects of different fertilization systems on carbon, nitrogen and phosphorus contents and ecological stoichiometric ratio of farmland soil and plant ecosystem in a long time can provide reference for revealing the energy balance

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41501255); 陕西省自然科学基金(2019JM-518); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(GK201603073); 国家重点研发计划课题(2016YFD0800105)

收稿日期: 2020-03-05; 网络出版日期: 2021-11-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chunyue_li@snnu.edu.cn

and nutrient cycle of the system and realizing the balance and sustainable development of agricultural ecosystem elements. In this study, the long-term fertilization experiment at the Loess Plateau agricultural ecology experimental station of Changwu, located in the semi-arid region of the Loess Plateau, was taken as the research object. No fertilization (CK), single application of nitrogen (N), single application of phosphate (P), single application of nitrogen and phosphate (NP), single application of organic fertilizer (M), combined application of nitrogen and organic fertilizer (NM), application of phosphate and organic fertilizer (PM), and combined application of nitrogen and phosphate and organic fertilizer were selected. The contents of C, N and P in soil, microbe and plant in typical agricultural ecosystem of the Loess Plateau were analyzed, and the change rule of stoichiometry and its influencing factors were analyzed. The results showed that: (I) compared with CK, long-term single application of organic fertilizer and fertilizer combined with organic fertilizer treatment could significantly improve the carbon, nitrogen and phosphorus content of soil and organic matter. (II) With the input of exogenous nitrogen and phosphate fertilizer, compared with CK treatment, N and P treatment significantly reduced soil and wheat C:N and N:P, respectively, and P treatment significantly reduced organic matter and wheat C:P. However, the effect of organic fertilizer combination on microbial biomass and wheat C:N:P was more obvious. (III) There was a significant correlation between soil nutrients and the stoichiometric ratio of wheat under the condition of long-term organic fertilizer application, compared with no fertilization. The results showed that long-term fertilization significantly changed soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and stoichiometric ratio, and fertilizer combined with organic fertilizer could significantly improve soil fertility in the xeric farmland of loess, resulting in the change of stoichiometric ratio of organic matter and microbial biomass, which had a significant impact on the stoichiometric ratio of wheat plants.

Key Words: long-term fertilization; Loess upland; soil-microorganism-plant system; stoichiometric ratio

碳(C):氮(N):磷(P)化学计量特征常被用于研究生态系统不同组成部分之间的反馈和相互关系,探索生物过程中各个元素之间的相互作用和平衡^[1],反映植物的生长速度和营养物质的利用效率及其生理代谢,其中C:N、C:P在一定程度上能表明氮、磷等养分的供应情况,而氮磷比的临界值被认为是影响植物生长的重要评价指标^[2-4]。明确元素化学计量学与微生物生物量的关系,建立土壤、植物组织和微生物等不同生态系统组分之间的联系,对于了解农业生态系统中肥料投入对养分循环的影响具有重要意义^[5]。Ren等^[6]研究表明通过利用土壤C、N和P和微生物生物量间的相关关系,来探究土壤微生物变化对土壤养分的影响。Liu等^[7]研究发现,植物组织、根际土壤和酶化学计量学在物种间和演替年龄间发生显著变化。植物、土壤和微生物具有不同的C、N和P化学计量比,这些化学计量比参与陆地生态系统的生物过程和养分循环^[8]。碳和其他养分在植物与土壤之间循环的动态受到微生物和植物根系产生的分解有机底物的酶的调节^[9]。

土壤中C、N和P通常与土壤性质和人类活动(如施肥)相关,并受到强烈影响^[10]。施肥可提高植物生物量产量,改变土壤养分状况,调控土壤微生物活性^[11],对土壤-微生物-植物生态系统的结构与养分循环途径产生影响^[12]。通过有机或无机肥料施用会影响土壤中其它养分的有效性及其生物地球化学循环。目前关于黄土高原粮食主产区关中平原的农田主要关注单个养分与产量关系较多,对农田生态系统C、N、P生态化学计量综合研究的仍然不够系统^[13]。长期不同施肥条件下是否能够导致黄土旱塬农田小麦养分利用变化,同时植物和微生物生态化学计量学特征对于由于养分输入而改变了的土壤微环境到底会如何响应?因此,为了进一步明确养分输入对黄土旱塬农田土壤-微生物-植物C:N:P生态化学计量学特征的影响,本研究选取位于陕西省的长武黄土高原农业生态试验站中8种长期施肥处理,以长期施肥改变农田生态系统碳氮磷生态化学计量内稳性为科学问题,通过测定土壤、植物、微生物量的C、N、P含量,及生态化学计量变化规律,以期研究化肥配施对黄土旱塬农田土壤质量的影响及合理施用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

本研究选取实验地点为黄土高原中南部的长武农业生态实验站长期施肥试验场(35°14' N, 107°41' E)。该站属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量为 580 mm,年均气温为 9.1℃,无霜期为 171 d,站内土壤均为黑垆土(Cumulic Haplustoll, USDA 分类)。试验区始建于 1984 年,其所处位置为典型的旱作农业区,小麦为该地区主要作物^[12]。

1.2 试验设计

长期定位施肥试验开始于 1984 年,每个试验小区面积为 4 m×8 m,中间设置 1 m 的缓冲带。采用单因素随机区组设计,共设 8 个不同处理,每个处理 3 次重复。分别为:1)不施肥(CK);2)单施氮肥(N);3)单施磷肥(P);4)施用氮磷肥(NP);5)单施有机肥(M);6)氮肥配施有机肥(NM);7)磷肥配施有机肥(PM);8)氮磷肥配施有机肥(NPM)。不同施肥处理作物种植模式小麦连作,常规耕作,9 月中下旬播种,次年 6 月收获,一年一熟。试验中氮肥为尿素,总氮量 46.4%;磷肥为过磷酸钙,含 P₂O₅ 46.0%;有机肥为厩肥,平均有机质含量为 106.0 g/kg。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 样品采集

样品采集时间为 2018 年 6 月,采用五点采样法收集耕作层土壤(0—20 cm),将其混匀后除土壤中杂草、砾石、土壤动物等杂质,新鲜土样过 2 mm 筛,调节含水量到田间最大持水量 60%,置于放有去离子超纯水和 NaOH 溶液的 4℃ 黑暗密闭圆形容容器平衡一周,用于测定土壤微生物生物量 C、N、P 含量。剩余土样置于阴凉通风处风干后过筛测定 C、N、P 全量和有机量。植物样品于试验小区收获期采集,随机抽取 50 株杀青、风干、粉碎后测量植物 C、N、P 含量。

1.4 试验方法

土壤全碳(TC)和植物样品全碳(C_w)用 TOC 法测定,其中土壤有机碳(OC)测定将土样用 0.1 mol/L HCL 酸洗去无机态至无气泡后去离子超纯水反复水洗,风干锡箔包样 TOC 仪灼烧测定。土壤全氮(TN)采用全自动凯氏定氮仪测定;土壤有机氮(ON)的测定采用 Bremner 法;土壤全磷(TP)用高氯酸-浓硫酸法,土壤有机磷(OP)的测定使用灼烧后再用硫酸浸提测定;植物全氮(N_w)、全磷(P_w)采用盐酸-硝酸-HF 消解流动分析仪测定^[14]。土壤微生物生物量碳(BC)、氮(BN)、磷(BP)采用氯仿-熏蒸法测定^[15-16]。

1.5 数据处理

数据用 3 次平行测定的平均值±标准差表示,采用 Origin 2017 绘图。用 SPSS 24.0 对数据进行单因素方差分析、Duncan 事后比较和双变量相关性分析,显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤全碳、全氮、全磷含量及生态化学计量比的影响

图 1 可知,不同施肥处理的土壤 TC、TN、TP 含量分别为 15.86—26.41、0.83—1.35 和 0.73—1.21 g/kg。不同化肥有机肥配施处理的土壤 TC、TN 含量均显著高于不施肥、化肥处理,且化肥有机肥配施处理间土壤 TC、TN 含量无显著差异;不同化肥有机肥配施处理的土壤 TP 含量显著高于 CK 处理,其中 PM、NPM 处理的 TP 含量也显著高于其余处理。不同化肥处理的土壤 TC 含量与 CK 相比无显著差异,N、NP 处理的 TN 含量较 CK 显著提高了 12.18%、20.16%,N 处理的 TP 含量较 CK 显著提高了 34.08%。不同施肥处理中,仅 N、M 处理土壤 C:N 显著低于 CK 处理;与 CK 相比,除 N 处理外,其余处理对 C:P 均无显著影响;M、NM 处理的土壤 N:P 较 CK 处理显著提高了 22.81%、16.64%,而 N 处理显著降低了土壤 N:P;其中,N 处理的土壤 C:N、C:P、N:P 分别较 CK 处理显著降低了 15.22%、26.60%、16.17%。

2.2 长期施肥对土壤有机碳、有机氮、有机磷含量及生态化学计量比的影响

图 2 可知,不同化肥有机肥配施处理的土壤 OC、ON、OP 含量均显著高于 CK 处理。除 NP 处理外,各化

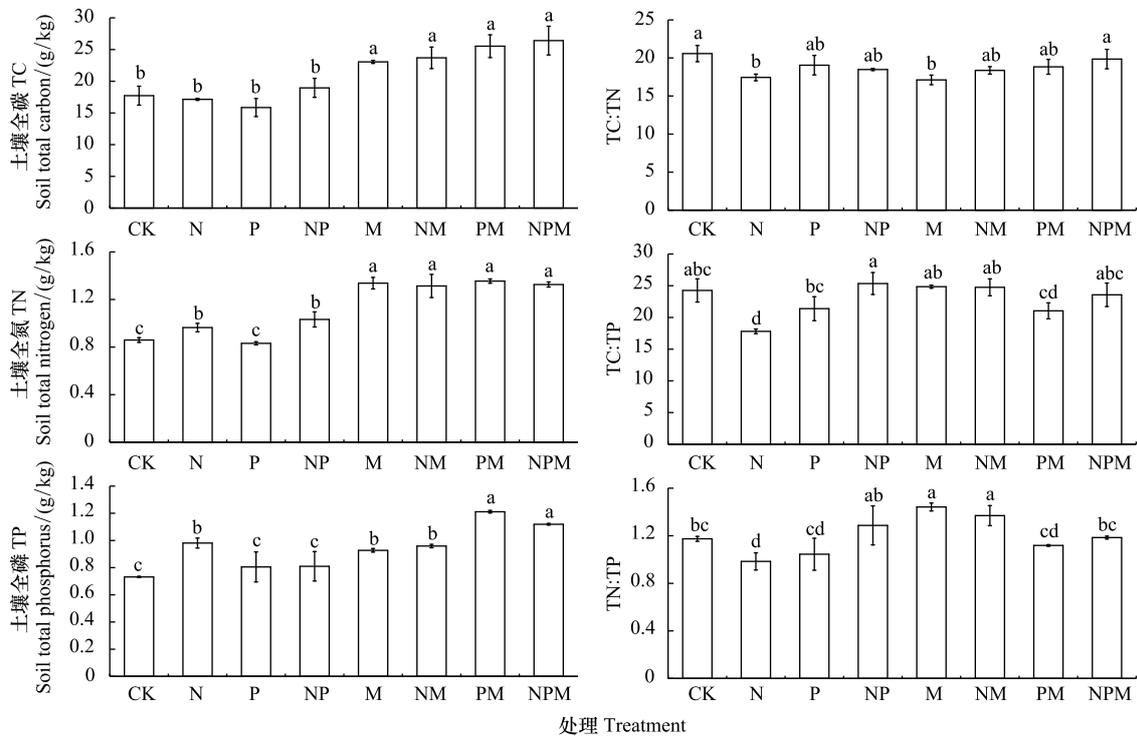


图1 不同施肥处理下土壤全碳(TC)、氮(TN)、磷(TP)含量及化学计量比特征

Fig.1 The contents and stoichiometric ratio of Total carbon (TC), nitrogen (TN) and phosphorus (TP) in soil under different fertilization treatments

CK: 不施肥; N: 单施氮肥; P: 单施磷肥; NP: 施氮磷肥; M: 单施有机肥; NM: 氮肥配施有机肥; PM: 磷肥配施有机肥; NPM: 氮磷肥配施有机肥

肥有机肥配施处理土壤 OC 含量均显著高于化肥处理,且 NP 和各化肥有机肥配施处理之间无显著差异。NM 处理的土壤 ON 含量最高(16.23 mg/kg),显著高于 CK 和其他施肥处理,而不同化肥处理的土壤 ON 含量较 CK 无显著差异。除 N 处理外,不同施肥处理的土壤 OP 含量均显著高于 CK,其中 PM、NPM 处理显著高于其余处理。不同施肥处理中,仅 P 处理的有机质 C:N 显著低于 CK 处理,其余施肥处理对有机质 C:N 无显著影响。与 CK 处理相比,除 P、M 处理外,其余处理对有机质 C:P 无显著影响。P 处理均显著降低了有机质 C:N、C:P,平均减幅分别为 26.80%、31.02%。不同化肥和化肥配施有机肥处理有机质 N:P 无显著差异(0.03—0.05)。

2.3 长期施肥对土壤微生物生物量 C、N、P 含量及生态化学计量比的影响

如图 3 所示, P、NP、NM、NPM 处理显著提高了土壤 BC 含量,且各处理间无显著差异。NPM 处理的 BN 含量较 CK 处理显著提高了 39.35%,而 NP 处理较 CK 处理显著降低了 53.35%。P、NP、NM 处理的 BP 含量较 CK 处理显著提高,但 PM、NPM 处理的 BP 含量显著低于不施肥和其余施肥处理。不同施肥处理的微生物生物量 C:N 与 CK 处理相比均有所提高,平均增幅变化范围为 22.87%—277.46%,其中 NP 处理的微生物生物量 C:N 显著高于 CK。与 CK 处理相比,除 PM、NPM 处理外,其余处理对微生物生物量 C:P、N:P 均无显著影响,且 PM、NPM 处理均显著提高了微生物生物量 C:P、N:P。

2.4 长期施肥对小麦籽粒 C、N、P 含量及生态化学计量比的影响

图 4 可知,NM、NPM 处理的 C_w 含量显著高于不施肥和其余施肥处理,而 N、P、NP、M 和 PM 处理对 C_w 含量无显著影响。不同化肥处理中 N、NP 处理的 N_w 含量显著高于 CK 处理,分别提高了 79.51%、18.96%;NM、PM 配施处理的 N_w 含量显著低于 CK 处理,分别降低了 41.06%、53.55%。不同施加磷肥处理(P、NP、PM 和 NPM)的 P_w 含量均高于 CK 处理,其中 P、PM、NPM 处理的 P_w 含量均显著提高了 214.95%、145.23%、44.74%;

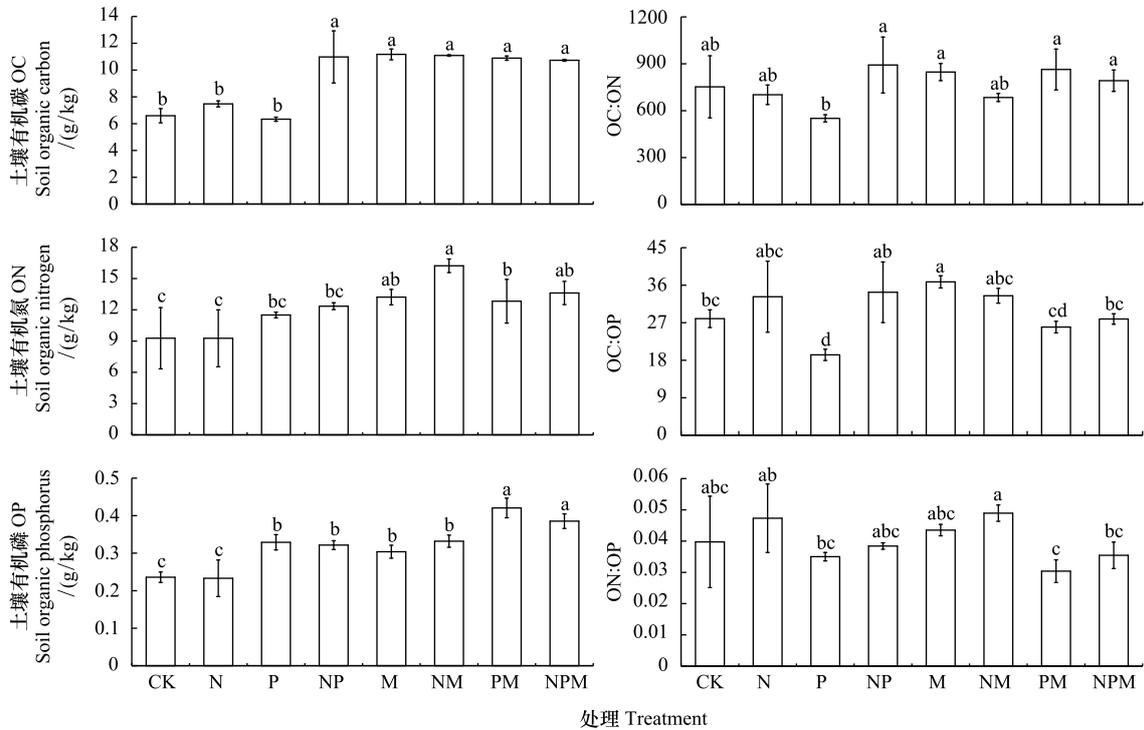


图2 不同施肥处理下土壤有机碳(OC)、氮(ON)、磷(OP)含量及化学计量比特征

Fig.2 The characteristics of soil Organic carbon (OC), nitrogen (ON), phosphorus (OP) content and stoichiometric ratio under different fertilization treatments

而 NM 处理的 PW 含量较 CK 显著降低了 63.99%。与 CK 处理相比,除 M、NPM 处理外,其余施肥处理均对小麦 C:N 产生显著影响,N、P、NP 处理的小麦 C:N 均显著降低了 43.63%、17.51%、19.25%,NM、PM 处理的小麦 C:N 均显著提高了 82.98%、109.93%。不同施磷肥处理的小麦 C:P 较 CK 处理相比均有所降低,其中单施 P 处理的小麦 C:P 显著降低了 69.42%。NM 处理的小麦 C:P 较 CK 处理显著提高了 216.62%。与 CK 处理相比,N、NM 处理的小麦 N:P 显著提高了 101.44%、71.72%,P、PM 处理的小麦 N:P 显著降低了 63.34%、80.83%。

2.5 长期施肥下土壤、微生物、小麦之间 C、N、P 含量及生态化学计量比的相关关系

由图 5 可知,除 ON 和 TP 外,土壤和有机质 C、N、P 各组分之间均存在显著正相关;MBC 与有机质 OC、ON、OP 呈显著正相关,BN 与土壤 TN、TP 呈显著正相关,BP 与土壤 TC、TN、TP 含量呈显著负相关; C_w 与 BN 呈显著正相关, N_w 与 TC、TN、OC、ON、OP 呈显著负相关, P_w 与 OP 呈显著正相关。土壤 TC:TP 与 TC:TN, TN:TP 与 TC:TP 呈正相关,土壤 TN:TP 与有机质 OC:OP 呈正相关,OC:ON 与 OC:OP、ON:OP 呈正相关,ON:OP 与 BN:BP 呈正相关。 $C_w:P_w$ 、 $N_w:P_w$ 分别与 OC:OP、ON:OP 呈正相关。 $C_w:P_w$ 与 $N_w:P_w$ 正相关, $C_w:N_w$ 与 BC:BP、BN:BP 呈正相关。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤和小麦 C、N、P 含量的影响

本研究发现,长期有机肥处理的土壤碳氮磷全量和有机量均有提高,一方面可能是由于有机肥中含有大量的 N、P 等营养元素,施用有机肥不仅直接显著提高了土壤 N、P 有效养分,同时其所富含的有机物通过进一步腐殖分解也可间接提高土壤碳含量^[17]。另一方面,外源有机肥料的施入改善了土壤理化性状,为小麦作物生长提供所需的养分,并相应的促进了作物的沉析作用和增加了残体还田量^[18],进而导致土壤养分含量相应增加。NM、NPM 处理的 BC、BN 含量均高于不施肥和其余施肥处理,可能是由于氮肥配施有机肥不仅能为土

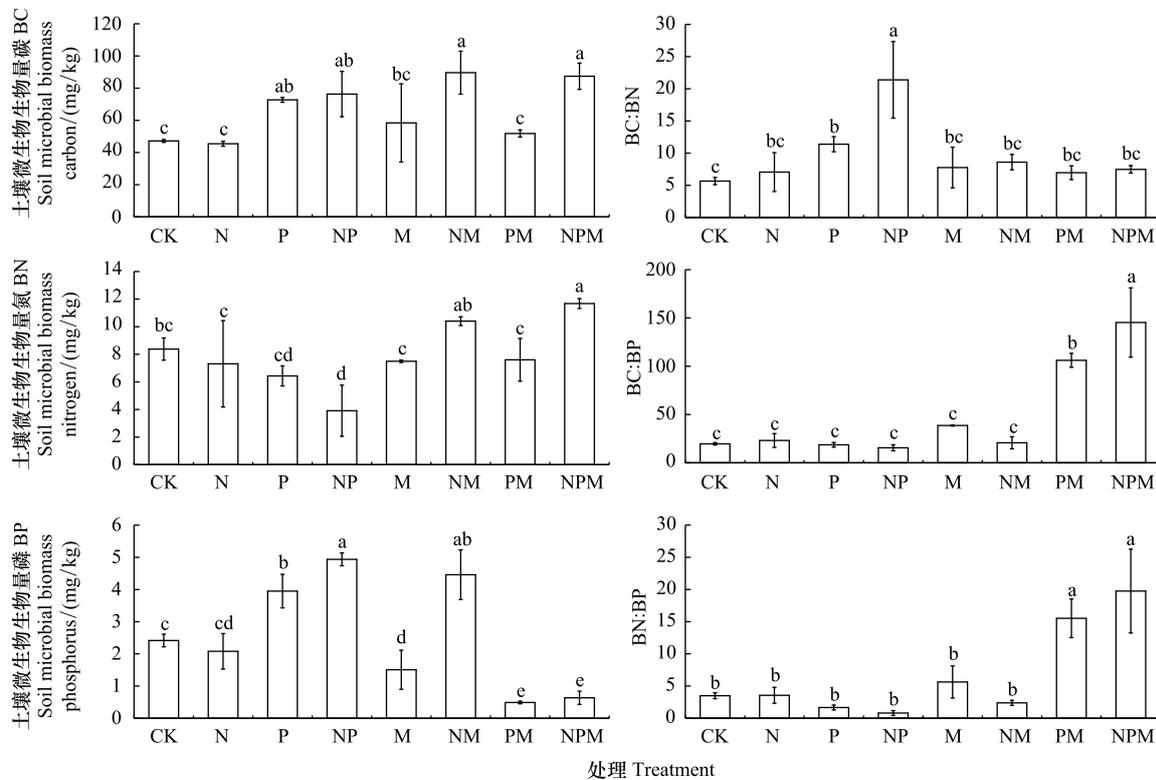


图3 不同施肥处理下土壤微生物生物量碳(BC)、氮(BN)、磷(BP)含量及化学计量比特征

Fig.3 The contents and stoichiometric ratios of soil microbial biomass carbon (BC), nitrogen (BN) and phosphorus (BP) under different fertilization treatments

壤微生物提供生命活动所必需的C、N等营养元素,而且通过构建合理的碳氮比例,改变土壤的含水率和透气性等物理性状^[19],为微生物营造适宜的生长环境和营养条件,进而提高土壤中微生物生物量含量。另外,长期施用无机肥料可能会引发土壤酸化,破坏土壤团聚体等问题,不利于微生物的生长繁殖,同时无外源有机氮源补充,会使得部分BN矿化出来供小麦生长吸收利用,这也可能是土壤BN含量降低的原因^[20-21]。

长期不同施肥处理对小麦C、N、P含量影响各异,NM、NPM处理显著提高了C_w含量,N处理显著提高了N_w含量,而NM、PM处理显著降低了N_w含量,这可能是由于氮肥配施有机肥可明显提高微生物对土壤碳素的转化分解,增强植株对外源养分的输入^[22]。单施氮肥能通过增加土壤中可被植物直接吸收利用的氮素含量,促进作物对氮素的摄取,使得小麦植株对土壤氮素利用率高,土壤氮素向植株流动^[23],但配施有机肥后抑制了这一效果,贡璐等^[24]表明植株在较高的生长速率下具有较低吸收速率,影响了植物对土壤氮素积累。磷肥处理的P_w含量高,投入量的增加使得土壤无机磷和有机磷累积量显著提高,同时刺激了土壤微生物的生长,促进了土壤磷素的转化分解^[19],进而提高了植株体内对磷素的消耗。

3.2 不同施肥处理对土壤和小麦C:N:P生态化学计量特征的影响

长期施加化肥处理为土壤提供了大量的无机氮源,增强了土壤的固氮能力,并且随着作物生长对土壤碳源的消耗^[25],而土壤碳库并未得到进一步补充,导致土壤C:N比降低。随着外源有机肥料的添加,提高了土壤有机氮源含量,有利于土壤氮素的积累,并且当氮源充足时,微生物活性相对较高,也会加快土壤有机碳的矿化速率,加剧了土壤碳源的消耗^[26],进而降低了土壤C:N比。施肥处理增加微生物生物量C:N,其中,施用氮磷肥处理的微生物生物量C:N比显著高于不施肥和其他施肥处理,究其原因可能是随着土壤和有机质C、N、P含量的改变,土壤微生物会根据土壤养分含量变化而调控自身生物量进行适应^[27]。长期施用化肥处理的植株C:N比显著低于CK,而单施化肥配施有机肥处理的植株C:N比显著高于CK,这可能是由于长期施用化肥

显著不仅提高了作物产量,而且增强了作物对土壤氮素的利用效率,同时没有外源碳素的补充,导致土壤供碳不足,显著降低了植株 C:N 比;而配施有机肥处理能有效促进作物根系生长,提高作物对土壤碳素的利用,增强光合作用效果,且植株在进行干物质合成时对碳素需求高于氮素,从而显著降低了植株 C:N 比^[23, 28]。

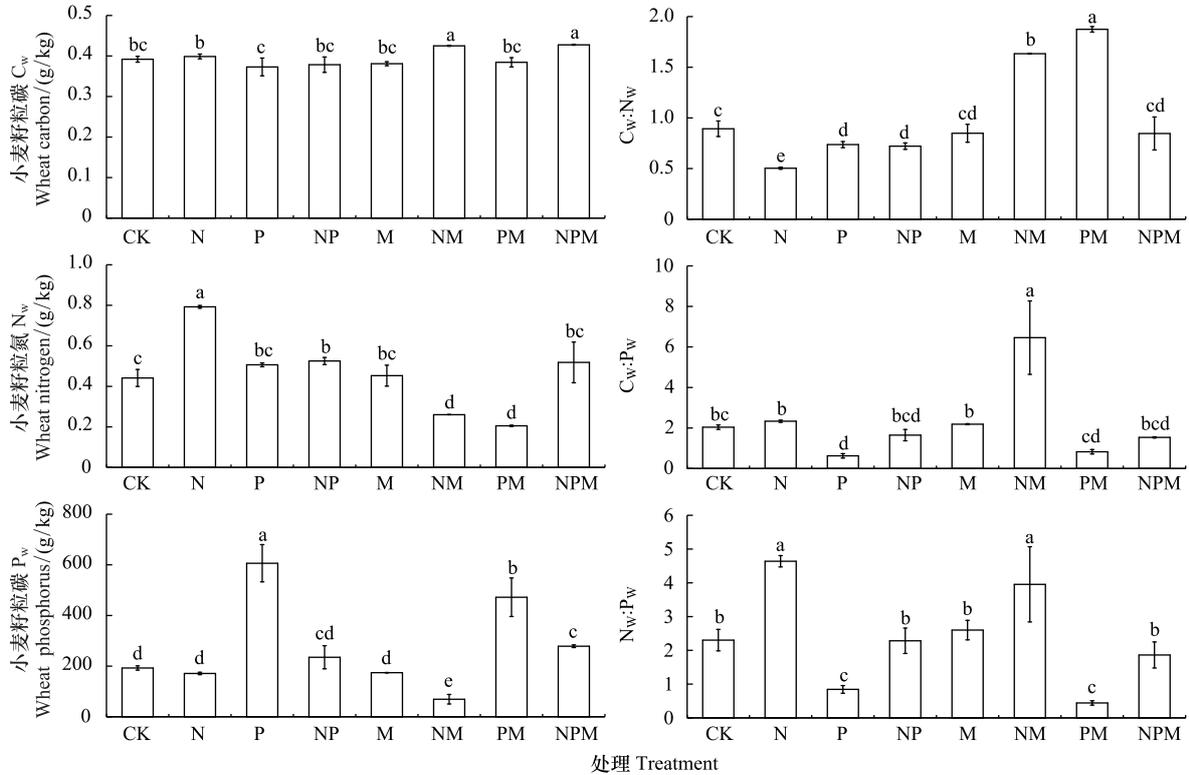


图 4 不同施肥处理下小麦碳 (C_w)、氮 (N_w)、磷 (P_w) 含量及化学计量比特征

Fig.4 The contents and stoichiometric ratios of wheat carbon (C_w), nitrogen (N_w) and phosphorus (P_w) under different fertilization treatments

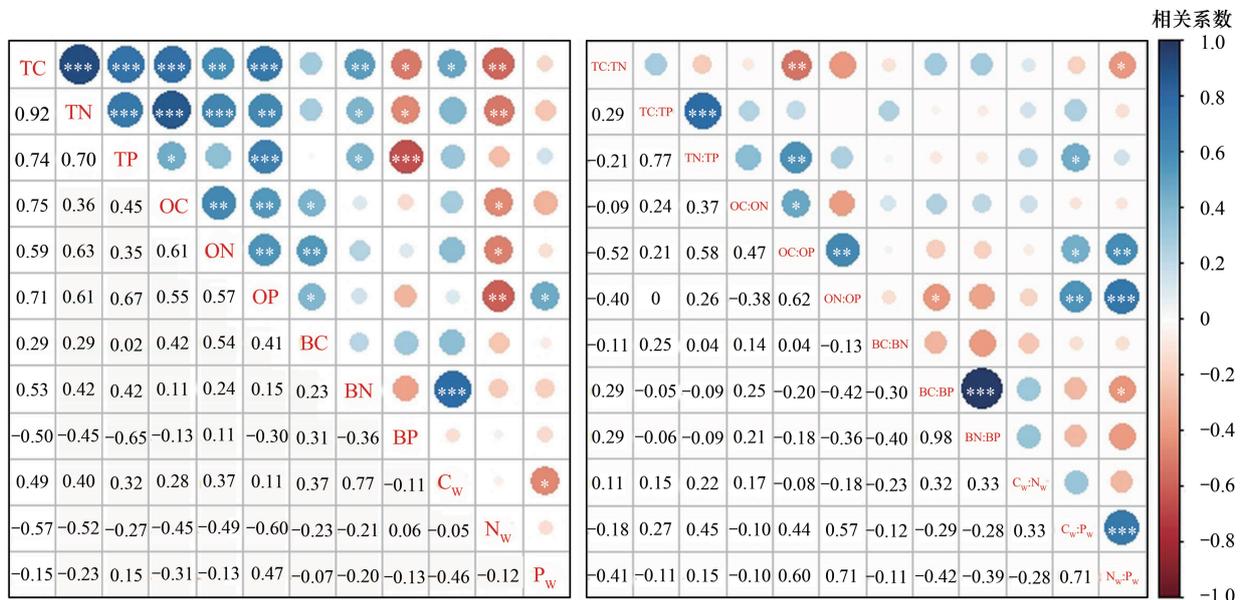


图 5 不同施肥处理下土壤-微生物-小麦系统 C、N、P 含量及其化学计量间的相关系数

Fig.5 The correlation coefficients among the C, N and P contents and the stoichiometric ratios of soil, organic matter, microbial biomass and wheat under different fertilization treatments

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

本研究表明,土壤 C:P 比较 C:N 比表现出更大的变异范围。可能是因为土壤磷源不同所导致的,由于土壤磷素主要源自土壤母质,未涉及土壤大气循环^[29],且磷肥利用率低,易被土壤铁铝氧化物吸附固定,而不易被作物吸收利用^[19]。长期施用等量磷肥配施有机磷处理(PM、NPM)的微生物生物量 C:P 比显著高于不施肥和其他施肥处理,可能因为施加的有机肥在满足微生物生长繁殖所需能源时,过量的磷肥添加导致土壤磷素含量较高,抑制了微生物对磷素的利用率,导致有机磷被微生物同化吸收的总磷量降低^[25, 30]。土壤 N:P 比可表征土壤养分含量的相对平衡程度,可用作评价植物对不同土壤养分限制因子的预测和诊断标准^[31-32]。当土壤 N:P 比较低时,表示土壤磷活性较高^[33]。单施 N 处理的土壤 N:P 比显著低于 CK,而 M、NM 处理的土壤 N:P 显著高于 CK,这可能是由于 N 处理中养分含量和种类相对固定,作物生长发育所需个别养分供应不足而成为土壤养分限制元素^[33],同时不利于作物摄取其它的营养元素,导致磷素在土壤中大量累积^[34],进而降低了土壤 N:P 比。施用磷肥和磷肥配施有机肥处理的有机质 N:P 比均低于 CK 处理,可能是由于施加磷肥和配施有机肥可以有效补充表层土壤氮、磷含量,尤其是磷,外源养分的累积也会使土壤中的磷具有较高的活性,而表层土壤氮素以溶解态形式存在而更易发生流失和淋洗^[22],土壤有机氮源较为缺乏的缘故^[25],使得有机质 N:P 比低于对照处理。PM、NPM 处理的微生物生物量 N:P 比显著高于不施肥和其余处理,说明 PM、NPM 处理时抑制了土壤微生物对磷素的同化能力,这可能是由于作物大量摄取土壤磷素,导致土壤 BP 处于矿化过程而含量较低^[31]。

4 结论

长期施用有机肥和配施化肥可显著增加土壤和有机质 C、N、P 含量,其中 PM、NPM 处理对提高土壤和有机质 C、N、P 含量的效果最好。微生物生物量和小麦 C、N、P 含量在不同施肥处理间差异显著, N 处理显著提高了微生物生物量和小麦碳含量,而显著降低了微生物生物量和小麦氮、磷含量。PM、NPM 处理由于抑制了土壤微生物对磷的同化固定过程,不仅显著提高了微生物生物量 C:P 和 N:P,也降低了有机质、植物 C:P 和 N:P。黄土旱塬农田土壤各施肥不同程度的受磷素限制,化肥配施有机肥可导致有机质和微生物量的化学计量比发生变化,进而对小麦植株的化学计量比产生显著影响。

参考文献(References):

- [1] De Souza Oliveira Filho J, Vieira J N, Silva E M R D, De Oliveira J G B, Pereira M G, Brasileiro F G. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. *Journal of Arid Environments*, 2019, 166: 1-10.
- [2] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [3] Zhang J H, Zhao N, Liu C C, Yang H, Li M L, Yu G R, Wilcox K, Yu Q, He N P. C:N:P stoichiometry in China's forests: from organs to ecosystems. *Functional Ecology*, 2018, 32(1): 50-60.
- [4] Li J W, Liu Y L, Hai X Y, Shangguan Z P, Deng L. Dynamics of soil microbial C:N:P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133613.
- [5] Ehlers K, Bakken L R, Frostegård S Å, Frossard E, Bünemann E K. Phosphorus limitation in a Ferralsol: impact on microbial activity and cell internal P pools. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(4): 558-566.
- [6] Ren C J, Zhao F Z, Kang D, Yang G H, Han X H, Tong X G, Feng Y Z, Ren G X. Linkages of C:N:P stoichiometry and bacterial community in soil following afforestation of former farmland. *Forest Ecology and Management*, 2016, 376: 59-66.
- [7] Liu Y, Fang Y, An S S. How C:N:P stoichiometry in soils and plants responds to succession in *Robinia pseudoacacia* forests on the Loess Plateau, China. *Forest Ecology and Management*, 2020, 475: 118394.
- [8] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [9] Kuzyakov Y, Razavi B S. Rhizosphere size and shape: temporal dynamics and spatial stationarity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 343-360.
- [10] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [11] Geisseler D, Scow K M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms-a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 54-63.

- [12] 邢亚薇, 李春越, 刘津, 王益, 井丽娟, 王苾蓉, 薛英龙, 党廷辉. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物丰度的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1351-1358.
- [13] Blair N, Faulkner R D, Till A R, Crocker G J. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91(1): 48-56.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. fumigation with chloroform. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(3): 167-177.
- [16] 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.
- [17] Spieles D J, Mitsch W J. Macroinvertebrate community structure in high-and low-nutrient constructed wetlands. *Wetlands*, 2000, 20(4): 716-729.
- [18] 王飞, 李清华, 林诚, 钟少杰, 何春梅, 刘玉洁. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1447-1454.
- [19] 王飞, 林诚, 李清华, 钟少杰, 何春梅. 长期不同施肥下黄泥田土壤-水稻碳氮磷生态化学计量学特征. *土壤通报*, 2017, 48(1): 169-176.
- [20] 张成娥, 梁银丽. 不同氮磷施肥量对玉米生育期土壤微生物量的影响. *中国生态农业学报*, 2001, 9(2): 72-74.
- [21] 刘明, 李忠佩, 路磊, 车玉萍. 添加不同养分培养下水稻土微生物呼吸和群落功能多样性变化. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 1108-1115.
- [22] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征. *环境科学*, 2020, 41(1): 394-402.
- [23] 王凡坤, 薛珂, 付为国. 土壤氮磷状况对小麦叶片养分生态化学计量特征的影响. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(1): 60-71.
- [24] 贡璐, 李红林, 刘雨桐, 安申群. N、P 施肥对塔里木河上游绿洲棉花 C、N、P 生态化学计量特征的影响. *生态学报*, 2017, 37(22): 7689-7697.
- [25] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 高洪军, 朱平, 徐明岗, 张文菊. 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. *生态学报*, 2018, 38(11): 3848-3858.
- [26] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 张文安, 蒋太明. 长期施肥对西南黄壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响. *土壤通报*, 2016, 47(3): 673-680.
- [27] 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. *植物生态学报*, 2016, 40(12): 1257-1266.
- [28] 于海玲, 樊江文, 钟华平, 李愈哲. 青藏高原区域不同功能群植物氮磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2017, 37(11): 3755-3764.
- [29] 赵少华, 宇万太, 张璐, 沈善敏, 马强. 土壤有机磷研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2189-2194.
- [30] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89-96.
- [31] 冉宜凡, 许明祥, 李彬彬, 马露洋, 张圣民. 黄土丘陵区不同土壤-微生物-植物系统生态化学计量特征对肥力梯度的响应. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2017, 45(10): 77-84, 93-93.
- [32] 吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 关晋宏, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(10): 3385-3393.
- [33] 白玉婷, 卫智军, 代景忠, 闫瑞瑞, 刘文亨, 王天乐. 施肥对羊草割草地植物群落和土壤 C:N:P 生态化学计量学特征的影响. *生态环境学报*, 2017, 26(4): 620-627.
- [34] 宋亚辉, 艾泽民, 乔磊磊, 翟珈莹, 李袁泽, 李秧秧. 施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 38-45, 52-52.