

耕作方式对农田土壤理化性质、微生物学特性 及小麦营养品质的影响

贾梦圆, 黄兰媚, 李琦聪, 赵建宁, 张艳军, 杨殿林, 王 慧*

(1 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2 天津市农田生态与环境修复技术工程中心, 天津 300191)

摘要:【目的】耕作措施对土壤健康和作物营养品质提升具有关键作用, 明确不同耕作方式对土壤理化性质、微生物学特性及小麦营养品质的影响, 为集约化农田可持续管理提供理论依据。【方法】田间试验自 2012 年起在山东德州进行, 供试土壤为潮土, 种植制度为小麦–玉米轮作。设置 4 种耕作模式处理: 传统耕作、旋耕、休耕和免耕。2020 年, 采集 0–20 cm 土层土样分析土壤物理、化学性质和细菌群落结构, 采集小麦籽粒样品分析其营养品质。【结果】与传统耕作相比, 免耕、休耕和旋耕处理显著提高了土壤含水量、铵态氮、硝态氮、有机质、全氮及有效磷含量, 休耕还显著提高了土壤容重, 降低了土壤孔隙度。免耕、休耕和旋耕处理显著提高土壤微生物量碳、氮含量以及土壤细菌群落多样性指数, 休耕及免耕处理提高土壤厚壁菌门 (Firmicutes)、疣微菌门 (Verrucomicrobia) 的相对丰度, 降低放线菌门 (Actinobacteria) 的相对丰度。从营养品质变化来看, 休耕显著提高小麦籽粒蛋白质、淀粉、微量元素的含量, 旋耕和免耕显著增加小麦籽粒蛋白质含量, 除天冬氨酸外, 其他 16 种氨基酸组分变化趋势与氨基酸总量变化基本一致。Pearson 相关性分析及冗余分析 (RDA) 结果表明, 小麦籽粒淀粉、铁、锌、硒含量与土壤含水量、铵态氮、硝态氮、有效磷、微生物量碳、微生物量氮均呈显著正相关关系, 其中铵态氮 ($F=25.7$, $P=0.002$)、微生物量碳 ($F=4.9$, $P=0.008$)、全氮 ($F=3.3$, $P=0.028$)、土壤 pH ($F=3.1$, $P=0.036$) 是影响小麦营养品质的主要环境因子。【结论】减少对土壤扰动的耕作方式可不同程度地改变土壤环境因子及细菌群落结构, 与旋耕、免耕相比, 休耕更有利于小麦籽粒蛋白质、淀粉、微量元素、氨基酸组分含量的积累, 是改善土壤健康状况和提升小麦营养品质的有效耕作措施。

关键词: 耕作方式; 土壤质量; 土壤健康; 土壤微生物学特性; 小麦营养品质

Effects of tillage methods on physico-chemical and microbial characteristics of farmland soil and nutritional quality of wheat

JIA Meng-yuan, HUANG Lan-mei, LI Qi-cong, ZHAO Jian-ning, ZHANG Yan-jun, YANG Dian-lin, WANG Hui*

(1 Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2 Tianjin Engineering Research Center of Agricultural and Environmental Remediation Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract: 【Objectives】Tillage methods affect soil health and crop nutritional quality. We compared the soil physio-chemical and microbial properties as affected by tillage methods, discussed the correlation of tillage methods with wheat grain quality. 【Methods】A field experiment was established in 2012 in Dezhou, Shandong Province, the main planting system was winter wheat–summer maize rotation. The four treatments were conventional tillage (CT), rotary tillage (RT), fallow tillage (FT) and no-tillage (NT). In 2020, after harvest of wheat, soil samples (0–20 cm deep) were collected to analyze physicochemical and microbiological properties, and wheat grain samples were collected for determination of nutritional quality. 【Results】NT, FT and RT treatments significantly increased contents of soil water, ammonium N, nitrate N, organic matter, total N, and available P compared with CT, while FT significantly increased soil bulk density and decreased soil porosity.

收稿日期: 2022-02-17 接受日期: 2022-05-17

基金项目: 中央级科研院所基本科研业务费专项 (2021-jbkyywf-wh)。

联系方式: 贾梦圆 E-mail: Jmy970701@163.com; * 通信作者 王慧 E-mail: wanghui03@caas.cn

NT, FT and RT treatments significantly increased soil microbial biomass C and N contents as well as the diversity index of soil bacterial community. FT and NT treatments increased the relative abundance of soil Firmicutes and Verrucomicrobia but decreased the relative abundance of Actinobacteria. In terms of nutritional quality, FT treatment significantly increased the content of protein, starch, and micronutrients in wheat grain. RT and NT treatments also significantly increased the protein content of wheat grain. Except for aspartic acid, other 16 amino acid compositions changed in a trend basically consistent with the total amino acids. Pearson correlation analysis and RDA results showed that the contents of starch, Fe, Zn, and Se in wheat grain were significantly and positively correlated with the contents of soil water, ammonium N, nitrate N, available P, microbial biomass C, and microbial biomass N. Ammonium N ($F=25.7$, $P=0.002$), microbial biomass C ($F=4.9$, $P=0.008$), total N ($F=3.3$, $P=0.028$), and soil pH ($F=3.1$, $P=0.036$) were the main environmental factors affecting wheat nutritional quality. 【Conclusions】 Tillage method with minimum soil disturbance alters soil environmental factors and bacterial community structure to different degrees. Compared with RT and NT, FT can be more beneficial to the accumulation of protein, starch, microelements, amino acid composition and content in wheat grain, which is an effective tillage method to improve soil health and wheat nutritional quality.

Key words: tillage method; soil quality; soil health; soil microbial characteristics; nutritional quality of wheat

土壤健康是保障耕地质量提升的先决条件,是实现农业可持续发展的基础,土壤物理、化学性质及生物学特性与土壤健康密切相关^[1]。现代农业以不断提高土地集约化利用的方式来获得作物高产,严重危及土壤健康和粮食安全^[2]。小麦作为人类主要粮食作物之一,在人类膳食结构中占据重要地位^[3],随着生活水平的提高,人们对小麦营养品质的要求日益增加。华北平原地区作为我国粮食作物的主产区,由于长期采用传统耕作方式,使得耕作层变浅,养分利用率降低^[4],不断凸显的土壤问题严重影响小麦的生长,小麦籽粒营养品质随之失去保证。

耕作方式是改善土壤耕层质量、培肥地力的重要途径,对土壤健康、作物营养品质的提升具有关键作用^[5]。目前,我国农田耕作方式主要有传统耕作(翻耕)、少耕(浅耕、旋耕)、免耕(留茬覆盖)和休耕等模式。研究表明,不同耕作方式对土壤容重、孔隙度和含水量、土壤 pH、碳氮养分含量及土壤微生物的影响差异显著^[6]。与传统耕作方式相比,免耕对土壤物理性质的改善效果最为明显,有助于形成良好的土壤结构,减少土壤侵蚀^[7]。少、免耕等保护性耕作可改变土壤 pH,提高土壤紧实度,增加土壤持水性,从而影响土壤微生物的多样性和土壤对作物生长的适宜性^[8]。频繁翻耕会加速土壤微生物对有机质的消耗,导致土壤有机碳含量降低^[9],不利于土壤健康的维持。而休耕则有利于土壤储存更多的碳^[10],促进土壤有机碳的增加与积累,从而提高土壤质量。史功赋^[11]认为休耕利于作物的生长发育和土壤

生产力的稳定维持。土壤微生物数量和种类与耕作方式密切相关,不同耕作方式对土壤微生物群落代谢和功能多样性产生影响^[12]。少耕耕作措施增加了土壤微生物生物量,免耕条件下微生物多样性指数、优势度指数和丰富度指数比翻耕和旋耕均显著下降^[13]。

小麦籽粒中富含很多有益于人体健康的营养物质,包括蛋白质、氨基酸、维生素、微量元素等^[14],不同营养物质在小麦籽粒中的积累与分布受到遗传、栽培条件及土壤质量的影响。小麦生长所需矿物养分来源于土壤,不同耕作方式会导致土壤养分、水分状况发生改变,从而影响营养元素的吸收和利用,影响小麦籽粒营养物质的积累与分配^[15-16]。少耕和免耕常应用于有机种植模式中,减少土壤扰动的耕作方式能增加土壤有机质含量并有效减少水分流失,对作物生长及营养品质的形成起到积极作用^[17]。目前已有研究多集中在耕作方式对部分土壤理化性质或微生物学特性指标的影响,以及常见土壤环境因子对小麦蛋白质、淀粉含量影响的分析,而针对不同耕作模式下土壤健康和小麦氨基酸、微量元素等营养品质指标的变化规律以及各指标之间相互关系的研究关注较少。因此,本研究以华北小麦-玉米轮作农田为对象,研究了传统耕作、旋耕、休耕和免耕对土壤理化性质、微生物学特性的影响,探索耕作方式对小麦营养品质的影响机制,为小麦营养品质的提升和农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于山东省德州市齐河县宋坊农场 (116°46'E, 36°47'N), 属于暖温带半湿润季风气候区, 四季分明, 气候温和, 冷热季和干湿季明显, 海拔 20 m, 年平均气温 13.4℃, 年降水量 622 mm, 无霜期 217 天。试验地土壤类型为湿潮土, 土壤表层 0—20 cm 土壤 pH 7.93, 有机质 9.47 g/kg, 铵态氮 4.48 mg/kg, 硝态氮 15.15 mg/kg, 全氮 1.44 g/kg, 有效磷 16.1 mg/kg。种植制度以小麦-玉米轮作为主。

1.2 试验设计

田间试验共设置 4 个耕作措施处理: 1) 传统耕作, 自 2012 年起每年使用深耕犁深翻 1 次, 深度约 30 cm; 2) 旋耕, 自 2012 年起每年采用旋耕机旋耕 1 次, 深度约 10 cm, 每 3 年使用深耕犁深翻 1 次, 深度约 30 cm; 3) 休耕, 自 2015 年麦收后休耕 4 年种植苜蓿, 于 2019 年 6 月清除苜蓿并旋耕土壤后种植玉米, 之后常规轮作小麦、玉米; 4) 免耕, 自 2012 年起每 3 年深松一次, 深度约 30 cm。

每个耕作处理地块面积不小于 1335 m², 小麦品种为济麦 22 号, 施肥方式均为基施复合肥 (N-P₂O₅-K₂O 质量分数为 18%-18%-18%) 750 kg/hm², 后期不追肥。各处理秸秆还田方式相同, 均在小麦收获后将秸秆粉碎直接还田, 还田量为 3000 kg/hm²。

1.3 样品采集

于 2020 年 6 月采集土壤样品和小麦籽粒样品。每个小区沿“S”形随机取 10 个点, 使用 100 cm³ 环刀在剖面 10 cm 处采集土壤样品放置冰盒内, 用于土壤容重及孔隙度测定; 用直径 3 cm 的土钻钻取耕层 (0—20 cm) 土壤样品, 混合均匀后剔除杂物, 利用“四分法”选取 500 g 样品放置冰盒带回实验室, 一部分风干过筛用于理化性质分析, 一部分 4℃ 冷藏用于速效氮的测定, 其他部分放置于-80℃ 冷冻用于微生物的测定。每个小区随机选取 150 穗小麦, 采集后自然风干脱粒并磨成粉状, 过 0.15 mm 筛后测定籽粒淀粉、蛋白质、氨基酸、微量元素等营养品质指标。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤理化性质 土壤容重及土壤孔隙度采用环刀法测定, 其中土壤密度取耕地土壤表土平均密度 (2.65 g/cm³); 土壤含水量采用烘干法测定 (烘箱 105℃, 24 h); 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测

定; 土壤 pH 采用玻璃电极法 (水土质量比 2.5 : 1) 测定; 土壤铵态氮、硝态氮、全氮采用 AA3-全自动连续流动分析仪 (AA3 Bran+Luebbe Corp) 测定; 有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定。

1.4.2 土壤微生物学特性 土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸, 硫酸钾浸提, TOC 自动分析仪测定; 使用试剂盒 (MIO-BIO PowerSoil DNA Isolation Kit) 提取土壤 DNA, 利用琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 提取纯度, 当 OD₂₆₀/OD₂₈₀ 达 1.6~1.8 时, 进行 DNA 文库构建并采用 Illumina MiSeq 高通量测序, 分析土壤微生物群落组成及多样性。

1.4.3 小麦籽粒营养品质测定 籽粒蛋白质采用浓硫酸消煮—半微量凯式定氮法测定; 总淀粉采用酶水解法转化为还原糖, 再利用滴定法测定还原糖总量; 水解氨基酸含量采用氨基酸自动分析仪 (日立 LA8080) 测定; 微量元素使用硝酸消解后用电感耦合等离子体质谱仪 (钙元素 optima 8000, 铁锌硒元素 iCAPQ) 测定。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 细菌菌群与土壤理化性质间的相关性采用 Pearson 相关分析, 作图软件包括 Origin 2017、Canoco for Windows 5.0 及 AI2018。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下土壤理化性质分析

2.1.1 不同耕作方式对土壤物理性质的影响 如表 1 所示, 休耕处理较传统耕作显著提高了土壤容重, 降低了土壤孔隙度 ($P<0.05$)。土壤含水量各处理间差异显著, 高低顺序为: 休耕>旋耕>免耕>传统耕作, 休耕处理的土壤含水量比传统耕作提高了 37.05% ($P<0.05$)。

2.1.2 耕作方式对土壤化学性质的影响 由表 2 可知, 4 种耕作模式下土壤 pH 均呈现弱碱性, 且处理间没有显著差异 ($P<0.05$)。与传统耕作相比, 旋耕、休耕、免耕处理显著增加了土壤铵态氮含量, 分别提高 14.48%、27.83% 和 11.76%, 且休耕处理高于旋耕和免耕处理 ($P<0.05$)。土壤硝态氮与有效磷含量在 4 种处理下变化趋势一致, 且差异性显著, 均表现为休耕>免耕>旋耕>传统耕作 ($P<0.05$)。此外, 与传统耕作相比, 其他 3 个耕作处理显著提高了土壤全氮和有机质含量, 土壤有机质提升达 35.28%~56.00% ($P<0.05$)。

表 1 不同耕作方式下土壤物理性质
Table 1 Soil physical properties under different tillage methods

处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	土壤孔隙度 Soil porosity (%)	土壤含水量 Soil moisture (%)
传统耕作 Conventional tillage	1.29±0.02 b	51.42±0.87 a	12.82±0.05 d
旋耕 Rotary tillage	1.31±0.01 ab	50.50±0.32 ab	16.74±0.24 b
休耕 Fallow tillage	1.35±0.02 a	49.80±0.74 b	17.57±0.30 a
免耕 No-tillage	1.32±0.02 ab	50.20±0.67 ab	16.01±0.10 c

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 2 不同耕作方式下土壤化学性质
Table 2 Soil chemical properties under different tillage methods

处理 Treatment	pH	铵态氮 (mg/kg) Ammonium N	硝态氮 (mg/kg) Nitrate N	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	有效磷 (mg/kg) Available P
传统耕作 Conventional tillage	7.98±0.02 a	4.42±0.12 c	15.17±0.07 d	9.41±0.08 d	1.44±0.18 d	16.09±0.01 d
旋耕 Rotary tillage	7.94±0.02 a	5.06±0.08 b	18.43±0.35 c	14.68±0.20 a	1.44±0.01 c	16.95±0.03 c
休耕 Fallow tillage	7.92±0.03 a	5.65±0.02 a	26.38±0.12 a	12.73±0.19 c	1.49±0.01 a	18.27±0.03 a
免耕 No-tillage	7.95±0.02 a	4.94±0.01 b	21.65±0.04 b	14.00±0.25 b	1.47±0.01 ab	17.90±0.04 b

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.2 不同耕作方式下土壤微生物学特性分析

2.2.1 耕作方式对微生物量碳、氮的影响 由图 1 可知, 4 种耕作模式下土壤微生物量碳、氮差异显著, 且变化趋势一致。与传统耕作相比, 减少土壤扰动的耕作处理土壤微生物量碳、氮有增加趋势, 其中休耕、旋耕和免耕处理的微生物量碳含量分别提高了 100.70%、75.86% 和 14.23%, 而微生物量氮含量则分别提高 79.85%、48.40% 和 23.70% ($P<0.05$)。

2.2.2 耕作方式对土壤细菌结构的影响 利用高通量测序技术分析土壤细菌群落结构, 基于细菌 16S rRNA 序列分析, 经过质控后平均得到 89604 条有效数据, 质控有效数据量达 65429 (有效率 72.33%)。按照 97% 的一致性将序列聚类成为 OTUs, 共得到 8430 个 OTUs, 将 OTU 均一化处理后绘制 Venn 图 (图 2), 可以直观反映出各处理之间土壤细菌群落 OTUs 组成的差异性及重叠关系。结果表明, 传统耕作、旋耕、休耕和免耕处理的土壤分别获得 5404、5523、5645、5650 个 OTUs; 特异性 OTU 数分别为 403、387、404、410 个; 共有的 OTU 数为 3741 个, 占 OUT 总数的 44.38%。

在门分类水平上对细菌群落组成和相对丰度进行分析, 得到物种相对丰度柱形图 (图 2)。小麦季不

同耕作方式处理的优势细菌门 (相对丰度>5%) 有: 变形菌门 (Proteobacteria, 38.12%~41.50%)、酸杆菌门 (Acidobacteria, 16.69%~19.80%)、拟杆菌门 (Bacteroidetes, 11.32%~12.90%)、放线菌门 (Actinobacteria, 6.73%~8.93%) 和芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes, 5.65%~6.45%)。从门分类水平上对物种相对丰度排名前 10 的数据进行 Duncan's 多重比较分析 (图 3), 结果显示, 与旋耕处理相比, 休耕、免耕处理显著降低了放线菌门的相对丰度 ($P<0.05$)。同时, 免耕、休耕处理显著提高了厚壁菌门 (Firmicutes) 和疣微菌门 (Verrucomicrobia) 的相对丰度 ($P<0.05$)。除此之外, 在其他菌门中, 4 种耕作方式处理间没有显著差异 ($P<0.05$)。

2.2.3 耕作方式对土壤细菌 Alpha 多样性的影响 土壤细菌群落丰富度 (Chao1 指数和 ACE 指数) 和细菌群落多样性 (Shannon 指数和 Simpson 指数) 分析结果显示 (表 3), 旋耕、休耕、免耕处理的 Shannon 指数分别较传统耕作提高了 1.54%~2.16% ($P<0.05$), 同时 Simpson 指数也有显著提升。Chao1 指数范围在 3883.78~4098.70, ACE 指数范围在 3925.58~4169.06, 与传统耕作相比, 旋耕、休耕和免耕处理土壤细菌群落丰富度增加, 且休耕处理提高最多 ($P<0.05$)。

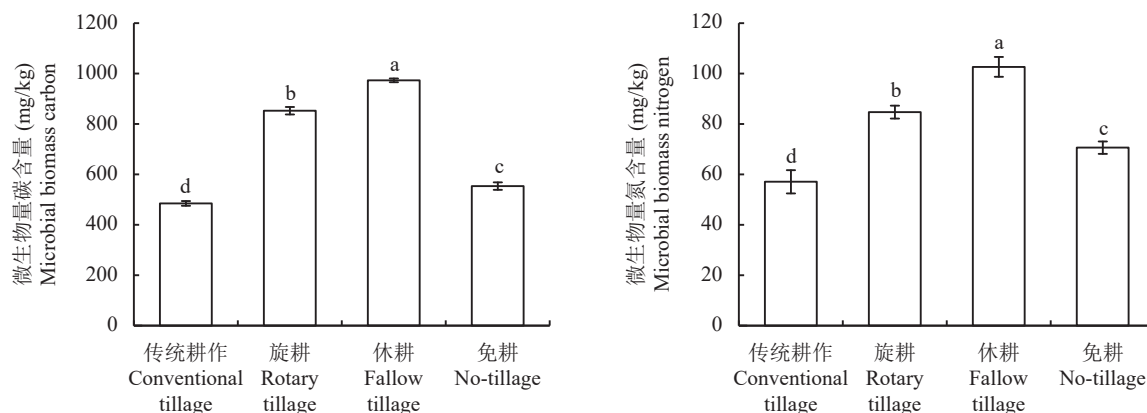


图 1 不同耕作方式下土壤微生物量碳氮的变化

Fig. 1 Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under different tillage methods

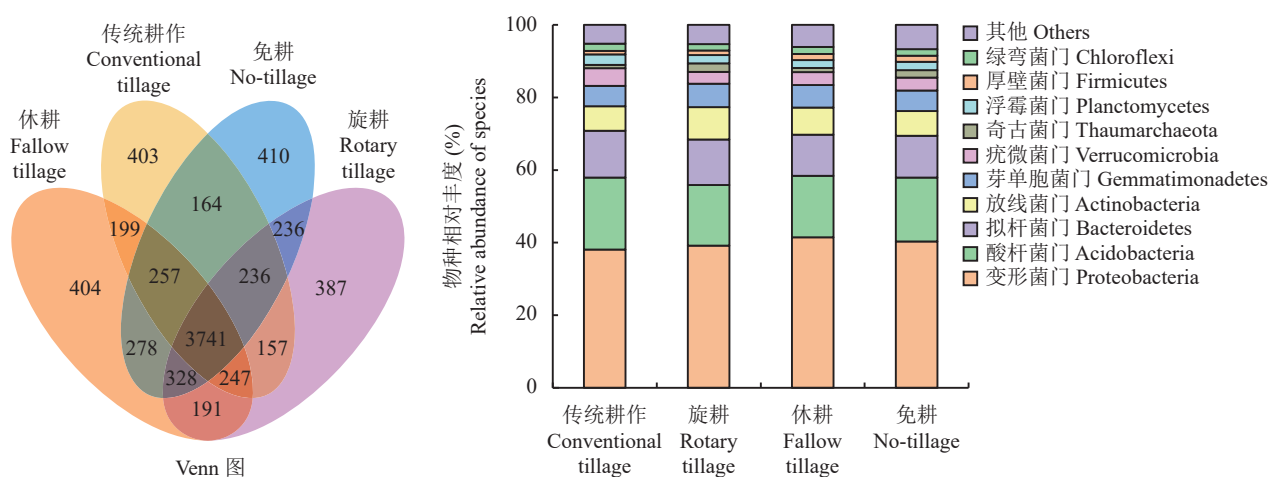


图 2 不同耕作方式下土壤细菌 OTUs 分布 Venn 图、在门分类水平下物种相对丰度

Fig. 2 Venn diagram of OTUs distribution of soil bacteria and column diagram of bacterial relative abundance at phylum level under different tillage methods

2.3 不同耕作方式对小麦籽粒营养品质的影响

2.3.1 耕作方式对小麦籽粒氨基酸含量的影响 如图 4 所示,与传统耕作相比,休耕处理小麦氨基酸总含量有显著增加趋势,旋耕和免耕处理的氨基酸总含量有增加趋势,但均未达到显著水平。不同耕作方式处理下小麦籽粒 17 种氨基酸含量变化呈现不同趋势。其中各处理小麦籽粒氨基酸含量最高的是谷氨酸,比例高达 34.55%~34.89%,4 种处理间差异显著,表现为休耕>免耕>旋耕>传统耕作 ($P<0.05$)。休耕处理显著降低了天冬氨酸含量,与传统耕作相比减少了 5.09% ($P<0.05$),除此之外,其他氨基酸含量变化趋势与总氨基酸基本一致,但休耕对各组氨基酸影响程度不同,其中 4 种耕作处理下苏氨酸、丝氨酸、丙氨酸、缬氨酸、赖氨酸、组氨酸含量没有显著变化 ($P<0.05$)。

2.3.2 耕作方式对小麦籽粒蛋白质、淀粉含量的影响

由图 5 可知,旋耕、休耕和免耕处理下小麦籽粒的蛋白质含量显著高于传统耕作,分别增加了 2.99%、4.90% 和 4.05%,3 种处理间没有显著差异 ($P<0.05$)。休耕处理下小麦籽粒的淀粉含量较传统耕作显著增加,旋耕与免耕处理对小麦籽粒淀粉含量影响不显著 ($P<0.05$)。

2.3.3 耕作方式对小麦籽粒微量元素含量的影响

如表 4 所示,与传统耕作相比,休耕和免耕处理下小麦籽粒中钙元素含量有增加趋势,但没有显著差异 ($P<0.05$)。减少对土壤扰动的耕作模式下小麦籽粒铁元素含量提高,且在休耕处理下最高,与传统耕作相比提高了 7.27% ($P<0.05$)。旋耕、休耕、免耕处理显著增加了小麦籽粒锌元素含量,分别较传统耕作高出了 14.89%、23.01% 和 10.00% ($P<0.05$)。

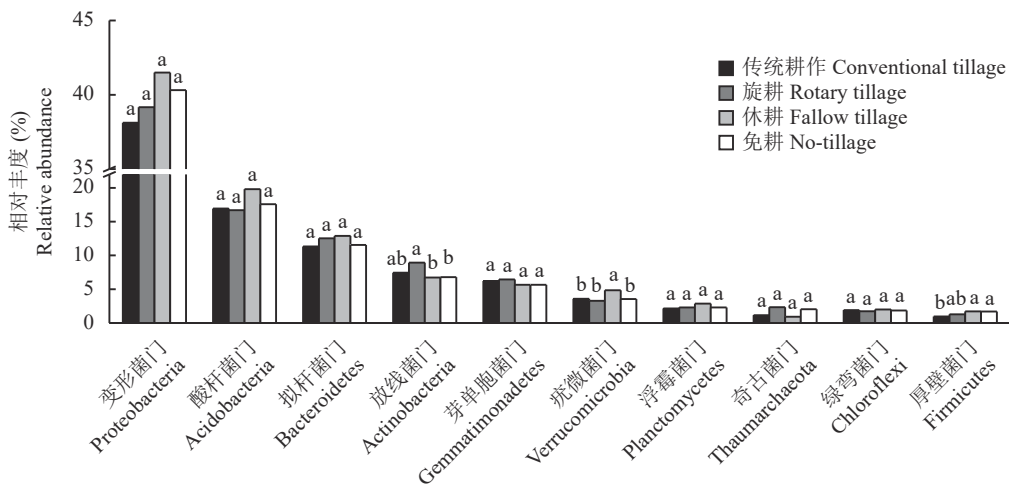


图 3 不同耕作方式下土壤细菌门相对丰度变化

Fig. 3 Changes of relative abundance of soil bacteria categories under different tillage methods

注: 柱上不同字母表示同一菌门处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different letters above the bars significant difference among treatments of a phylum ($P<0.05$).

表 3 不同耕作方式下土壤细菌 Alpha 多样性指数的影响

Table 3 The diversity index of soil bacteria at alpha under different tillage methods

处理 Treatment	Shannon指数 Shannon index	Simpson指数 Simpson index	Chao1指数 Chao1 index	ACE指数 ACE index
传统耕作 Conventional tillage	9.73±0.04 b	0.9966±0.00 b	3974.88±29.39 b	3925.58±27.20 c
旋耕 Rotary tillage	9.88±0.13 a	0.9971±0.00 a	3883.78±14.73 c	4047.74±37.79 b
休耕 Fallow tillage	9.94±0.22 a	0.9972±0.00 a	4098.70±21.39 a	4169.06±22.50 a
免耕 No-tillage	9.92±0.13 a	0.9972±0.00 a	4045.13±39.89 ab	4099.07±29.52 ab

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

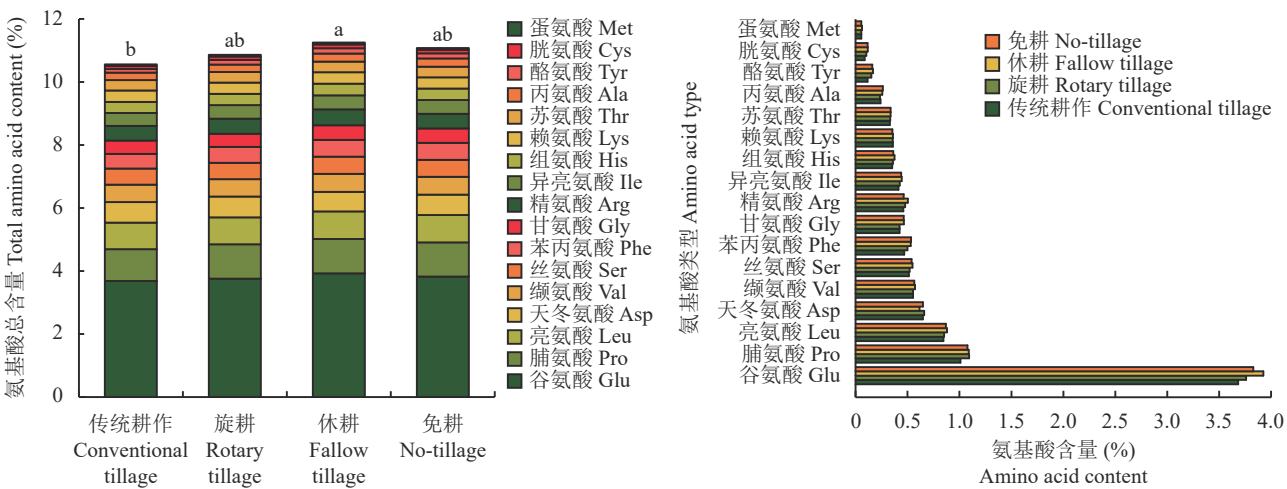


图 4 不同耕作方式下小麦籽粒氨基酸总量及 17 种氨基酸含量

Fig. 4 The total amino acids and 17 kinds of amino acids in wheat grains under different tillage methods

注: 柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

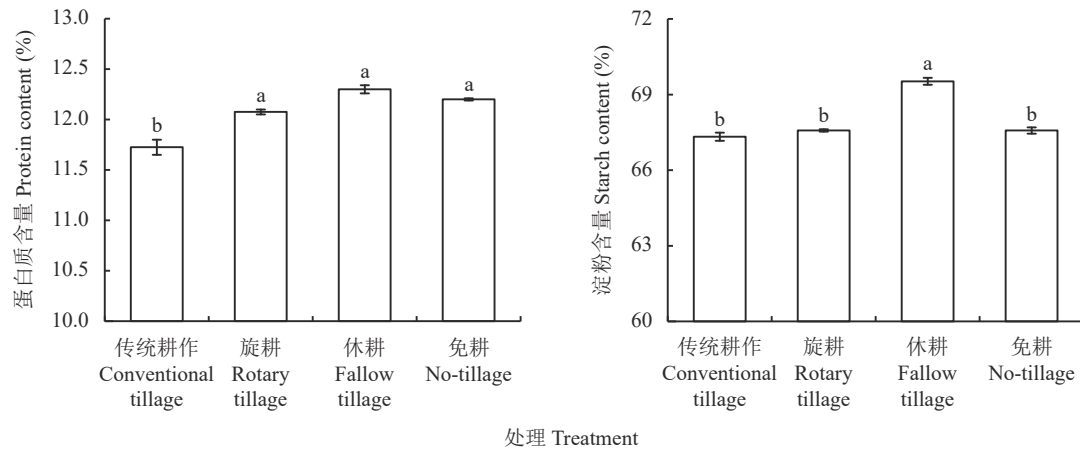


图5 不同耕作方式下小麦籽粒蛋白质、淀粉含量

Fig. 5 Protein and starch contents in wheat grain under different tillage methods

注：图柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

0.05)。此外，休耕处理还显著增加了硒元素含量 ($P<0.05$)。

2.4 土壤环境对小麦营养品质的影响

由土壤环境因子与小麦营养品质相关性热图(图6)可知，小麦籽粒淀粉、锌元素、硒元素与土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、微生物量碳均呈显著正相关关系。同时，小麦籽粒淀粉、锌元素与土壤微生物量氮显著正相关。小麦籽粒蛋白质与土壤含水量、硝态氮、有效磷显著正相关，而氨基酸总量与土壤铵态氮、硝态氮、有效磷呈显著正相关关系。

为进一步明确不同耕作方式下土壤细菌群落与小麦籽粒营养品质的相关性，对门分类水平相对丰度排名前10位的菌门与小麦籽粒营养品质指标进行Pearson相关性分析(表5)，结果表明，有7个细菌门类与小麦籽粒营养品质有显著相关关系，其中变形菌门与小麦籽粒淀粉含量显著正相关，厚壁菌门与钙、锌、硒元素呈显著正相关关系，变形菌门和拟杆菌门与硒元素显著正相关，绿弯菌门与氨基酸

总量显著正相关，疣微菌门与小麦淀粉、氨基酸总量、铁、锌、硒元素呈极显著或显著正相关关系；而奇古菌门与氨基酸总量极显著负相关，放线菌门与蛋白质、氨基酸总量均呈极显著负相关关系。

对土壤环境因子、土壤细菌群落及小麦营养品质进行冗余分析(图7)，结果表明，第一排序轴与第二排序轴分别贡献了79.69%和8.3%的小麦籽粒营养品质变化。土壤孔隙度与小麦籽粒营养品质成负相关，其他土壤环境因子及土壤细菌多样性、丰富度指数与小麦籽粒营养品质均呈正相关。其中铵态氮 ($F=25.7$, $P=0.002$)、微生物量碳 ($F=4.9$, $P=0.008$)、全氮 ($F=3.3$, $P=0.028$)、pH ($F=3.1$, $P=0.036$) 是影响小麦籽粒营养品质的主要环境因子。利用结构方程模型将耕作方式影响作物营养品质的作用路径进行量化(图8)。不同的耕作方式对小麦季土壤环境因子以及土壤细菌多样性具有显著的正效应 ($P=0.637^{**}$, $P=0.346^{**}$)，同时土壤环境因子也会显著影响土壤细菌多样性 ($P=0.663^{***}$)，土壤环境因

表4 耕作方式对小麦籽粒微量元素含量的影响 (mg/kg)

Table 4 Effects of tillage methods on trace element content in wheat grain

处理 Treatment	Ca	Fe	Zn	Se
传统耕作 Conventional tillage	313.25±3.20 ab	33.025±0.62 b	18.800±0.33 c	0.0098±0.01 c
旋耕 Rotary tillage	306.50±3.52 b	33.725±0.69 ab	21.600±0.26 b	0.0141±0.01 b
休耕 Fallow tillage	320.25±2.78 a	35.425±0.38 a	23.125±0.46 a	0.0179±0.01 a
免耕 No-tillage	318.00±2.68 a	33.800±0.47 ab	20.675±0.18 b	0.0120±0.01 bc

注：同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

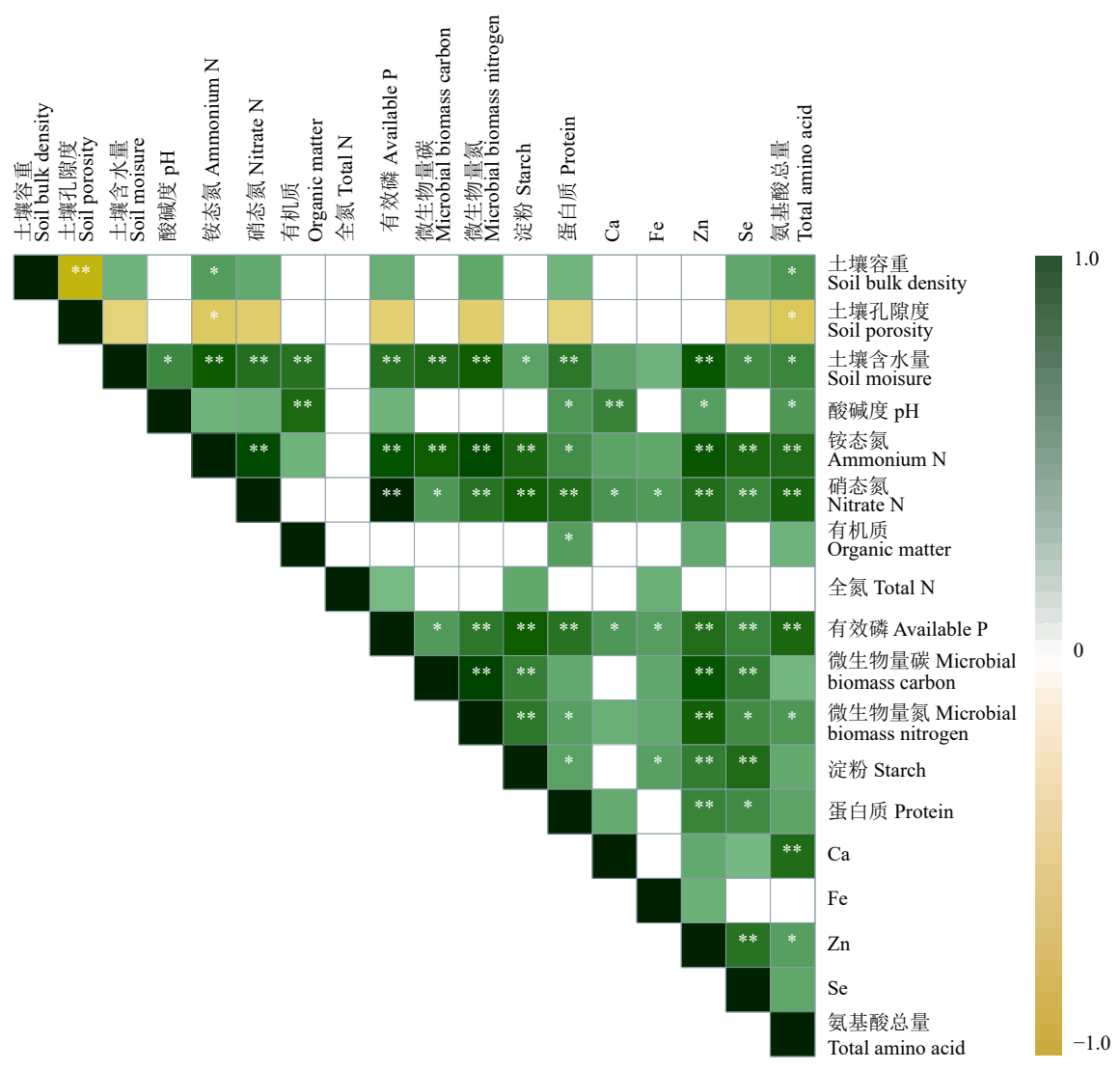


图 6 土壤环境因子与小麦籽粒营养品质相关分析

Fig. 6 Correlation analysis between soil environmental factors and wheat nutrient quality

Note: *— $P<0.05$; ** $P<0.01$.

子极显著影响小麦籽粒营养品质 ($P=0.896^{***}$)。此外, 土壤环境因子、土壤细菌多样性以及营养品质的解释量 r^2 分别为 40.6%, 75.2% 以及 81.4%。

3 讨论

减少土壤扰动的耕作方式能够改善土壤物理结构, 进而影响土壤蓄水保墒能力以及对小麦的养分供应^[18-19]。土壤容重、孔隙度是表征土壤物理性质的关键指标, 不同耕作方式对土壤物理性质的影响由于地区土壤类型、耕作管理年限及机械操作不同而产生差异。本研究中对土壤进行休耕处理后发现土壤容重、土壤含水量较传统深翻处理有显著提高, 而土壤孔隙度则相反。这与前人研究结果一致, 降低对土壤的扰动频次使得土壤蓄水保肥力增强, 土

壤容重及含水量变大, 与此同时土壤孔隙度随之下降^[11, 20]。可能是由于本试验地区采用小麦-玉米轮作的种植制度, 传统深翻耕作会对土壤表层进行频繁机械扰动, 造成土壤孔隙变大从而提高了土壤孔隙度。

土壤化学性质的变化会直接影响土壤健康及作物生长状况, 不同耕作方式对土壤化学性质影响程度不同。硝态氮和铵态氮是小麦易于吸收的速效氮形态。研究表明, 传统翻耕处理的硝态氮、铵态氮含量显著低于其他 3 种处理, 休耕处理下硝态氮、铵态氮含量达到最高。这可能是由于对土壤扰动变大从而使土壤孔隙度增大, 导致硝态氮发生淋溶作用而蒸发, 进而使得传统深翻、旋耕的硝态氮含量下降^[21]。频繁、持续的犁翻土壤, 会导致表层土

表 5 土壤细菌群落与小麦籽粒营养品质相关性分析

Table 5 Pearson correlation analysis between main bacterial flora in soil and wheat nutrient quality

细菌门 Bacterial phylum	淀粉 Starch	蛋白质 Protein	氨基酸总量 Total amino acid	Ca	Fe	Zn	Se
变形菌门 Proteobacteria	0.537*	0.453	0.063	0.453	0.462	0.436	0.547*
酸杆菌门 Acidobacteria	0.332	0.189	0.402	-0.023	0.215	0.188	0.265
拟杆菌门 Bacteroidetes	0.379	-0.072	-0.062	0.340	0.317	0.478	0.539*
放线菌门 Actinobacteria	-0.344	-0.624**	-0.629**	-0.451	-0.348	0	-0.110
芽单胞菌门 Gemmatimonadetes	-0.305	—	-0.470	-0.448	-0.33	-0.218	-0.288
疣微菌门 Verrucomicrobia	0.748**	0.444	0.609*	0.450	0.501*	0.547*	0.558*
奇古菌门 Thaumarchaeota	-0.391	-0.407	-0.656**	-0.494	-0.352	-0.022	-0.180
浮霉菌门 Planctomycetes	0.483	0.121	0.495	0.178	0.266	0.398	0.484
厚壁菌门 Firmicutes	0.477	0.372	-0.017	0.524*	0.099	0.603*	0.550*
绿弯菌门 Chloroflexi	0.287	0.175	0.605*	0.403	0.241	0.102	0.212

*— $P<0.05$; ** $P<0.01$.

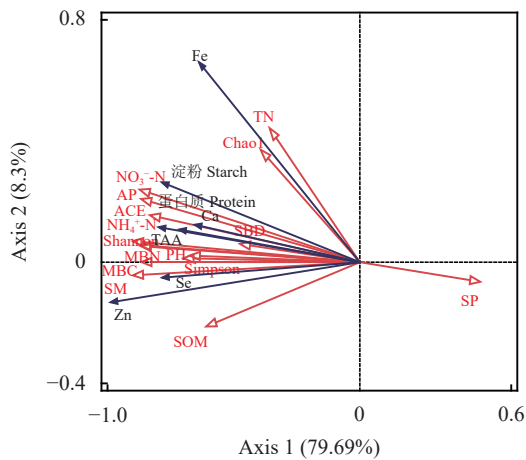


图 7 土壤环境因子、土壤细菌群落与小麦籽粒营养品质冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis (RDA) of soil environmental factors, soil bacterial communities, and nutrient quality of wheat grains

注：SBD—土壤容重；SP—土壤孔隙度；SM—土壤含水量；SOM—有机质；TN—全氮；AP—有效磷；MBC—微生物量碳；MBN—微生物量氮；TAA—氨基酸总量。
Note: SBD—Soil bulk density; SP—Soil porosity; SM—Soil moisture; SOM—Organic matter; TN—Total N; AP—Available P; MBC—Microbial biomass carbon; MBN—Microbial biomass nitrogen; TAA—Total amino acid.

壤有机质含量下降，从而加剧农田表层土壤流失和养分损失，郭晓霞^[22]试验表明，免耕较传统耕作更有利于土壤的碳储存，增加有机质含量，促进作物生长。这与本研究结果相同，耕作强度降低导致土壤与外界空气接触较少，降低了土壤养分矿化分解速率。但本研究中旋耕处理下有机质含量较高，这可能是因为旋耕仅打破 0—10 cm 土壤犁底层，秸秆仍

然保留在表层并充分腐解，使表层土壤有机质含量得到显著改善。本研究结果表明，传统深翻处理下土壤全氮含量最低，由于秸秆在休耕、免耕、旋耕处理下腐解转化效率更快，释放出更多氮素储存在土壤，导致土壤全氮有所提升^[23]。表层土壤的有效磷受不同耕作方式影响显著^[24]。本研究中，4 种耕作处理间有效磷含量具有显著性差异，耕作方式通过改变土壤物理结构及氧化还原电位，从而影响磷在土壤中的含量及转移变化。

土壤微生物多样性及丰富度与土壤生态系统的健康密切相关^[25]。休耕能够增加土壤微生物量碳、氮含量，调节土壤微环境、培肥地力^[26-27]。本研究发现，休耕处理下微生物量碳、氮含量显著高于其他 3 种耕作处理，这可能是由于种植作物的残体遗留在土壤表层，而旋耕、休耕和免耕对土壤表层土壤扰动较小，导致其微生物活性和生物量有所增加。土壤细菌群落结构组成受种植作物和土壤养分环境的影响，不同耕作方式下细菌种群的组成和丰度存在一定差异。本研究 4 种耕作方式处理中菌门的相对丰度含量不尽相同，休耕处理与免耕深松处理下的放线菌门相对丰度较低，这可能是由于两种处理下土壤质地、养分环境较好，降低了其丰度^[28-29]。研究发现免耕、休耕措施能够增加厚壁菌门的相对丰度，Rodrigues 等^[30]的研究表明厚壁菌门是可快速繁殖生长的喜好高营养环境的细菌门类，而免耕、休耕模式恰好较传统深翻耕作具有更良好的养分状况。土壤细菌群落结构及其多样性有利于维持稳定的土壤生态系统，进而为小麦生长提供更有利条件。

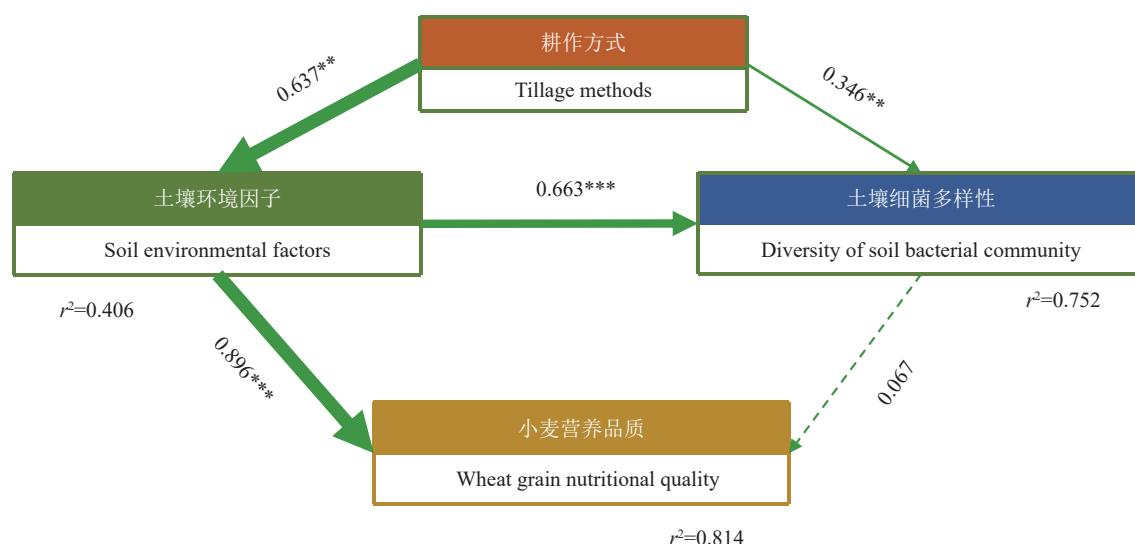


图 8 土壤环境因子、土壤细菌群落多样性与小麦籽粒营养品质结构方程模型

Fig. 8 Structural equation model of soil environmental factors, bacterial community diversity and wheat grain nutritional quality

注: 图中路径线条的粗细代表路径系数的高低; ***— $P<0.001$; **— $P<0.01$; *— $P<0.05$ 。

Note: The thickness of the path line represents the intensity of the path coefficient: ***— $P<0.001$; **— $P<0.01$; *— $P<0.05$.

本研究表明, 免耕、休耕处理的土壤细菌群落多样性指数及细菌群落丰富度指数显著高于传统翻耕处理。与前人研究结果一致, 这可能是由于减少对土壤扰动的保护性耕作改变了土壤理化性质, 减少土壤环境异质性, 进而增加土壤细菌群落多样性^[31]。

小麦的营养品质不仅与品种、区域环境和生态条件有关, 还与栽培措施、耕作方式关系密切。土壤水肥情况对小麦籽粒营养品质的形成有显著影响, 不同耕作方式能够显著改变土壤水肥条件和土壤性状^[32], 因此, 耕作方式势必对小麦品质产生一定的影响。关于耕作方式对小麦营养品质影响的研究较少, Salem 等^[33]表示, 长期免耕处理小麦籽粒蛋白质含量显著低于常规耕作和少耕。还有研究表明, 深松覆盖和免耕覆盖可以显著提高小麦籽粒淀粉含量^[34]。江晓东^[35]研究表明, 少耕有利于改善籽粒蛋白质质量, 且籽粒氨基酸含量变化趋势与蛋白质基本一致。本研究发现, 传统深翻处理下蛋白质含量显著低于免耕深松处理、休耕处理和旋耕。这可能是由于在一定阈值范围内, 小麦蛋白质含量与土壤中氮素含量呈正相关关系, 且小麦蛋白质含量对土壤水分含量降低的响应表现为先降低后升高^[31, 36-37]。淀粉含量表现为休耕处理显著高于其他 3 种耕作处理, 且传统深翻处理最低, 这与前人的研究结果相一致。原因是淀粉含量高低与土壤质量相关指标变化密不可分, 尤其是氮、磷等速效养分及土壤含水

量^[35, 38]。同时, 作物中微量元素的积累受到栽培管理方式的影响, 本试验结果中, 休耕下微量元素含量较其他 3 种耕作处理具有优势。这与沈浦等^[39]研究结果一致, 作物各微量营养元素吸收量均以深耕和浅耕最低, 免耕最高。

土壤是作物生长所需养分的直接来源, 不同耕作方式通过改变土壤养分状况直接影响作物生长及发育, 从而影响小麦籽粒营养品质。小麦籽粒营养品质的形成与土壤群落多样性、土壤环境因子密切相关。通过相关性分析发现土壤理化性质、土壤细菌群落与小麦籽粒营养品质之间均存在一定的内在联系。休耕通过减少对土壤扰动, 提升土壤速效养分及微生物量碳、氮含量, 为细菌群落提供更适宜的土壤环境, 进而提升富营养细菌门类的相对丰度, 促进作物生长发育及营养物质吸收, 改善小麦营养品质。土壤 pH 的降低会活化土壤中的 Ca^{2+} , 促进小麦对钙的吸收, 从而增加小麦籽粒中钙元素含量^[40]。与此同时, 铁元素含量与土壤含水量相关, 小麦籽粒锌元素的吸收会受到土壤有机质含量的影响^[41], 氮素的增加会提高籽粒中锌、铁的积累量^[42]。小麦籽粒硒元素含量与有效磷含量呈显著正相关关系^[43], 与本研究结果一致。冗余分析发现, 影响小麦籽粒营养品质形成的主要因素并非土壤细菌群落多样性。同样, 结构方程的结果也印证了这一点, 不同耕作方式通过影响土壤环境因子与细菌群落多样

性,进而影响小麦籽粒营养品质。在结构方程模型中,从标准总效应来看,小麦籽粒营养品质受到土壤环境因子的影响最大,其次为耕作方式,而土壤细菌多样性对小麦籽粒营养品质的影响系数较低。SEM 进一步量化了耕作方式影响小麦营养品质的路径系数,耕作方式对小麦籽粒营养品质的总解释率达到 81.4%。耕作方式通过调节土壤环境因子对作物籽粒营养品质起到积极效应,而休耕通过减少对土壤扰动,提升土壤速效养分及微生物量碳、氮含量,为细菌群落提供更适宜的土壤环境,促进小麦生长发育及营养物质吸收,改善小麦营养品质。这一结果进一步证实了耕作方式以土壤环境为中介,对小麦籽粒营养品质起到调控作用。

4 结论

1) 免耕、休耕和旋耕措施能够提高土壤含水量、铵态氮、硝态氮、有机质、全氮及有效磷含量,并能够改善土壤细菌群落多样性及丰富度。休耕还可提高土壤容重,降低土壤孔隙度,通过调节土壤细菌群落结构进而改善土壤。减少对土壤扰动的耕作方式更有利于培肥农田土壤,增强土壤蓄水能力,提高土壤细菌群落多样性,为小麦生长提供有利条件。

2) 小麦籽粒淀粉含量、微量元素含量、氨基酸及其组分含量在休耕处理下显著提高,而小麦籽粒蛋白质含量在减少土壤扰动的耕作模式下均显著提高。土壤环境因子极显著影响了小麦籽粒营养品质,土壤铵态氮、微生物量碳、全氮、pH 是影响小麦营养品质的主要环境因子。

3) 少耕、免耕等耕作方式对土壤环境因子及土壤细菌群落具有显著的正效应,通过改变土壤环境因子、细菌群落结构进而影响小麦籽粒营养品质的形成。因此,在保证粮食安全的前提下,合理选择和搭配耕作措施,适时休耕养地是改善土壤健康状况和提升小麦籽粒营养品质的有效途径。

参考文献:

- [1] 张江周,李奕赞,李颖,等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603–616.
Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, *et al.* Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 603–616.
- [2] 起晓星. 基于粮食安全和环境风险控制目标的可持续农业土地利用模式研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
Qi X X. Study on sustainable agricultural land use patterns under the premise of ensuring food security with lower environmental cost[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.
- [3] 李辉尚. 基于营养目标的中国城镇居民食物消费研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2015.
Li H S. Study on the residents' food consumption based on the nutritional goal in urban China[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [4] 沈晓琳,王丽丽,汪洋,等. 保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 361–370.
Shen X L, Wang L L, Wang Y, *et al.* Progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates, microbes, and nematode communities[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 361–370.
- [5] 周鹏翀. 深松对麦玉两熟农田土壤结构及水分利用的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2020.
Zhou P C. Effects of subsoiling on soil structure and water use in wheat-maize crop system[D]. Tai'an, Shandong: MS Thesis of Shandong Agricultural University, 2020.
- [6] 王玉玲,李军. 利于小麦—玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1139–1150.
Wang Y L, Li J. Study of tillage patterns suitable for soil physicochemical properties and crop yields in wheat/maize fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1139–1150.
- [7] 王成己,潘根兴,田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2464–2475.
Wang C J, Pan G X, Tian Y G. Characteristics of cropland topsoil organic carbon dynamics under different conservation tillage treatments based on long-term agro-ecosystem experiments across mainland China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2464–2475.
- [8] Daniel B H, Robret L S, Steven R A, *et al.* Soil-litter mixing and microbial activity mediate decomposition and soil aggregate formation in a sandy shrub-invaded Chihuahuan Desert grassland[J]. *Plant Ecology*, 2017, 218(4): 459–474.
- [9] Gopal R M, Bappa D, Sandrasekaran M, *et al.* Soil and water conservation measures improve soil carbon sequestration and soil quality under cashews[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(2): 190–206.
- [10] Varvel G E, Wilhelm W W. Long-term soil organic carbon as affected by tillage and cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 915–921.
- [11] 史功赋. 大兴安岭西麓春小麦土壤微生物对不同轮作休耕模式的响应机制[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古大学硕士学位论文, 2021.
Shi G F. Response mechanism of soil microorganisms of spring wheat to different rotation fallow mode in the western foot of Daxinganling Mountains[D]. Hohhot, Inner Mongolia: MS Thesis of Inner Mongolia University, 2021.
- [12] 赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1785–1792.
Zhao Y L, Guo H B, Xue Z W, *et al.* Effects of tillage and straw

- returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1785–1792.
- [13] 程教攀, 陈力力, 李梦丹, 等. 不同耕作方式对稻田土壤微生物的影响[J]. *湖南农业科学*, 2017, (8): 8–10.
- Cheng J B, Chen L L, Li M D, *et al.* Effects of different tillage methods on soil microorganisms in rice field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017, (8): 8–10.
- [14] 张勇, 郝元峰, 张艳, 等. 小麦营养和健康品质研究进展[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(22): 4284–4298.
- Zhang Y, Hao Y F, Zhang Y, *et al.* Progress in research on genetic improvement of nutrition and health qualities in wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(22): 4284–4298.
- [15] 梅晶晶, 周苏玫, 徐凤丹, 等. 小麦根蘖发育和产量对耕作和追氮方式以及施氮量的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6): 1069–1080.
- Mei J J, Zhou S M, Xu F D, *et al.* EResponse of root and tiller development and yield of wheat to tillage and nitrogen topdressing patterns and nitrogen application rates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(6): 1069–1080.
- [16] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施肥与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 133–139.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al.* Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133–139.
- [17] Steven B M, Matthew R R, William S C, *et al.* Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA[J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2012, 27(1): 31–40.
- [18] 王淑兰. 基于长期保护性轮耕的黄土旱塬春玉米田土壤蓄水培肥增产效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2020.
- Wang S L. Effects of long-term in-situ rotational tillage on soil water, fertility and spring maize yield on the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2020.
- [19] 王浩. 黄土旱塬麦玉轮作田长期定位耕作的土壤改良及耕地生产力提升效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2020.
- Wang H. Soil quality and crop productivity improvement under tillage methods on the wheat and maize rotation cropping system in the WeiBei dryland[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2020.
- [20] 金慧芳. 耕作措施对红壤坡耕地耕层物理性能影响及调控研究[D]. 重庆: 西南大学博士学位论文, 2019.
- Jin H F. Study on the effects of tillage measures on the physical properties of cultivated-layer and regulation of red soil sloping farmland[D]. Chongqing: PhD Dissertation of Southwest University, 2019.
- [21] 沈晓琳. 耕作方式对土壤有机碳、微生物及线虫群落的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2021.
- Shen X L. Effects of tillage managements on soil organic carbon, soil microbial and nematodes communities[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [22] 郭晓霞. 多年免耕轮作对内蒙古黄土高原旱作土壤质量的影响机制[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2012.
- Guo X X. Effect mechanism of many years' no-tillage with rotation on dryfarming soil quality in Loess Plateau of Inner Mongolia [D]. Hottot, Inner Mongolia: PhD Dissertation of Inner Mongolia Agricultural University, 2012.
- [23] 徐莹莹, 靳晓燕, 庞爱国, 等. 土壤性状和玉米生长对不同耕作方式的响应[J]. *农机化研究*, 2022, 44(11): 11–18.
- Xu Y Y, Jin X Y, Pang A G, *et al.* Response of soil properties and maize growth to different tillage methods[J]. *Research on Agricultural Mechanization*, 2022, 44(11): 11–18.
- [24] Wei K, Chen Z H, Zhang X P, *et al.* Tillage effects on phosphorus composition and phosphatase activities in soil aggregates[J]. *Geoderma*, 2014, 217–218: 37–44.
- [25] Cardinale B J, Srivastava D S, Duffy J E, *et al.* Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems[J]. *Nature*, 2006, 443: 989–992.
- [26] 李晓婷, 李立军, 李杨, 等. 轮作方式对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(9): 68–73.
- Li X T, Li L J, Li Y, *et al.* Effect of different crop rotation methods on soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(9): 68–73.
- [27] 徐光辉, 王洋, 王继红, 等. 休耕轮作对农田土壤微生物量碳的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 897–901.
- Xu G H, Wang Y, Wang J H, *et al.* Effect of fallow rotation on microbial biomass carbon in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4): 897–901.
- [28] Yendi E N, Selene G, Nina M, *et al.* Relative impacts of tillage, residue management and crop-rotation on soil bacterial communities in a semi-arid agroecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 86–95.
- [29] Noemie P, Lionel R, Aurore K, *et al.* Stimulation of different functional groups of bacteria by various plant residues as a driver of soil priming effect[J]. *Ecosystems*, 2013, 16(5): 810–822.
- [30] Rodrigues J L M, Pellizari V H, Mueller R, *et al.* Conversion of the Amazon rainforest to agriculture results in biotic homogenization of soil bacterial communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(3): 988–993.
- [31] Roberta P, Nadia V, Silvia L, *et al.* Consequences on macroporosity and bacterial diversity of adopting a no-tillage farming system in a clayish soil of central Italy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 66: 78–93.
- [32] 王康君, 孙中伟, 郭明明, 等. 小麦营养品质的研究进展与展望[J]. *农业与技术*, 2020, 40(7): 7–12.
- Wang K J, Sun Z W, Guo M M, *et al.* Research progress and prospect of wheat nutritional quality[J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(7): 7–12.
- [33] Salem A A, Luigi T, Leonardo V, *et al.* Implications of no-tillage system in faba bean production energy analysis and potential agronomic benefits background objective method results conclusion [J]. *The Open Agriculture Journal*, 2018, 12(1): 270–285.

- [34] 吴金芝, 黄明, 李友军, 等. 耕作方式对旱区冬小麦籽粒品质性状的影响[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(3): 454–459.
Wu J Z, Huang M, Li Y J, *et al.* Effects of different tilling managements on quality characteristics of winter wheat in dry farmland area[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(3): 454–459.
- [35] 江晓东. 耕作模式与施氮量对土壤理化性状及小麦玉米产量、品质的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2007.
Jiang X D. Effects of soil tillage systems and nitrogen applied amount on soil physical and chemical characters, yield and quality of wheat and maize[D]. Tai'an, Shandong: PhD Dissertation of Shandong Agricultural University, 2007.
- [36] 王晓英, 贺明荣, 李飞, 等. 水氮耦合对强筋冬小麦子粒蛋白质和淀粉品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 361–367.
Wang X Y, He M R, Li F, *et al.* Coupling effects of irrigation and nitrogen fertilizer on grain protein and starch quality of strong gluten winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(3): 361–367.
- [37] 白羿雄, 姚晓华, 姚有华, 等. 水分亏缺对青藏高原小麦族作物籽粒中氮磷钾和氨基酸含量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(7): 11–18.
Bai Y X, Yao X H, Yao Y H, *et al.* Effects of water deficit on the contents of N, P and K and amino acids accumulation in wheat grains of Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(7): 11–18.
- [38] 吴金芝, 黄明, 李友军, 等. 不同水分和氮素形态对弱筋小麦豫麦50籽粒淀粉产量和淀粉糊化特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1833–1840.
Wu J Z, Huang M, Li Y J, *et al.* Effects of different water and nitrogen forms on starch yields and starch pasting properties of weak gluten wheat variety Yumai 50[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5): 1833–1840.
- [39] 沈浦, 吴正锋, 郑亚萍, 等. 不同耕作方式下花生必需营养元素的吸收特征[A]. 中国作物学会油料作物专业委员会第八次会员代表大会暨学术年会综述与摘要集[C]. 山东青岛, 2018.
Shen P, Wu Z F, Zheng Y P, *et al.* Absorption characteristics of essential nutrients from peanuts under different tillage methods[A]. Summary and Abstracts of the 8th Member Congress and Annual Conference of the Oil Crop Professional Committee of the Chinese Crop Society[C]. Qingdao, Shandong, 2018.
- [40] 张玥琦, 程奇, 关之昊, 等. 稻草与生石灰对设施土壤微量元素含量和番茄产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 228–233.
Zhang Y Q, Cheng Q, Guan Z H, *et al.* Effects of straw and lime additions on the DTPA–extractable micronutrients contents and tomato yield in greenhouse soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 228–233.
- [41] 常旭虹, 赵广才, 王德梅, 等. 生态环境与施氮量协同对小麦籽粒微量元素含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 885–895.
Chang X H, Zhao G C, Wang D M, *et al.* Effects of ecological environment and nitrogen application rate on microelement contents of wheat grain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 885–895.
- [42] 周正萍. 不同耕作方式与秸秆还田对土壤肥力和小麦生长及籽粒品质的影响[D]. 江苏扬州: 扬州大学硕士学位论文, 2021.
Zhou Z P. Effects of tillage methods and straw returning on soil fertility and wheat growth and quality[D]. Yangzhou, Jiangsu: MS Thesis of Yangzhou University, 2021.
- [43] 张栋. 施磷对土壤硒形态及小麦硒吸收转运的影响[D]. 新疆石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2017.
Zhang D. Effect of phosphate application on soil selenium fractions and selenium uptake, translocation in wheat[D]. Shihezi, Xinjiang: MS Thesis of Shihezi University, 2017.