

纪耀坤. 化肥与有机肥及土壤改良基质配施对土壤质量和小麦生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(21): 221-227.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.21.033

化肥与有机肥及土壤改良基质配施对土壤质量和小麦生长发育的影响

纪耀坤

(商丘职业技术学院, 河南商丘 476000)

摘要:为明确化肥与不同有机肥及土壤改良基质配施对土壤质量变化及小麦生长发育的影响,通过田间定位试验,设置 7 个处理[不施肥(CK)、100% 化肥(T₁)、100% 化肥 + 土壤改良基质(T₂)、50% 化肥 + 50% 羊粪(T₃)、50% 化肥 + 50% 生物有机肥(T₄)、50% 化肥 + 50% 羊粪 + 土壤改良基质(T₅)、50% 化肥 + 50% 生物有机肥 + 土壤改良基质(T₆)],研究不同施肥处理对土壤养分、酶活性以及小麦生理代谢与产量等因素的变化规律。结果表明:与 CK 处理相比,不同施肥处理均能不同程度地提高土壤养分含量及酶活性、小麦叶片 SPAD 值、叶片 RUBP 羧化酶活性以及蔗糖酶活性,提高小麦籽粒产量。而对比不同施肥处理发现,T₆ 处理能够不同程度地提高土壤全氮、有机质、碱解氮、速效钾含量以及土壤脲酶、蔗糖酶、纤维素酶、转化酶活性,其中土壤全氮、碱解氮含量以及土壤脲酶、纤维素酶、转化酶活性较其他施肥处理分别显著提高 6.33% ~ 13.51%、6.40% ~ 15.51%、4.03% ~ 12.17%、5.60% ~ 19.64%、6.73% ~ 27.04%,而 T₅ 处理能够提高土壤全磷、速效磷含量以及碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性,但除碱性磷酸酶显著高于 T₆ 处理外,其他与 T₆ 处理均无显著差异;T₆ 处理能够提高小麦叶片 SPAD 值、光合速率、蒸腾速率、气孔导度以及 RUBP 羧化酶、蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶活性,降低胞间 CO₂ 浓度,提高小麦穗数、穗粒数以及千粒质量、籽粒产量,其中蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶活性、千粒质量、籽粒产量较其他施肥处理分别显著提高 10.26% ~ 26.47%、5.77% ~ 17.02%、5.48% ~ 17.67%、11.12% ~ 31.28%。相关分析显示,化肥与有机肥及土壤改良基质配施条件下,小麦产量及叶片生理代谢与土壤养分、酶活性的变化具有紧密相关的联系。50% 化肥 + 50% 生物有机肥 + 土壤改良基质处理表现最优。

关键词:化肥;有机肥;土壤改良基质;小麦;土壤质量;生理代谢;产量

中图分类号:S512.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)21-0221-07

小麦是黄淮海平原的主要粮食作物之一,其种植面积和产量均占全国 50% 以上,对我国粮食安全保障具有重要作用^[1]。但目前小麦在种植过程中普遍存在化肥施用量过多等问题,不仅使得小麦增产效率降低,浪费自然资源,也会导致土壤板结、养分失衡、菌群结构失调、生物活性降低等问题,严重破坏土壤生态平衡^[2-3]。农业的高效可持续发展不仅体现在作物的产量效益以及作物对资源的利用效率,还应充分考虑土壤后续的可持续生产能力^[4]。因此,寻找切实可行的施肥措施以提升肥料利用率、改善土壤质量、提高小麦生理代谢能力及产量已成为当前的紧要任务。有研究表明,无机肥

与有机肥配施不仅能够改善土壤养分循环、增加土壤酶活性,还能够提高作物产量与品质^[5-7]。有机肥含有丰富的碳源,能够被土壤微生物代谢利用,发生自生固氮或联合固氮反应,可溶解土壤中的难溶化合物从而提高土壤养分的供应能力^[8]。鲁伟丹等研究表明,长期使用有机肥替代部分化肥可明显提高土壤速效养分含量,提升化肥利用效率,实现稳产、增产的目的^[9]。刘明月等研究表明,长期有机无机肥配施不仅能够培肥土壤,提高土壤养分含量,还能够有效提高作物产量^[10]。陶磊等研究表明,部分有机肥替代化肥能够提高土壤酶活性,调节土壤微生物群落组成,对改善滴灌棉田土壤生物学性状具有明显作用^[11]。陈修斌等研究表明,适度增施有机肥替代部分化肥不仅可以促进作物稳产、增产,还能够有效提高土壤速效养分含量^[12-16]。可见,合理的有机肥替代部分化肥是目前解决化肥过量施用的一种有效策略。

收稿日期:2021-12-04

基金项目:高职高专国家级示范专业;河南省科技攻关项目(编号:142102110024)。

作者简介:纪耀坤(1984—),男,河南商丘人,讲师,主要从事生物技术相关研究。E-mail:15703703332@163.com。

目前,有机肥无机肥配施的研究多集中在作物产量效应与肥料施用效率等方面^[17-18],而关于土壤生物学特性、作物生理代谢及其相关性的研究较少。土壤酶能够参与土壤各种生物化学反应和物质循环过程,其活性可以反映土壤生物化学过程的强度与方向,还可以客观地反映土壤肥力及演变过程^[19-21]。因此,通过研究化肥与有机肥配施对土壤养分、酶活性、小麦生理代谢与产量的影响,对评价土壤肥力水平及土壤培肥效果具有重要意义。另外,期望通过将添加集中腐熟且富含有机质的土壤改良基质,用于提高土壤有效养分以及土壤酶活性,改善土壤质量与土地生产力。所以,本试验通过研究化肥减量与不同有机肥及土壤改良基质配施对土壤质量变化、小麦生理代谢及产量的影响,探讨其关联性,找到适宜的施肥模式,以期小麦田有机肥的合理施用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019 年 10 月 8 日至 2021 年 6 月 9 日在商丘职业技术学院试验示范基地(116°15'E、39°28'N)进行,该地位于黄淮海冬麦区腹地,属黄淮海平原典型农区。年平均气温为 14℃,年平均降水量为 650 mm,年平均日照时长为 2 200 h,无霜期平均为 210 d,全年 0℃以上积温为 4 500~5 500℃,夏季湿热多雨,冬季寒冷干燥,属典型暖温带半湿润季风气候。试验地开阔平坦,周围无遮挡,排灌方便,肥力均匀,供试土壤为石灰性潮土,质地为沙壤。耕作层土壤理化性质:碱解氮含量 63.52 mg/kg,速效磷含量 38.47 mg/kg,速效钾含量 143.24 mg/kg,有机质含量 9.85 g/kg,pH 值 8.12。

1.2 试验材料

供试小麦为济麦 22,由山东省农业科学院作物研究所提供;供试玉米为郑单 985,由河南省农业科学院粮食作物研究所提供。供试肥料:生物有机肥(有机质含量 $\geq 40\%$,有效活菌数 ≥ 0.2 亿 CFU/g),购自河北中创丰农生物技术有限公司;羊粪:由羊粪和小麦秸秆等腐熟有机物料发酵制成,有机质含量 $\geq 36\%$,氮磷钾(NPK)含量 $\geq 4\%$,购自附近农户;土壤改良基质由畜禽粪便、蘑菇渣和秸秆等腐熟有机物料发酵制成,NPK $\geq 36\%$,有效活菌数 ≥ 2.0 亿 CFU/g,购自淮安市中诺农业科技发展有限公司;氮磷钾肥分别选用尿素(纯 N 46%)、磷酸二

铵(含纯 N 18%、含 P₂O₅ 46%)和硫酸钾(含 K₂O 50%),购自河南心连心化学工业集团股份有限公司。

1.3 试验设计

试验地常年为小麦—玉米轮作种植,通过 2 年定点试验,小麦季进行不同施肥处理,玉米季按照当地习惯统一施肥,不进行特殊处理。小麦季设 7 个处理,分别为不施肥(CK)、100% 化肥(T₁)、100% 化肥 + 土壤改良基质(T₂)、50% 化肥 + 50% 羊粪(T₃)、50% 化肥 + 50% 生物有机肥(T₄)、50% 化肥 + 50% 羊粪 + 土壤改良基质(T₅)、50% 化肥 + 50% 生物有机肥 + 土壤改良基质(T₆)。不同处理肥料均于整地前施入,其中化肥施用量为纯 N 210 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm²,羊粪 30 000 kg/hm²,生物有机肥 1 500 kg/hm²,土壤改良基质 7 500 kg/hm²,磷肥、钾肥、羊粪、生物有机肥和土壤改良基质均于旋地前作为基肥一次性施入,生育期内不进行追肥,70% 氮肥为基肥,30% 氮肥于拔节期追肥。试验处理随机排列,每个样品 4 次重复,小区面积 60 m²(6 m×10 m),区组间距 0.5 m,小区保护行 3 m,共 21 个小区。小麦播种量为 84 kg/hm²,玉米种植密度为 6.0 万株/hm²,玉米株、行间距分别为 0.26、0.8 m。小麦或玉米收获后,将其地上部秸秆全部移走,而根部进行粉碎还田,小麦和玉米的其他管理措施与当地习惯一致。

1.4 土壤样品采集与测定

于 2021 年小麦收获期采集土壤样品,利用 5 点取样法采集耕作层(0~20 cm)土壤样品,混匀后将碎石、根部等杂物挑出。用保温箱将土壤样品带回实验室,过 20 目筛后,一份土壤置于室内自然阴干,用于土壤养分测定;另一份土壤置于 4℃ 冰箱,用于土壤酶活性测定。

土壤全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾、有机质含量以及土壤 pH 值分别采用半微量凯氏定氮法、碱解扩散法、HClO₄-H₂SO₄ 法、NaHCO₃⁻ 浸提钼锑钨比色法、NH₄OAC-浸提火焰光度法、重铬酸钾-外加热法和 1:5 水土比法^[22]测定。

土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性分别采用苯酚钠-次氯酸钠比色法、磷酸苯二钠比色法、高锰酸钾滴定法^[23]测定;蔗糖酶、纤维素酶、转化酶活性测定均采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[23]测定。

1.5 植株样品采集与测定

于 2021 年小麦盛花期开始,每小区选取小麦 10 株,用 SPAD-502 叶绿素仪测定旗叶 SPAD 值,用 LI-6400 便携式光合仪测定旗叶光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i),并用红绳进行标记,每隔 7 d 测定 1 次,连续测定 4 次,取平均值。

于 2021 年小麦盛花期采集植株叶片样品,每个小区采集的旗叶鲜样,用液氮冷冻 10 min 后置于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存,用于核酮糖二磷酸羧化酶(RuBP 羧化酶)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)和蔗糖合成酶(SS)活性测定^[24-25]。

于 2021 小麦收获期进行产量测定,每小区小麦籽粒全部实打实收,计算产量,并进行公顷折算,取平均值。每处理每小区选取 30 株小麦,晒干后进行考种,主要包括单株生物产量、穗数、穗粒数、穗粒质量、千粒质量,取平均值。

1.6 数据处理

利用 WPS 校园版进行数据整理与计算,利用 SPSS 18.0 软件进行统计分析,采用 LSD 多重比较法进行不同处理间的差异性显著检验。

2 结果与分析

2.1 化肥与有机肥及土壤改良基质配施对土壤质量变化的影响

2.1.1 不同施肥处理对土壤养分含量变化的影响

由表 1 可以看出,不同施肥处理土壤养分含量差异较大。与 CK 处理相比,不同施肥处理的土壤各养分含量均有显著性提高,各处理 pH 值差异不显著。对比不同施肥处理可知, T_6 处理的土壤全氮、有机质、碱解氮、速效钾含量最高,其中土壤全氮、碱解氮含量较其他施肥处理分别显著提高 6.33% ~ 13.51%、6.40% ~ 15.51%,而有机质含量较 T_1 、 T_2 处理分别显著提高 6.58%、5.42%,速效钾含量较 T_1 、 T_3 处理分别显著提高 8.68%、9.16%。 T_5 处理的土壤全磷、速效磷含量最高,较 T_1 、 T_3 、 T_4 处理分别显著提高 9.09%、16.13%、7.46% 和 8.62%、13.89%、6.10%,与 T_2 、 T_6 处理均无显著性差异。施肥处理中 T_3 处理的土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量均最低,其中除土壤全磷含量显著低于 T_1 处理外,其他养分含量与 T_1 处理相比均无显著性差异。

表 1 不同施肥处理对土壤养分含量变化的影响

处理	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	pH 值
CK	0.64 ± 0.08d	0.58 ± 0.06d	8.61 ± 0.42d	56.26 ± 4.32e	36.59 ± 2.26e	122.65 ± 9.68c	8.13 ± 0.12a
T_1	0.75 ± 0.06bc	0.66 ± 0.03b	9.12 ± 0.49c	65.38 ± 3.65cd	43.26 ± 2.19cd	131.26 ± 8.95b	8.14 ± 0.09a
T_2	0.79 ± 0.10b	0.69 ± 0.09ab	9.22 ± 0.38bc	69.25 ± 3.77b	45.61 ± 3.88ab	138.92 ± 10.26a	8.11 ± 0.07a
T_3	0.74 ± 0.04c	0.62 ± 0.07c	9.46 ± 0.62abc	64.34 ± 5.26d	41.26 ± 4.51d	130.68 ± 7.31b	8.11 ± 0.09a
T_4	0.77 ± 0.04bc	0.67 ± 0.09b	9.62 ± 0.57ab	68.59 ± 4.92bc	44.29 ± 4.26bc	139.65 ± 8.15a	8.12 ± 0.05a
T_5	0.78 ± 0.09b	0.72 ± 0.05a	9.59 ± 0.36ab	69.85 ± 6.85b	46.99 ± 3.91a	135.98 ± 4.32ab	8.09 ± 0.10a
T_6	0.84 ± 0.12a	0.71 ± 0.06a	9.72 ± 0.55a	74.32 ± 6.11a	45.36 ± 3.75abc	142.65 ± 6.11a	8.12 ± 0.14a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。表 2 至表 4 同。

2.1.2 不同施肥处理对土壤酶活性变化的影响

由表 2 可以看出,不同施肥处理对土壤酶活性变化有不同的影响。与 CK 处理相比,不同施肥处理的土壤酶活性均有不同程度地提高,其中除 T_1 、 T_4 、 T_5 、 T_6 处理的过氧化氢酶以及 T_3 处理的转化酶活性与 CK 处理无显著差异外,其他施肥处理的各种酶活性均显著提高。对比不同施肥处理可知, T_6 处理土壤脲酶、蔗糖酶、纤维素酶、转化酶活性均为最高值,较其他施肥处理分别提高 4.03% ~ 12.17%、2.57% ~ 13.88%、5.60% ~ 19.64%、6.73% ~

27.04%,其中土壤脲酶、纤维素酶及转化酶活性差异均达到显著性水平,蔗糖酶活性显著高于 T_1 、 T_2 、 T_3 处理。 T_5 处理的碱性磷酸酶活性最高,较其他施肥处理显著提高 5.33% ~ 14.49%, T_3 处理的过氧化氢酶活性最高,较其他施肥处理提高 1.17% ~ 4.41%,但均无显著性差异。 T_1 处理的碱性磷酸酶、蔗糖酶和转化酶活性在施肥处理中均最低,其中除 T_2 、 T_4 处理的碱性磷酸酶以及 T_3 处理的转化酶活性与 T_1 处理无显著性差异外,其他处理的各种土壤酶活性均显著高于 T_1 处理。

表2 不同施肥处理对土壤酶活性变化的影响

处理	脲酶活性 [mg/(g·d)]	碱性磷酸酶活性 [mg/(g·d)]	过氧化氢酶活性 [mL/(g·d)]	蔗糖酶活性 [mg/(g·d)]	纤维素酶活性 [mg/(g·d)]	转化酶活性 [mg/(g·d)]
CK	1.05 ± 0.06d	0.57 ± 0.06d	7.35 ± 0.45b	6.16 ± 0.24d	7.02 ± 0.45e	6.59 ± 0.37d
T ₁	1.16 ± 0.12c	0.69 ± 0.10c	7.63 ± 0.62ab	7.35 ± 0.41c	8.35 ± 0.59d	7.22 ± 0.61c
T ₂	1.20 ± 0.09bc	0.72 ± 0.08bc	7.72 ± 0.39a	7.89 ± 0.52b	8.99 ± 0.29c	7.98 ± 0.66b
T ₃	1.15 ± 0.08c	0.74 ± 0.08b	7.81 ± 0.28a	7.79 ± 0.39b	8.16 ± 0.52c	6.99 ± 0.52cd
T ₄	1.24 ± 0.11ab	0.72 ± 0.13bc	7.69 ± 0.47ab	8.16 ± 0.48ab	9.46 ± 0.92b	8.32 ± 0.65b
T ₅	1.22 ± 0.16b	0.79 ± 0.10a	7.66 ± 0.31ab	7.98 ± 0.33ab	9.11 ± 0.67bc	8.26 ± 0.49b
T ₆	1.29 ± 0.06a	0.75 ± 0.09b	7.48 ± 0.43ab	8.37 ± 0.41a	9.99 ± 0.44a	8.88 ± 0.75a

2.2 化肥与有机肥及土壤改良基质配施对小麦生理特性的影响

2.2.1 不同施肥处理对小麦旗叶 SPAD 值及光合参数的影响

在小麦盛花期测定小麦旗叶 SPAD 值及光合参数时发现,不同施肥处理下小麦旗叶 SPAD 值及光合参数差异较大。由表 3 可知,与 CK 处理相比,除 T₃ 处理与 CK 处理无显著性差异外,其他处理均显著升高;其中 T₆ 处理的 SPAD 值最高,较其他施肥处理分别提高 4.17% ~ 12.33%,显著高于除 T₂ 处理外的其他处理;T₃ 处理在所有施肥处理中最低,但与 T₁ 处理无显著性差异。不同施

肥处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度均显著高于 CK,胞间 CO₂ 浓度显著低于 CK。其中 T₆ 处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度均最高,较 CK 处理分别显著提高 19.83%、20.64%、27.19%,胞间浓度 CO₂ 浓度最低,较 CK 处理显著降低 25.04%。对比不同施肥处理可知,T₃ 处理的光合速率最低,但与 T₁ 处理无显著性差异。T₁ 处理的蒸腾速率、气孔导度均最低,其中蒸腾速率显著低于 T₄、T₅、T₆ 处理,气孔导度显著低于 T₂、T₄、T₅、T₆ 处理。T₁ 处理的胞间 CO₂ 浓度最高,显著高于 T₂、T₄、T₅、T₆ 处理,与 T₃ 处理无显著性差异。

表3 不同施肥处理对小麦旗叶 SPAD 值及光合参数的影响

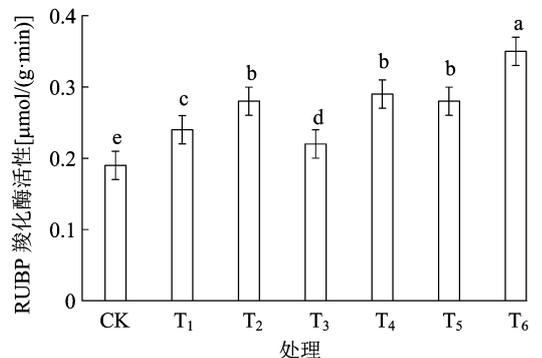
处理	SPAD 值	光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO ₂ 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
CK	46.65 ± 4.86d	21.63 ± 2.11c	10.66 ± 0.559d	298.65 ± 15.69e	256.65 ± 16.26a
T ₁	49.36 ± 3.95bc	23.24 ± 1.36b	11.42 ± 0.61c	325.43 ± 19.21d	239.65 ± 12.19b
T ₂	52.46 ± 3.23ab	24.69 ± 1.45a	11.95 ± 0.92bc	345.73 ± 22.92bc	218.56 ± 22.57cd
T ₃	48.65 ± 3.19cd	22.85 ± 1.82b	11.47 ± 0.38c	333.56 ± 29.65cd	230.95 ± 19.86bc
T ₄	51.69 ± 4.60b	24.92 ± 1.29a	12.28 ± 0.44ab	356.84 ± 30.21b	220.69 ± 17.57c
T ₅	50.98 ± 2.98bc	23.16 ± 1.95b	12.09 ± 0.51b	346.82 ± 14.37bc	208.68 ± 19.53d
T ₆	54.65 ± 5.15a	25.92 ± 2.01a	12.86 ± 0.63a	379.85 ± 18.55a	192.38 ± 17.88e

2.2.2 不同施肥处理对小麦叶片 RUBP 羧化酶活性的影响

由图 1 可知,与 CK 处理相比,不同施肥处理的小麦叶片 RUBP 羧化酶活性分别显著提高 15.79% ~ 84.21%,其中 T₆ 处理的 RUBP 羧化酶活性最高。而在不同施肥处理对比中可知,T₃ 处理的 RUBP 羧化酶活性最低,较其他施肥处理分别显著降低 8.33% ~ 37.14%,T₁ 处理的 RUBP 羧化酶活性显著低于 T₂、T₄、T₅、T₆ 处理,而 T₂、T₄、T₅ 处理间无显著性差异。

2.2.3 不同施肥处理对小麦叶片蔗糖酶活性代谢的影响

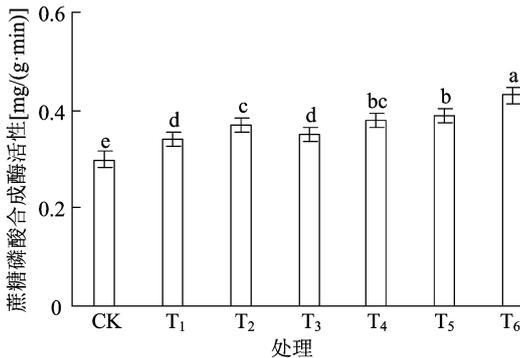
由图 2 可知,与 CK 处理相比,不同施肥处理的蔗糖磷酸合成酶活性分别显著提高 13.33% ~



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。图 2 同图 1

43.33%,蔗糖合成酶活性较 CK 处理分别提高 4.25% ~ 17.02%,T₂、T₆ 处理的蔗糖合成酶活性较

CK 处理显著提高。对比不同施肥处理可知, T_6 处理的蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶活性均最高, 较其他施肥处理分别显著提高 10.26% ~ 26.47%、5.77% ~ 17.02%。而 T_1 、 T_3 处理的蔗糖磷酸合成



酶活性显著低于其他施肥处理, T_1 、 T_3 处理的蔗糖合成酶活性显著低于 T_2 、 T_6 处理, 与 T_4 、 T_5 处理均无显著性差异。

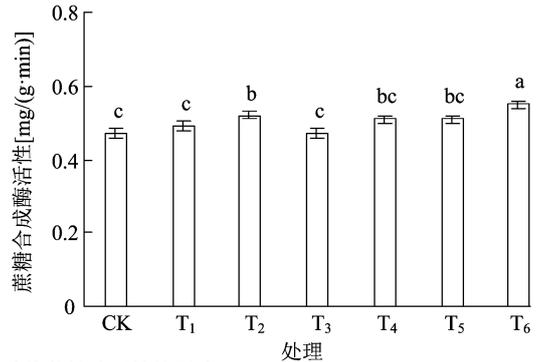


图2 不同施肥处理对叶片蔗糖酶活性的影响

2.3 化肥与有机肥及土壤改良基质配施对小麦产量及构成因子的影响

由表4可知, 与CK处理相比, T_2 、 T_4 、 T_5 、 T_6 处理的穗数较CK处理分别显著提高9.14%、12.39%、11.52%、17.38%, T_1 、 T_3 处理的穗数与CK无显著性差异。 T_6 处理的穗粒数较CK处理显著提高6.36%, 其他施肥处理与CK处理均无显著性差异。不同施肥处理的千粒质量较CK分别提高1.59% ~ 19.54%, 除 T_3 处理与CK无显著差异外, 其他施肥处理千粒质量均显著提高。不同施肥处理

的小麦籽粒产量较CK处理分别显著提高11.72% ~ 46.66%。对比不同施肥处理可知, T_3 处理的穗数、穗粒数、千粒质量以及籽粒产量均最低, 其中穗数显著低于 T_4 、 T_5 、 T_6 处理, 穗粒数显著低于 T_6 处理, 千粒质量、籽粒产量均显著低于 T_5 、 T_6 处理, 但与 T_1 处理相比均无显著性差异。 T_6 处理的穗数、穗粒数、千粒质量以及籽粒产量均最高, 其中穗数较 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 处理分别显著提高12.42%、7.55%、12.52%、5.26%, 千粒质量、籽粒产量较其他施肥处理分别显著提高5.48% ~ 17.67%、11.12% ~ 31.28%。

表4 不同施肥处理对小麦产量及构成因子的影响

处理	穗数 (万个/hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	千粒质量 (g)	籽粒产量 (kg/hm ²)	较CK增产率 (%)
CK	426.53 ± 26.65d	35.68 ± 1.85b	49.08 ± 3.62d	7 396.99 ± 234.62e	—
T ₁	445.36 ± 21.16cd	36.66 ± 1.62ab	52.26 ± 2.91c	8 496.57 ± 349.52c	14.87
T ₂	465.52 ± 28.47bc	37.43 ± 2.29ab	54.65 ± 4.06bc	9 499.36 ± 473.60bc	28.42
T ₃	444.97 ± 29.33cd	36.15 ± 2.49ab	49.86 ± 5.36cd	8 263.65 ± 526.30c	11.72
T ₄	479.36 ± 19.85ab	37.22 ± 2.31ab	54.48 ± 4.37bc	9 569.25 ± 682.26bc	29.37
T ₅	475.65 ± 24.16b	37.19 ± 3.27ab	55.62 ± 3.55b	9 762.49 ± 345.92b	31.98
T ₆	500.68 ± 20.01a	37.95 ± 3.41a	58.67 ± 3.49a	10 848.56 ± 590.35a	46.66

2.4 土壤养分含量、酶活性与小麦产量及叶片生理特性的相关性分析

由表5可知, 小麦籽粒产量与土壤碱解氮含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数为0.92; 与土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性呈显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数分别为0.88、0.82、0.85。旗叶SPAD值与蔗糖酶活性呈显著正相关, 相关系数为0.81; 旗叶光合速率与土壤碱解氮含量、脲酶活性呈显著正相关, 相关系数分别为0.89、0.83; 蔗糖

磷酸合成酶活性与土壤速效磷含量、碱性磷酸酶活性呈显著正相关, 相关系数分别为0.85、0.88, 与土壤蔗糖酶含量呈极显著正相关, 相关系数为0.92; 蔗糖合成酶与土壤碱性磷酸酶活性呈显著正相关, 相关系数为0.83, 与土壤蔗糖酶呈极显著正相关, 相关系数为0.91。由此可知, 土壤养分含量、酶活性的提高对小麦生理代谢及产量的提高具有明显的促进作用。

表 5 土壤养分部分指标、酶活性与小麦产量及叶片生理特性的相关性分析

指标	相关系数						
	碱解氮含量	速效磷含量	速效钾含量	脲酶活性	碱性磷酸酶活性	过氧化氢酶活性	蔗糖酶活性
籽粒产量	0.92 **	0.71	0.79	0.88 *	0.82 *	0.39	0.85 *
SPAD 值	0.76	0.62	0.69	0.75	0.77	0.59	0.81 *
光合速率	0.89 *	0.74	0.72	0.83 *	0.75	0.46	0.71
RUBP 羧化酶活性	0.69	0.45	0.61	0.72	0.57	0.48	0.76
蔗糖磷酸合成酶活性	0.69	0.85 *	0.69	0.73	0.88 *	0.32	0.92 **
蔗糖合成酶活性	0.71	0.75	0.72	0.68	0.83 *	0.49	0.91 **

注：*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

3 讨论与结论

土壤养分含量与酶活性是评价土壤肥力的重要指标,而土壤养分含量与酶活性变化对农作物不同施肥措施有不同的响应^[26-27]。张小莉等研究表明,有机无机肥配施能够促进土壤中有益菌的生长,改善土壤供肥特性,提高供肥效率,从而提高了土壤养分含量^[28]。陈贵等研究表明,当有机肥施肥量长期过大时,有机肥富含的土壤养分超过作物利用的浓度范围,肥料利用率会明显降低^[29]。本试验结果显示,与 CK 处理相比,不同施肥处理均能够不同程度地提高土壤各样分含量以及土壤酶活性。与单施化肥相比,50% 化肥 + 50% 羊粪处理的土壤有机质含量以及土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶活性显著升高,而 50% 化肥 + 50% 生物有机肥 + 土壤改良基质处理能够显著提高土壤养分含量与酶活性(速效磷含量及过氧化氢酶活性除外)。分析认为,羊粪中含有大量的腐生有机质,施入土壤中能够迅速提高土壤中的有机质含量,但其他氮磷钾含量较低,50% 化肥 + 50% 羊粪处理有可能是化肥减量过多,不足以供应小麦生长所需养分,使得除有机质以外的其他养分含量降低,进而影响土壤酶活性。而化肥与生物有机肥及土壤改良基质配施能够优先降解腐熟的有机物料,释放养分的同时能够通过刺激有机质分解菌群与促进有机质分解酶活性,出现了激发效应^[30],因此能够短时间提高土壤速效养分含量,且土壤改良基质能够使土壤变得松软,增加土壤孔隙度,能够有效缓解化肥导致的土壤板结,进而提高土壤养分供应效率。

光合作用是植物生长发育的重要进程之一,能够将无机物转化为有机物,从而对植物生长发育产生重要作用^[31-32]。小麦籽粒产量主要来源于叶片的光合产物,在小麦的生长发育进程中,土壤养分

通过对小麦叶绿素含量、酶活性和光合器官结构的影响而直接影响叶片的光合作用,从而影响小麦生长发育,反过来光合作用的削弱间接地影响 CO₂ 同化以及光合产物积累^[33],最终影响小麦籽粒产量。因此,通过探究小麦叶片光合特性的变化特点,可反映出小麦的生长进程。李婉茹等研究表明,适当的有机肥配施能够提高叶片 SPAD 值及光合特性^[34]。本研究表明,与不施肥或单施化肥相比,化肥与生物有机肥及土壤改良基质配施能够显著提高小麦旗叶的 SPAD 值、光合速率、蒸腾速率、气孔导度以及 RuBP 羧化酶、蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶活性,降低胞间 CO₂ 浓度,且显著提高小麦籽粒产量;而 50% 化肥 + 50% 羊粪处理组合的叶片 RuBP 羧化酶活性较单施化肥显著降低,其他指标均无显著性变化,分析认为,可能是化肥减量过多,除有机质含量增加外,其余含量均不同程度下降,影响土壤养分供需平衡,进而影响到小麦功能叶片旗叶的生理代谢^[35]。化肥与生物有机肥及土壤改良基质配施能够显著提高叶片的光合特性及生理代谢,可能是在该条件下,根系对水、肥的吸收均衡,有利于旗叶光合色素总量增加,增强对外界 CO₂ 的捕获能力,从而促进光合作用强度上升,促进碳同化,实现光合产物的积累^[35]。而化肥与生物有机肥配施处理的光合特性及生理代谢显著弱于化肥与生物有机肥及土壤改良基质配施处理,原因可能是土壤改良基质能够增加土壤孔隙度,增强了土壤养分供应能力,促进功能叶片的发育,使得化肥与生物有机肥及土壤改良基质配施处理明显优于化肥与生物有机肥配施处理。

土壤养分含量、酶活性与小麦产量及叶片生理特性的相关性分析表明,小麦生长发育与土壤养分转化紧密相关,因此,合理的化肥减量与有机肥配施,不仅不会造成小麦产量降低,反而减少了化肥

的投入量及有害元素在土壤中的累积,促进了土壤养分均衡发展,改善了土壤质量状况,提高了土地生产力。但化肥和不同有机肥配施对小麦品质的影响、田间配施的长期效应尚不明确,以及不同土壤类型下化肥与不同有机肥的配施比例是否存在差异也需进一步研究。总之,从施肥2年结果来看,50%化肥+50%生物有机肥+土壤改良基质配施处理效果最好,能够有效改善土壤理化性质,提高土壤酶活性,促进小麦生长发育,提高小麦籽粒产量。

参考文献:

[1] 茹振钢,冯素伟,李 滢. 黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3388-3393.

[2] 罗 珂. 不同施肥条件下植物对矿山废弃地土壤肥力改良的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.

[3] 舒秀丽,赵 柳,孙学振,等. 不同土壤改良剂处理对连作西洋参根际微生物数量、土壤酶活性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(6):1289-1294.

[4] 王金平. 氮肥减施对麦玉复种体系作物生长及周年生产力的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.

[5] 王俊红,王星琳,王 康,等. 生物有机肥替代化肥对小麦根际土壤环境的影响[J]. 华北农学报,2021,36(4):155-162.

[6] 姜莉莉,王开运,武玉国,等. 施用生物有机肥对番茄果实品质及土壤生物学特性的影响[J]. 华北农学报,2020,35(6):141-147.

[7] 胡 诚,刘东海,乔 艳,等. 施用生物有机肥对土壤酶活性及作物产量的影响[J]. 华北农学报,2017,32(增刊1):308-312.

[8] 曹 丹,宗良纲,肖 峻,等. 生物肥对有机黄瓜生长及土壤生物学特性的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(10):2587-2592.

[9] 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.

[10] 刘明月,张凯鸣,毛 伟,等. 有机肥长期等氮替代无机肥对稻麦产量及土壤肥力的影响[J]. 华北农学报,2021,36(3):133-141.

[11] 陶 磊,褚贵新,刘 涛,等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报,2014,34(21):6137-6146.

[12] 陈修斌,杨 彬,许耀照,等. 有机无机肥配施对温室辣椒生理特性与产量品质的影响[J]. 浙江农业科学,2019,60(2):220-223.

[13] 蒋东来,王晓玮,赵铭钦. 生物炭与不同肥料配施对汞胁迫下烤烟生长和生理指标的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2018,39(4):106-111,118.

[14] 高菊生,黄 晶,董春华,等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报,2014,51(2):314-324.

[15] 刘红江,陈虞雯,孙国峰,等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(2):405-412.

[16] 于昕阳,翟丙年,金忠宇,等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产

量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(5):320-324.

[17] 黄志浩,曹国军,耿玉辉,等. 有机肥部分替代氮肥土壤硝态氮动态变化特征及玉米产量效应研究[J]. 玉米科学,2019,27(1):151-158.

[18] 梁元振,赵京考,吴德亮,等. 秋施有机肥对土壤生物学、理化性状及玉米产量的影响[J]. 水土保持研究,2017,24(3):113-118.

[19] 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.

[20] 胡 雷,王长庭,王根绪,等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J]. 草业学报,2014,23(3):8-19.

[21] 索南吉. 青藏高原东缘土壤酶活性空间格局变化及对干扰的响应研究[D]. 兰州:兰州大学,2012.

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2018.

[23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[24] 陈传晓,董志强,高 娇,等. 不同积温对春玉米灌浆期叶片光合性能的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(6):1593-1600.

[25] 李 丽. 冬小麦灌浆期非结构性碳水化合物积累转运对干旱胁迫的生理响应[D]. 兰州:甘肃农业大学,2013.

[26] 肖 琼,王齐齐,邬 磊,等. 施肥对中国农田土壤微生物群落结构与酶活性影响的整合分析[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(6):1598-1609.

[27] 张桂玲. 秸秆和生草覆盖对桃园土壤养分含量、微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报,2011,35(12):1236-1244.

[28] 张小莉,孟 琳,王秋君,等. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(3):624-630.

[29] 陈 贵,赵国华,张红梅,等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2017(1):92-97.

[30] Bao Y Y, Dolfing J, Wang B Z, et al. Bacterial communities involved directly or indirectly in the anaerobic degradation of cellulose[J]. Biology and Fertility of Soils,2019,55(3):201-211.

[31] 张树衡,丁德东,何 静,等. 两种生物肥料配施对再植花椒生长及光合特性的影响[J]. 西北农业学报,2021,30(9):1355-1364.

[32] 吕广德,殷复伟,王 超,等. 不同播种量对小麦秦杂麦33干物质积累转运、旗叶光合特性及产量构成的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(1):16-28.

[33] 康彩睿,谢军红,李玲玲,等. 培肥方式对陇中旱农区玉米光合特性和产量的影响[J]. 玉米科学,2021,29(5):113-120.

[34] 李婉茹,郭延亮,王恩煜,等. 优化施肥配施蚯蚓粪有机肥对薄皮甜瓜产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜,2021,34(10):67-73.

[35] 霍昭光,孙志浩,邢雪霞,等. 北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(9):1317-1325.