

李晶, 李松龄, 王亚艺, 等. 高寒地区有机肥替代氮肥对春小麦产量形成及土壤微生物群落的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(9): 1761-1770.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.09.011

高寒地区有机肥替代氮肥对春小麦产量形成及土壤微生物群落的影响

李晶, 李松龄, 王亚艺, 周晏竹, 张荣

(青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 本研究通过分析高寒地区不同比例有机肥替代氮肥对春小麦产量形成与土壤微生物群落多样性的影响, 分析各产量形成与土壤微生物群落之间的相关性, 以期完善高寒地区有机肥替代氮肥对春小麦产量形成及土壤微生物影响的相关理论。本研究设计随机区组试验, 共设不施化肥和有机肥的对照(CK)与施肥处理, 6个施肥处理包括常规施肥(F1)、有机肥替代15%氮肥(F2)、有机肥替代30%氮肥(F3)、有机肥替代45%氮肥(F4)、有机肥替代60%氮肥(F5)、有机肥替代30%氮肥+30%有机肥(F6)。结果表明, 与CK相比, 不同比例有机肥替代氮肥的处理能够提高植株中的氮积累量、磷积累量、钾积累量、干物质积累量与产量。在有机肥替代氮肥的各处理中, 有效穗数、穗粒数、千粒重、产量、氮肥偏生产力均以有机肥替代15%氮肥的处理(F2处理)最高。在有机肥替代15%氮肥处理(F2处理)下, 成熟期春小麦植株的氮素积累量、磷素积累量、钾素积累量、干物质积累量较其他各处理显著提高。有机肥替代15%氮肥处理(F2处理)的产量、氮肥偏生产力较其他各处理显著提高。当有机肥替代氮肥的比例为15%~60%时, 土壤细菌群落扩增子序列变体(ASV)数量能够维持稳定, CK、F4处理、F5处理的优势菌门的相对丰度分别为73.49%、71.44%、72.63%, 优势菌门为变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Bacteroidota)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)。由Alpha多样性指数(Ace指数、Chao1指数、Shannon指数和Simpson指数)可以得出, 单独施用化肥会改变土壤微生物群落的丰富度(Ace指数和Chao1指数)和均匀度(Shannon指数和Simpson指数), 而有机肥替代部分氮肥的处理能有效缓解这种影响。综合春小麦产量性状及土壤微生物群落丰富度(Ace指数和Chao1指数)和均匀度(Shannon指数和Simpson指数)得出, 有机肥替代15%氮肥的处理效果最佳, 该处理既能够提高春小麦产量, 又能够维持土壤微生物群落的稳定。

关键词: 高寒地区; 有机肥; 氮肥; 春小麦; 产量; 微生物

中图分类号: S512.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)09-1761-10

Effects of organic fertilizer substitution for nitrogen fertilizer on spring wheat yield formation and soil microbial communities in alpine regions

LI Jing, LI Songling, WANG Yayi, ZHOU Yanzhu, ZHANG Rong

(Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China)

收稿日期: 2025-05-22

基金项目: 青海半干旱区中低产田种养结合时空匹配格局及地力提升技术与示范项目(2023YFD1900403-05)

作者简介: 李晶(1998-), 女, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥料和植物营养方面的研究。(E-mail) 1176249327@qq.com

通讯作者: 张荣, (E-mail) zhro2004038@sohu.com

Abstract: To refine the theoretical foundation regarding the effects of substituting nitrogen fertilizer with organic fertilizer on spring wheat yield formation and soil microbial communities in alpine regions, this study analyzed the impact of different substitution ratios on spring wheat yield formation and soil microbial community diversity, and examined the correlations between various yield formation factors and the soil microbial community. This study

employed a randomized block design with a total of seven treatments; a control with no chemical or organic fertilizer application (CK), conventional fertilization (F1), 15% substitution of nitrogen fertilizer with organic fertilizer (F2), 30% substitution of nitrogen fertilizer with organic fertilizer (F3), 45% substitution of nitrogen fertilizer with organic fertilizer (F4), 60% substitution of nitrogen fertilizer with organic fertilizer (F5), and 30% substitution of nitrogen fertilizer plus an additional 30% organic fertilizer (F6). The results showed that, compared with CK, the application of different substitution ratios of organic fertilizer for nitrogen fertilizer increased nitrogen accumulation, phosphorus accumulation, potassium accumulation, dry matter accumulation, and yield. Among all organic fertilizer substitution treatments, the F2 treatment achieved the maximum values for effective panicle number, grains per panicle, 1 000-grain weight, yield, and nitrogen partial factor productivity. At maturity, the nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation, as well as dry matter accumulation in spring wheat plants under the F2 treatment, were significantly higher than those in all other treatments. The yield and partial factor productivity of nitrogen fertilizer in the F2 treatment were significantly higher than those in all other treatments. When the substitution ratio of organic fertilizer for nitrogen fertilizer ranged from 15% to 60%, the number of bacterial amplicon sequence variants (ASVs) in the soil remained stable. The relative abundances of the dominant bacterial phyla were 73.49% in the CK, 71.44% in the F4 treatment, and 72.63% in the F5 treatment. The dominant phyla were identified as Proteobacteria, Bacteroidota, and Gemmatimonadota. Analysis of α diversity indices (Ace, Chao1, Shannon, and Simpson) revealed that the application of chemical fertilizer alone altered the richness (Ace and Chao1 indices) and evenness (Shannon and Simpson indices) of the soil microbial community. Conversely, treatments involving partial substitution of nitrogen fertilizer with organic fertilizer effectively mitigated these impacts. Based on a comprehensive analysis of spring wheat yield traits and soil microbial community characteristics (including richness via Ace and Chao1 indices, and evenness via Shannon and Simpson indices), the treatment with 15% organic fertilizer substitution proved to be optimal. This treatment successfully achieved the dual objectives of enhancing spring wheat yield while maintaining the stability of the soil microbial community.

Key words: alpine region; organic fertilizer; nitrogen fertilizer; spring wheat; yield; microorganisms

小麦对于保障中国的粮食安全具有重要作用。目前,在小麦种植过程中,化肥(特别是氮肥)的施用量表现出显著增加的趋势^[1-2]。过度使用化肥易使小麦生长过旺,从而降低籽粒品质,并会破坏土壤生态环境,削弱土壤肥力和可持续生产能力。此外,过度使用化肥还可能加剧环境污染,如造成土壤退化及水体富营养化等。相比之下,有机氮肥不但具有环保特性,而且含有丰富的有机质和有益微生物,可以缓慢释放氮类养分供作物利用。因此,用有机氮肥逐步替代化学氮肥是可行的土壤改善途径。中国目前推行的化肥减量增效措施,鼓励用有机肥替代化肥,以促进农业绿色可持续发展^[3]。研究表明,有机肥以不同比例替代氮肥可以对土壤的理化性质有不同的改善效果,包括降低土壤容重、增加微生物生物量、提高细菌多样性、缓解土壤酸化,进而促进作物生长并提高作物产量^[4-9]。在保持当前氮肥用量的基础上增施有机肥,既能提高作物产量,又可培肥地力,但是需要注意控制替代比例。有研究发现,在旱地耕作中,有机肥替代部分化肥可以使产量增加 6.6%,但是当有机肥完全替代化肥时,反而造成产量降低 9.6%^[10],这与国际上的一些研

究结果一致,即在有机农业体系下,作物产量普遍低于常规种植体系。例如,瑞士研究者通过长期定位试验发现,有机农业种植体系下的小麦减产幅度可达30%~40%^[11]。还有研究发现,当有机肥替代化肥的比例 $\leq 30\%$ 时,可以实现小麦增产^[12];当有机肥替代化肥的比例为25%~50%时,有利于提升作物品质^[13];当有机肥替代化肥的比例 $< 40\%$ 时,能显著提高氮素利用效率^[10]。上述结果为有机肥的科学施用提供了量化依据。

青海被称为“三江之源”和“中华水塔”,其生态环境保护具有特殊重要性。当前,农业生产中化肥的过量施用已经给青海地区造成较大的环境压力,而该地区丰富的有机肥资源却尚未得到有效利用。尽管目前有机肥替代化肥对实现农业可持续发展至关重要,但是目前关于高寒地区有机肥替代氮肥对春小麦产量形成及土壤微生物影响的研究仍较为匮乏。本研究拟通过设置不同有机肥替代氮肥的比例,并系统分析其对高寒地区春小麦产量性状、土壤微生物群落的影响,旨在为该区域提供一个既能保障小麦生产又能维持土壤健康的最佳有机肥替代比例。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况及供试材料

本试验于2024年在青海省西宁市大通县景阳镇中岭村进行,该地海拔为2 851 m,年均气温为6.1℃,年均降雨量约为623 mm,土壤类型为栗钙土。试验地土壤的理化性状为全氮含量1.1 g/kg、全磷含量1.8 g/kg、全钾含量21.1 g/kg、碱解氮含量85.0 mg/kg、速效磷含量24.1 mg/kg、速效钾含量71.0 mg/kg、有机质含量19.3 g/kg、pH值8.1。

2024年试验地降雨量分布和温度变化见图1。

1.2 试验设计

本试验共设置如下7个处理:不施化肥和有机肥(CK),常规施肥(F1),有机肥替代15%氮肥(F2),有机肥替代30%氮肥(F3),有机肥替代45%氮肥(F4),有机肥替代60%氮肥(F5),有机肥替代30%氮肥+30%有机肥(F6),各组处理重复4次,共设28个小区,每个小区的面积为40 m²,按照随机区组设计。试验于2024年4月中旬播种,2024年9月中旬收获,各处理的施肥量见表1。

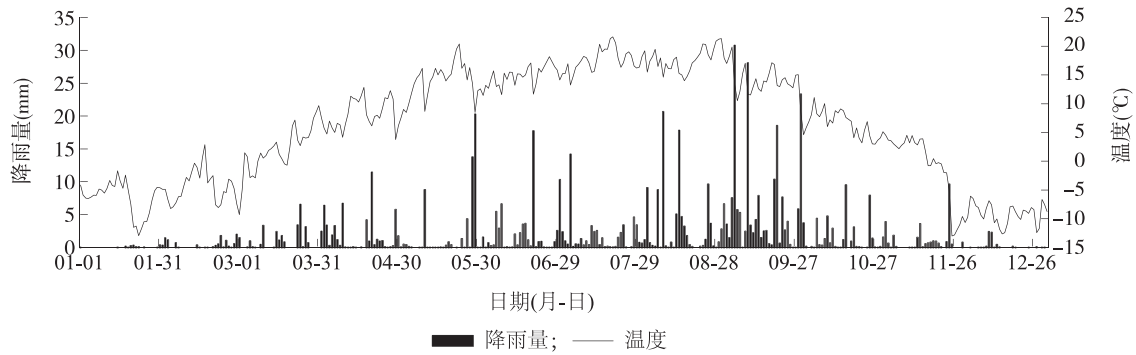


图1 2024年试验地降雨量和温度的变化

Fig.1 Variations in temperature and precipitation at the experimental site in 2024

表1 试验处理的肥料及养分用量

Table 1 Fertilizer and nutrient application rates of the experimental treatments

处理简称	处理	有机肥用量 (kg/hm ²)	氮肥(N)用量(kg/hm ²)		磷肥(P ₂ O ₅)用量 (kg/hm ²)	钾肥(K ₂ O)用量 (kg/hm ²)
			化肥氮	有机氮		
CK	不施用化肥和有机肥					
F1	常规施肥		120.0		60.0	45.0
F2	有机肥替代15%氮肥	1 275	102.0	18.0	60.0	45.0
F3	有机肥替代30%氮肥	2 550	84.0	36.0	60.0	45.0
F4	有机肥替代45%氮肥	3 825	66.0	54.0	60.0	45.0
F5	有机肥替代60%氮肥	5 100	48.0	72.0	60.0	45.0
F6	有机肥替代30%氮肥+30%有机肥	5 100	84.0	72.0	60.0	45.0

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植株干物质积累量和籽粒产量的测定 在春小麦苗期、扬花期和成熟期,每个小区随机选取30株植株,在105℃杀青30 min后,于75℃烘干至恒重,称重并计算各部分的干物质重。烘干并粉碎植株各部分后,用H₂SO₄-H₂O₂消煮,参照鲍士旦^[14]的方法测定其中全氮含量、全磷含量和全钾含量。收获时,各小区收获2行麦穗,晾干、脱粒后计算产量。

1.3.2 土壤理化性状及微生物多样性的测定 在小麦种植前及收获后,每个小区采集0~20 cm土层的土壤样品,去除表层土壤中的植物残体、根系等杂物后,用5点法进行取样。种植小麦前,土壤样品通过风干法进行保存,并参照鲍士旦^[14]的方法测定全氮含量、全磷含量、全钾含量、碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量、有机质含量和pH值。小麦收获后,将土壤样品保存于-80℃冰箱中,送至上海欧易

生物医学科技有限公司进行微生物多样性的测定。

1.4 计算方法

本研究所用的主要计算公式如下：

苗期植株养分(氮、磷、钾)积累量 = 茎叶干物质重 × 茎叶养分(氮、磷、钾)含量 + 根干物质重 × 根养分(氮、磷、钾)含量

扬花期植株养分(氮、磷、钾)积累量 = 茎叶干物质重 × 茎叶养分(氮、磷、钾)含量 + 花干物质重 × 花养分(氮、磷、钾)含量 + 根干物质重 × 根养分(氮、磷、钾)含量

成熟期植株养分(氮、磷、钾)积累量 = 茎叶干物质重 × 茎叶养分(氮、磷、钾)含量 + 籽粒干物质重 × 籽粒养分(氮、磷、钾)含量 + 颖壳干物质重 × 颖壳养分(氮、磷、钾)含量 + 根干物质重 × 根养分(氮、磷、钾)含量

苗期植株干物质积累量 = 茎叶干物质重 + 根干物质重

扬花期植株干物质积累量 = 茎叶干物质重 + 花干物质重 + 根干物质重

成熟期植株干物质积累量 = 茎叶干物质重 + 籽粒干物质重 + 颖壳干物质重 + 根干物质重

氮肥偏生产力 = 施肥处理作物产量 / 肥料施用量

1.5 数据统计与分析

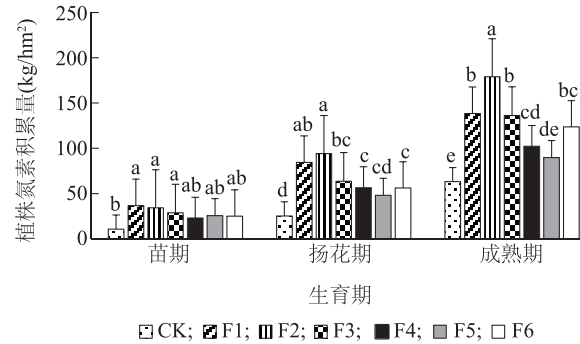
使用 Excel 2016 进行数据分析,用 Origin 2024 绘制图表,并用 SPSS 27.0(Duncan's 法)进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 有机肥替代氮肥对春小麦植株养分积累量的影响

如图 2 所示,在春小麦苗期,除 CK 外的其他各处理组春小麦植株的氮素积累量间无显著差异。在春小麦扬花期,F2 处理春小麦植株的氮素积累量分别较 F3 处理、F4 处理、F5 处理、F6 处理显著增加了 48.06%、66.33%、95.52%、67.75%;F1 处理春小麦植株的氮素积累量分别较 F4 处理、F5 处理、F6 处理显著增加了 49.04%、75.20%、50.31%。在春小麦成熟期,F2 处理春小麦植株的氮素积累量最高,分别较 F1 处理、F3 处理、F4 处理、F5 处理、F6 处理显著增加了 29.39%、31.45%、75.15%、99.51%、44.85%;F1 处理春小麦植株的氮素积累量分别较 F4 处理、F5 处理显著增加了 35.36%、54.19%;F3 处理春小麦植株的氮素积累量分别较 F4 处理、F5

处理显著增加了 33.24%、51.78%;F6 处理春小麦植株的氮素积累量较 F5 处理显著增加了 37.73%。

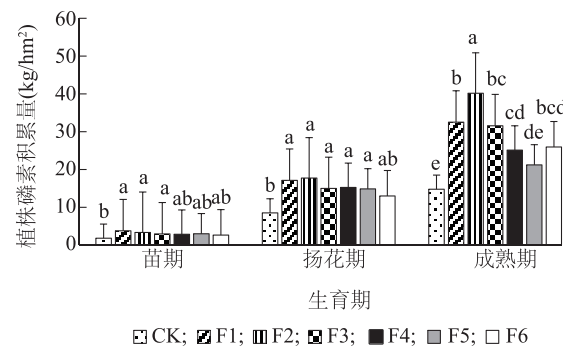


CK, F1~F6 处理见表 1。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同生育期春小麦植株氮素积累量的变化

Fig. 2 Dynamics of nitrogen accumulation in spring wheat plants at different growth stages

如图 3 所示,在春小麦苗期,除 CK 外,其余各处理组春小麦植株的磷素积累量无显著差异。在春小麦扬花期,除 CK 外,其余各处理组春小麦植株的磷素积累量均无显著差异。在春小麦成熟期,F2 处理春小麦植株的磷素积累量最大,分别较 F1 处理、F3 处理、F4 处理、F5 处理、F6 处理显著增加了 23.55%、27.25%、59.83%、89.27%、54.65%,F1 处理春小麦植株的磷素积累量分别较 F4 处理、F5 处理显著增加了 29.37%、53.20%,F3 处理春小麦植株的磷素积累量较 F5 处理显著增加了 48.74%。



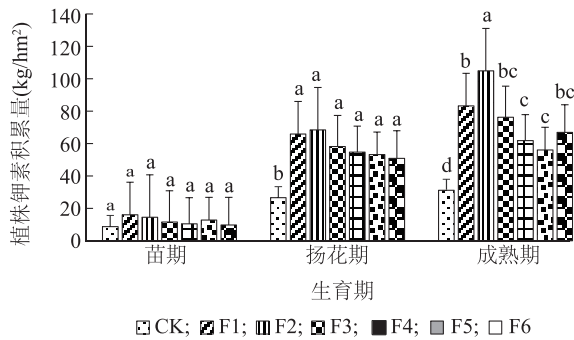
CK, F1~F6 处理见表 1。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同生育期春小麦植株磷素积累量的变化

Fig. 3 Dynamics of phosphorus accumulation in spring wheat plants at different growth stages

如图 4 所示,在春小麦苗期,春小麦植株的钾素积累量在各处理组之间无显著差异。在春小麦扬花期,F1~F6 处理春小麦植株的钾素积累量均较 CK 显

著增加,但是在F1~F6处理之间无显著差异。在春小麦成熟期,F2处理春小麦植株的钾素积累量最高,分别较F1处理、F3处理、F4处理、F5处理、F6处理显著增加了25.93%、37.56%、69.49%、86.88%、56.57%;F1处理春小麦植株的钾素积累量分别较F4处理、F5处理显著增加了34.59%、48.40%。



CK, F1~F6处理见表1。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图4 不同生育期春小麦植株钾素积累量的变化

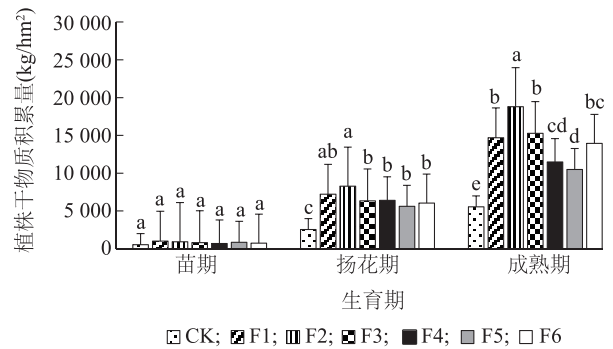
Fig.4 Dynamics of potassium accumulation in spring wheat plants at different growth stages

2.2 有机肥替代氮肥对春小麦植株干物质积累量的影响

如图5所示,在春小麦苗期,春小麦植株的干物质积累量在各处理组间无显著差异。在春小麦扬花期,F2处理春小麦植株的干物质积累量较大,分别较F3处理、F4处理、F5处理、F6处理显著增加30.27%、29.16%、47.32%、36.79%。在春小麦成熟期,F2处理春小麦植株的干物质积累量最大,分别较F1处理、F3处理、F4处理、F5处理、F6处理增加了27.92%、23.03%、63.71%、79.01%、34.64%;F1处理春小麦植株的干物质积累量分别较F4处理、F5处理显著增加了27.98%、39.94%;F3处理春小麦植株的干物质积累量分别较F4处理、F5处理显著增加了23.21%、35.86%;F6处理春小麦植株的干物质积累量较F5处理显著增加了32.96%。

2.3 有机肥替代氮肥对小麦产量形成的影响

如表2所示,在各有机肥替代氮肥的处理中,有效穗数、穗粒数、千粒重、产量、氮肥偏生产力均以F2处理最高。其中F2处理的有效穗数分别较CK、F1处理、F3处理、F4处理、F5处理显著增加了38.26%、15.06%、17.59%、28.66%、30.02%,F2处理的穗粒数分别较CK、F1处理、F4处理、F5处理、F6处理显著增加



CK, F1~F6处理见表1。同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图5 不同时期春小麦植株干物质积累量的变化

Fig.5 Dynamics of dry matter accumulation in spring wheat plants at different growth stages

了148.44%、28.23%、51.43%、45.21%、30.33%,F2处理的产量分别较CK、F1处理、F3处理、F4处理、F5处理、F6处理显著增加了156.85%、18.94%、20.28%、45.81%、56.30%、22.94%,F2处理的氮肥偏生产力分别较F1处理、F3处理、F4处理、F5处理、F6处理显著提高了19.10%、20.54%、46.15%、56.47%、60.24%。分别将不同有机肥替代化肥比例与有效穗数、穗粒数、产量、氮肥偏生产力进行回归方程拟合,发现各方程的计算结果达到极显著水平,计算出的小麦最适有机肥替代氮肥的比例为13.23%、15.09%、13.37%、20.52%。

表2 各处理小麦的产量性状和氮肥偏生产力

Table 2 Yield traits of wheat and partial factor productivity of nitrogen fertilizer under different treatments

处理	有效穗数 ($\times 10^4$ 穗, 1 hm^2)	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm^2)	氮肥 偏生产力 (kg/kg)
CK	347.1d	12.8d	41.8a	1 861.9d	
F1	417.1bc	24.8bc	46.4a	4 020.6b	33.5b
F2	479.9a	31.8a	47.2a	4 782.2a	39.9a
F3	408.1bc	27.9ab	45.7a	3 975.9b	33.1b
F4	373.0cd	21.0c	45.0a	3 279.7c	27.3c
F5	369.1cd	21.9c	44.2a	3 059.6c	25.5c
F6	430.4ab	24.4bc	45.9a	3 889.9b	24.9c

CK, F1~F6处理见表1。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

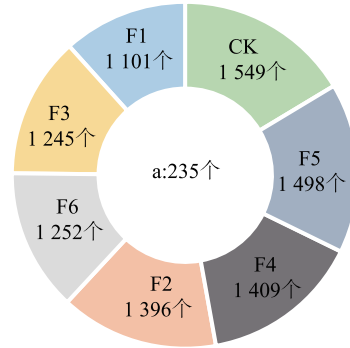
2.4 有机肥替代氮肥对土壤微生物多样性的影响

对土壤样品进行16S rRNA微生物多样性测序。如图6所示,扩增子序列变体(ASV)聚类分析得到9 685个ASV,各处理之间共有235个ASV。CK、F1处理、F2处理、F3处理、F4处理、F5处理、F6处理的

ASV 数量分别为1 784个、1 336个、1 631个、1 480个、1 644个、1 733个、1 487个。各处理的 ASV 数量均较 CK 降低,各处理组中 F1 处理的 ASV 数量最少,较其他处理的 ASV 数量减少了9.73%~22.91%,隶属于 27 门、57 纲、131 目、192 科、268 属、320 种;F5 处理的 ASV 数量是各处理中最多的,较其他处理的 ASV 数量增加了5.41%~29.72%,隶属于 31 门、68 纲、156 目、226 科、317 属、389 种。上述结果说明,仅施用化肥会使土壤细菌群落的 ASV 数量发生较大变化,而随着有机肥替代氮肥比例(30%~60%)的增加,ASV 的数量更接近 CK,表明有机肥替代部分氮肥会维持土壤细菌群落的 ASV 数量。

由图 7 可以看出,在细菌群落相对丰度排名前 15 名的物种的不同处理间,优势菌门的组成相似,其中 CK、F4 处理、F5 处理的优势菌门[变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Bacteroidota)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)]的相对丰度分别为 73.49%、71.44%、72.63%;F1 处理、F2 处理、F3 处理、F6 处理的优势菌门[变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Bacteroidota)、

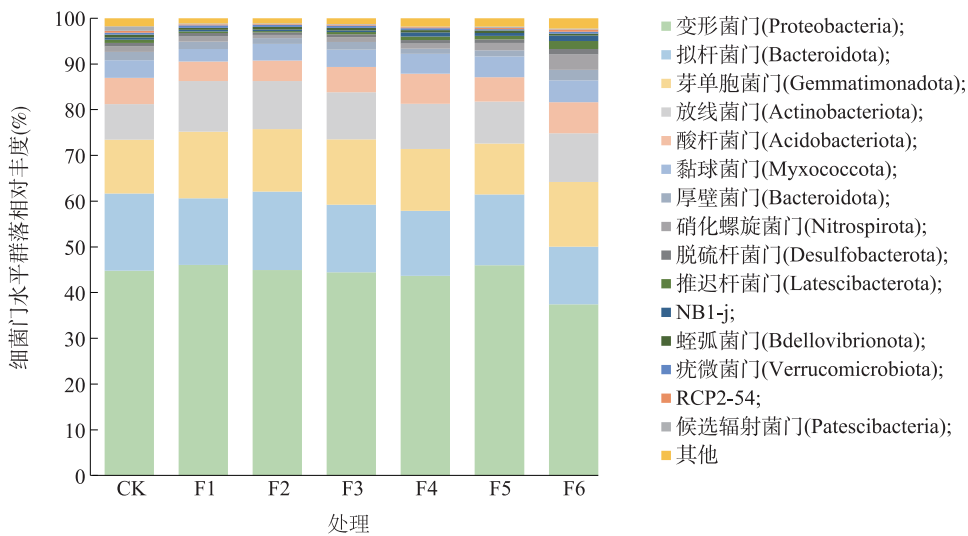
芽单胞菌(Gemmatimonadota)、放线菌门(Actinobacteriota)]的相对丰度分别为 86.25%、86.23%、83.84%、74.82%。上述结果说明,仅施用化肥对土壤中微生物的优势菌门有影响,而有机肥替代一定比例的氮肥可以维持土壤中微生物的优势菌门。



CK、F1~F6 处理见表 1。a 表示 CK 与 F1~F6 处理中的相同微生物 ASV 数量。

图 6 16S rRNA 基因的扩增子序列变体(ASV)分布

Fig.6 Amplicon sequence variant (ASV) distribution of the 16S rRNA gene



CK、F1~F6 处理见表 1。

图 7 16S rRNA 基因测序分析的细菌门水平群落组成

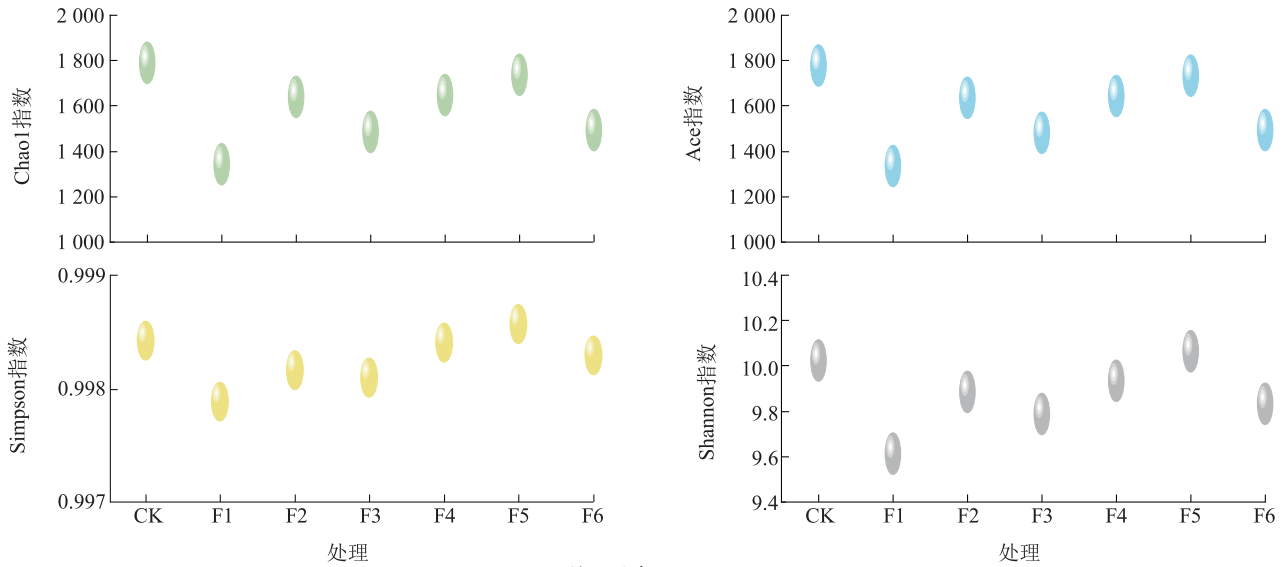
Fig.7 Bacterial community composition at the phylum level based on 16S rRNA gene sequencing analysis

采用 Alpha 多样性指数分析微生物群落的丰富度 (Chao1 指数、Ace 指数) 和均匀度 (Simpson 指数和 Shannon 指数)。如图 8 所示, F2 处理、F3 处理、F4 处理、F5 处理、F6 处理的 Ace 指数、Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数均较仅施化肥的 F1 处理高。各处理的 Chao1 指数和 Ace 指数均低于 CK, F5 处理的

Chao1 指数、Ace 指数最高,与其他处理相比的增幅分别为 5.42%~29.68%、5.59%~29.81%。F1 处理的 Chao1 指数、Ace 指数最低,与其他处理相比的降幅分别为 9.69%~22.89%、9.86%~22.97%。F2 处理的 Chao1 指数、Ace 指数较 F1 处理、F3 处理、F6 处理有所提高,其中 Chao1 指数较 F1 处理、F3 处理、F6 处理的

增幅为9.61%~22.20%,Ace 指数较 F1 处理、F3 处理、F6 处理的增幅为9.53%~22.53%。F5 处理的 Shannon 指数、Simpson 指数在各处理中最高,分别较 CK 提高了 0.42%、0.01%。与其他各处理相比,F5 处理 Shannon 指数的增幅为1.34%~4.73%,F5 处理 Simpson 指数的

增幅为0.02%~0.07%。上述结果说明,单纯施用化肥会改变土壤微生物群落的丰富度(Ace 指数、Chao1 指数)和均匀度(Shannon 指数和 Simpson 指数),而有机肥替代部分氮肥的处理能有效缓解这种影响。



CK、F1~F6 处理见表 1。

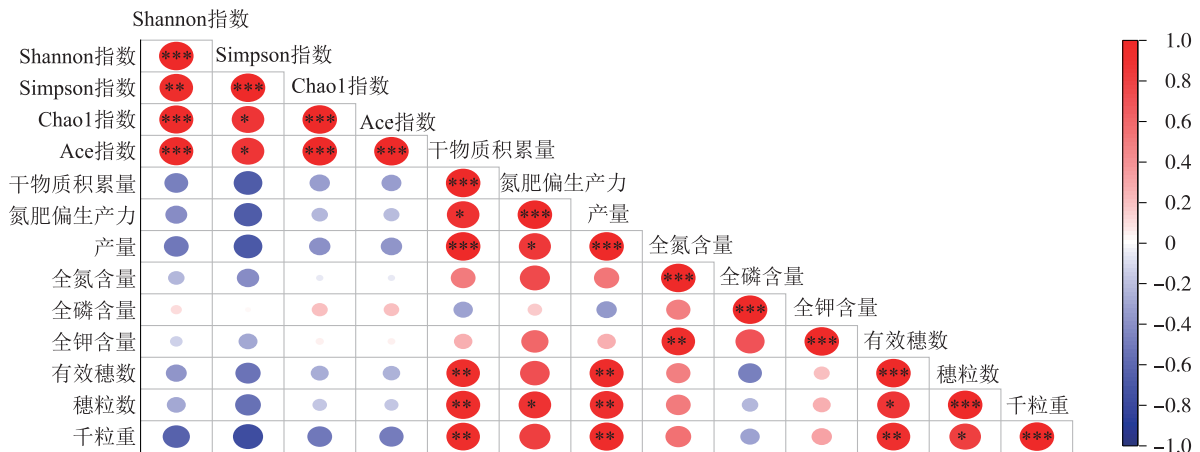
图 8 细菌的 Alpha 多样性指数

Fig.8 Bacterial alpha diversity indices

2.5 有机肥替代氮肥各因素间的相关性分析

如图 9 所示,各类微生物多样性指数间具有显著或极显著相关性,其中 Simpson 指数与 Shannon 指数呈极显著正相关($P<0.01$),同时与 Chao1 指数、Ace 指数呈显著正相关($P<0.05$);Shannon 指数与 Chao1 指数、Ace 指数均呈极显著正相关($P<$

0.001);Chao1 指数与 Ace 指数呈极显著正相关($P<0.001$)。此外,小麦产量与干物质积累量呈极显著正相关($P<0.001$),与有效穗数、穗粒数及千粒重呈极显著正相关($P<0.01$),与氮肥偏生产力呈显著正相关($P<0.05$)。全氮含量与全钾含量呈极显著正相关($P<0.01$)。



*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平显著相关。

图 9 植株性状与土壤微生物多样性间的相关性分析结果

Fig.9 Correlation analysis between plant traits and soil microbial diversity

3 讨论

3.1 有机肥替代氮肥对春小麦产量的影响

有机肥缓释供肥特性的作用与化肥相比差异显著,可长效维持小麦生育后期的干物质合成。研究发现,有机肥部分替代化肥不仅能提高肥料利用率、减少养分损失,还可显著促进小麦对氮、磷、钾的吸收与积累^[15]。由于干物质积累是产量形成的关键基础,而养分吸收效率直接影响作物的长势,因此有机肥的合理施用对于优化小麦生长状态和提高小麦产量具有重要作用^[16]。本研究发现,作物生长前期,不同有机肥替代氮肥处理间的氮、磷、钾积累量及干物质积累量的差异较小;在作物成熟期,用 15% 有机肥替代氮肥的处理与仅施化肥及 30%、45%、60% 有机肥替代氮肥、有机肥替代 30% 氮肥+30% 有机肥处理相比显著提高了植株中氮、磷、钾的积累量及干物质积累量,显著提高了氮肥偏生产力、小麦产量及有效穗数;产量与氮肥偏生产力、千粒重、穗粒数及有效穗数呈显著或极显著正相关,以 15% 有机肥替代氮肥处理的产量最高,但是随着有机肥替代氮肥比例的增加,产量并没有进一步提高,说明有机肥替代氮肥的比例不是越高越好,这与黄媛媛等^[17]、陈爱萍等^[18]的研究结果基本一致。鲁伟丹等^[19]也研究发现,用有机肥替代化肥时,并不是替代比例越大,小麦产量越高,并且用不同类型的有机肥替代化肥的增产效应均存在最佳比例。肖倩等^[20]发现,15% 有机肥替代氮肥的效果最佳,而当有机肥替代氮肥的比例提高至 50% 时,则会显著降低千粒重、产量等指标。此外,不同有机肥品种对产量具有显著影响。研究结果显示,在等氮条件下,单施化肥处理的产量最高,猪粪处理的产量与之相当,而鸡粪或牛粪处理的产量则显著降低^[21]。欧洲的长期定位试验结果表明,有机肥的增产效果因土壤、气候条件而异,仅在沙质土壤和湿润气候下对春小麦有增产作用,而对冬小麦无显著影响^[22]。近年来,研究者进一步探讨了有机肥与化肥的配比优化问题。有研究者通过拟合不同降雨年型和有机肥投入条件下的施肥量,建立了更精准的化肥用量模型^[23]。因此,要根据各地的土壤和气候条件选择适宜的有机肥种类,并且用合理的有机肥比例长期配施化肥,才能达到增产、提升土壤肥力的效果。

3.2 有机肥替代氮肥对土壤微生物多样性的影响

有机肥含有的碳、氮等成分能够为土壤微生物提供养分,从而促进微生物、酶活性的转化,进而推动土壤养分循环,并能够维持速效养分供应^[24-28]。长期配合施用有机肥和无机肥会显著改变土壤微生物群落的垂直分布特征,并提高微生物的代谢活性,与不施肥土壤相比,这种施肥方式能够调节不同土层中微生物的组成和功能^[29]。此外,有机肥和无机肥的配合施用能够刺激土壤微生物群落活性,促进农业土壤中难降解有机物的分解,进而优化土壤养分状况和微生物种群结构^[30]。本研究发现,与对照相比,仅施化肥会破坏土壤微生物的优势菌门,使土壤微生物的 Ace 指数、Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数下降,而以不同比例有机肥替代氮肥的处理能够维持土壤微生物的优势菌门,并且随着有机肥替代氮肥比例的提高(30%~60%),土壤微生物的 Ace 指数、Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数整体均呈上升趋势,说明仅施化肥对土壤微生物群落丰富度、多样性和均匀度有较大影响,而有机肥替代氮肥可以提高土壤微生物群落丰富度、多样性和均匀度,这与郭婷等^[2]的研究结果一致。也有研究发现,施用有机肥对土壤微生物群落具有显著影响,但其效应因施用比例、环境条件而异。刘东海等^[31]指出,过量施用有机肥可能降低细菌的多样性。Ma 等^[32]通过长期试验发现,用 30% 有机肥替代氮肥可以维持微生物群落稳定,而用 50% 有机肥替代氮肥则会抑制关键物种酶活性,甚至导致减产。Sun 等^[33]发现,有机肥能维持干旱期的细菌多样性,促进湿润期微生物群落快速恢复,从而增强作物抗旱性。有研究发现,与单施化肥相比,有机肥与无机肥配施处理能够显著减少病原菌数量、提高有益菌的丰度^[34]。刘婷等^[35]研究证实,施用有机肥可以提高土壤线虫的多样性,增加杂食性捕食线虫的数量,改善施氮过量导致的线虫胁迫,从而保护土壤的食物网功能。此外,施用有机肥不仅会影响当季微生物群落,其残留效应也会持续发挥作用,其中真菌群落比细菌群落表现出更强的敏感性^[36]。施用有机肥通过调控土壤生物与非生物因子的互作,有效改善了土壤肥力状况,从而为作物创造了更有利的生长条件,保障了农产品的产量和品质^[37-42]。在实际应用中,需要综合考虑土壤特性、气候特征等因素,科学确定有机肥的施用比例和方式。

4 结 论

与不施肥(对照)相比,有机肥部分替代氮肥处理能够提高春小麦扬花期、成熟期的氮、磷、钾积累量和干物质积累量,并提高成熟期产量,维持土壤微生物群落的稳定。与仅施化肥处理相比,成熟期以15%比例有机肥替代氮肥的处理最佳,氮、磷、钾积累量和干物质积累量、产量均较其他有机肥替代氮肥比例处理高,同时能够稳定土壤微生物群落的丰富度(Ace指数、Chao1指数)和均匀度(Shannon指数和Simpson指数)。

参考文献:

- [1] 党海燕,王朝辉. 我国麦田有机肥施用:研究历史、瓶颈与解决策略[J]. 植物营养与肥料学报,2025,31(1):12-31.
- [2] 郭 婷,门 杰,卢萍萍,等. 河北省黑龙港区有机肥替代氮肥对小麦产量形成及土壤微生物群落的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(8):119-127.
- [3] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
- [4] 龚 伟,颜晓元,蔡祖聪,等. 长期施肥对华北小麦-玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究[J]. 土壤学报,2009,46(3):520-525.
- [5] 刘丽媛,徐 艳,朱书豪,等. 有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(5):867-873.
- [6] GUO J, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science,2010,327:1008-1010.
- [7] WANG H X, XU J L, LIU X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. Soil and Tillage Research,2019,195:104382.
- [8] 李 玉,田宪艺,王振林,等. 有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J]. 土壤,2019,51(6):1173-1182.
- [9] LIU X P, WANG H T, WU Y J, et al. Manure application effects on subsoils: abundant taxa initiate the diversity reduction of rare bacteria and community functional alterations[J]. Soil Biology and Biochemistry,2022,174:108816.
- [10] ZHANG X Y, FANG Q C, ZHANG T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: a meta-analysis[J]. Global Change Biology,2020,26(2):888-900.
- [11] MÄDER P, FLIESSBACH A, DUBOIS D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. Science,2002,296(5573):1694-1697.
- [12] 李永华,武雪萍,何 刚,等. 我国麦田有机肥替代化学氮肥的产量及经济环境效应[J]. 中国农业科学,2020,53(23):4879-4890.
- [13] ISHFAQ M, WANG Y Q, XU J L, et al. Improvement of nutritional quality of food crops with fertilizer: a global meta-analysis[J]. Agronomy for Sustainable Development,2023,43(6):74.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(10):1768-1781.
- [16] 魏文良,刘 路,仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(8):1384-1394.
- [17] 黄媛媛,马慧媛,黄亚丽,等. 生物有机肥和化肥配施对冬小麦产量及土壤生物指标的影响[J]. 华北农学报,2019,34(6):160-169.
- [18] 陈爱萍,沈 鑫,沈家禾. 不同比例有机肥替代化肥对小麦产量的影响[J]. 湖北农业科学,2019,58(7):32-34.
- [19] 鲁伟丹,李俊华,罗 彤,等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(8):1330-1338.
- [20] 肖 倩,武 升,刘 莹,等. 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报,2023,42(10):2291-2300.
- [21] 徐久凯,袁 亮,温延臣,等. 畜禽有机肥氮在冬小麦季对化肥氮的相对替代当量[J]. 中国农业科学,2023,56(2):300-313.
- [22] HIJBEEK R, VAN ITTERSUM M K, TEN BERGE H F M, et al. Do organic inputs matter-a meta-analysis of additional yield effects for arable crops in Europe[J]. Plant and Soil,2017,411(1):293-303.
- [23] LIU P Z, GUO X Y, ZHOU D, et al. Quantify the effect of manure fertilizer addition and optimal nitrogen input on rainfed wheat yield and nitrogen requirement using nitrogen nutrition index[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2023,345:108319.
- [24] LI R C, REN C Y, WU L K, et al. Fertilizing-induced alterations of microbial functional profiles in soil nitrogen cycling closely associate with crop yield[J]. Environmental Research,2023,231:116194.
- [25] LIU S B, WANG J Y, PU S Y, et al. Impact of manure on soil biochemical properties: a global synthesis[J]. Science of the Total Environment,2020,745:141003.
- [26] MA Q X, WEN Y, MA J Z, et al. Long-term farmyard manure application affects soil organic phosphorus cycling: a combined metagenomic and ³³P/¹⁴C labelling study[J]. Soil Biology and Biochemistry,2020,149:107959.
- [27] 马 龙,王书停,史 雷,等. 有机肥配施氮肥对西北旱地冬小麦产量、品质及土壤生物学特性的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(10):2718-2724.
- [28] 李春越,苗 雨,薛英龙,等. 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[J]. 生态学报,2022,42(1):370-378.
- [29] 刘晓梅,方 建,张 婧,等. 长期施肥对麦田土壤微生物垂直分布的影响[J]. 植物生态学报,2009,33(2):397-404.

- [30] LIU X Q, LIU H R, ZHANG Y S, et al. Organic amendments alter microbiota assembly to stimulate soil metabolism for improving soil quality in wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 339:117927.
- [31] 刘东海, 乔 艳, 李双来, 等. 长期施肥对黄棕壤细菌多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5):760-767.
- [32] MA L, LI Z S, LI Y, et al. Variations in crop yield caused by different ratios of organic substitution are closely related to microbial ecological clusters in a fluvo-aquic soil[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306:109239.
- [33] SUN Y F, TAO C Y, DENG X H, et al. Organic fertilization enhances the resistance and resilience of soil microbial communities under extreme drought[J]. *Journal of Advanced Research*, 2023, 47:1-12.
- [34] DING J L, JIANG X, GUAN D W, et al. Influence of inorganic fertilizer and organic manure application on fungal communities in a long-term field experiment of Chinese Mollisols[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111:114-122.
- [35] 刘 婷, 叶成龙, 李 勇, 等. 不同有机类肥料对小麦和水稻根际土壤线虫的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(19):6259-6268.
- [36] LI G C, NIU W Q, MA L, et al. Legacy effects of wheat season organic fertilizer addition on microbial co-occurrence networks, soil function, and yield of the subsequent maize season in a wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347:119160.
- [37] 刘俊涛, 贾黎明, 闫小莉, 等. 配方施肥对无患子幼树光合特性和生长的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(6):23-33.
- [38] 李世金, 林 硕, 马称心, 等. 生物质灰加生物菌剂对烟草根际土壤微生物群落的影响以及对青枯病的防治效果[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(12):2237-2243.
- [39] 王林林, 徐 珂, 李正鹏, 等. 不同类型绿肥混播对土壤真菌群落结构和理化性质的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(12):2273-2282.
- [40] 张健利, 王振华, 刘茹华, 等. 水肥互作对滴灌红枣耗水及产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(6):597-604, 613.
- [41] 崔学宇, 胡 林, 彭玉娇, 等. 不同施肥处理对盆栽芒果土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(24):220-225.
- [42] 姜子豪, 侯晓晴, 宋忠振, 等. 水稻秸秆腐熟过程中理化性质及微生物群落变化[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(24):241-248.

(责任编辑:徐 艳)