

玉米深松分层施肥和小麦限水灌溉对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响

张江伟, 李慧, 柴晓甜, 赵帅, 李莉威, 张斯佳, 贾丽娟, 张建恒, 王贵彦

(河北农业大学农学院, 华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北保定 071000)

摘要: 小麦—玉米两熟为华北平原主要种植制度, 以玉米季深松分层施肥和常规施肥定位试验为基础, 研究小麦开花期土壤微生物量碳(SMBC)、微生物量氮(SMBN)及酶活性对玉米季不同施肥方式和小麦不同灌水处理的响应。以冬小麦开花期农田土壤为研究对象, 采用裂区试验设计, 玉米季常规施肥(F1)和深松分层施肥(F2)为主区, 小麦季 3 个灌溉处理为副区, 分别为春季不灌水(W0)、春 1 水(拔节期灌水 75 mm, W1)、春 2 水(拔节期和开花期灌水 150 mm, W2)。结果表明:(1)玉米季深松施肥有利于提高氮、磷、钾的供应, 改善土壤肥力, 对小麦开花期耕层土壤理化性状影响显著。0—20, 20—40 cm 土层, F2W2 处理土壤含水量和硝态氮含量显著高于其他处理, 含水量受深松施肥和灌水的共同影响, 而且互作效应显著; 硝态氮受水分处理影响显著大于深松施肥因素。(2)SMBC 和 SMBN 同时受深松施肥和灌水处理的共同影响, 小麦季灌水处理可显著提高 0—20 cm 土层 SMBC 和 SMBN 含量, 土壤含水量具有极显著影响($p < 0.05$), 贡献率为 78.3%; 20—40 cm 土层, 玉米季施肥方式和小麦季灌水处理对 SMBC 和 SMBN 含量均有显著影响, 且二者交互作用对 SMBN 影响显著, 土壤含水量贡献率为 86.3%。0—20 cm F2W2 处理 SMBN 含量为 94.16 mg/kg, 显著高于其他处理; 20—40 cm F2W2 处理 SMBN 和 SMBC 含量分别为 57.57, 243.77 mg/kg, 显著高于其他处理; SMBC 和 SMBN 与有机碳、速效钾和硝态氮含量呈显著正相关, 与土壤含水量呈极显著正相关。(3)玉米季相同施肥条件下, 0—20 cm 各处理土壤蔗糖酶、过氧化氢酶活性均表现为 W2>W1>W0, 且差异显著; 小麦季相同水分管理条件下, 0—20 cm 土层蔗糖酶、过氧化氢酶活性 F2 处理最高, 显著高于 F1; 0—20 cm 土层蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶与速效钾和速效磷呈显著正相关, 2 个土层土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性与土壤含水量呈显著或极显著正相关关系。(4)F2W2 处理小麦产量最高, 养分携出量较其他处理显著提高, 小麦产量和养分携出量与土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性和微生物量碳、氮含量均呈显著或极显著正相关。因此, 小麦季灌溉拔节水和开花水结合玉米季分层深松施肥管理措施可有效促进土壤养分活化, 提升土壤质量和保障土壤可持续生产。

关键词: 限水灌溉; 分层施肥; 土壤酶活性; 土壤微生物量碳; 土壤微生物量氮

中图分类号: S365; S154.36

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0346-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.042

Effects of Fertilization with Subsoiling of Maize and Limited Irrigation of Wheat on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Enzymes Activities

ZHANG Jiangwei, LI Hui, CHAI Xiaotian, ZHAO Shuai, LI Liwei,

ZHANG Sijia, JIA Lijuan, ZHANG Jianheng, WANG Guiyan

(College of Agronomy, Hebei Agricultural University, State Key

Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: Wheat-maize double cropping system is the main cropping system in North China Plain. The aims of the present study were to delineate the responses of soil microbial biomass N (SMBN), soil microbial biomass C (SMBC) and enzymes activities to different fertilization methods of maize and limited irrigation treatments of wheat. The split plot experiment design was adopted on the field experiment. The main control was fertilization methods of maize, F1 (conventional method, 5cm depth of subsoil with sowing) and F2 (application N, P, K fertilizers to designated different soil depth with subsoiling), and the sub-control was

收稿日期: 2021-12-12

资助项目: “十三五”国家粮食丰产增效科技创新专项(2018YFD0300504)

第一作者: 张江伟(1994—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事节水种植制度研究。E-mail: 1486141089@qq.com

通信作者: 王贵彦(1971—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事集约持续农作制度研究。E-mail: wanggy@hebau.edu.cn

张建恒(1970—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事农业生态环境研究。E-mail: nxzyjh@hebau.edu.cn

three irrigation treatments in the growing season of wheat, W0 (no irrigation events after the overwintering stage), W1 (irrigation at the jointing stage after overwintering), and W2 (irrigation at jointing and flowering stages after overwintering). The results showed that: (1) Subsoiling fertilization in maize season was beneficial to increase the supply of N, P and K, improve soil fertility, and significantly affected the physical and chemical properties of topsoil in wheat flowering stage. In 0—20 cm and 20—40 cm soil layers, soil moisture content and nitrate nitrogen content of F2W2 treatment were significantly higher than those of other treatments. Soil water content was affected by F2 and limited irrigation of wheat, and the interaction effect was significant ($p < 0.05$). The effect of water treatment on nitrate nitrogen was significantly greater than that of subsoil fertilization. (2) SMBC and SMBN were not only affected by fertilization of F2, but also limited irrigation of wheat. Irrigation in wheat growing season significantly increased the contents of SMBC and SMBN in 0—20 cm soil layer, and soil water content had a significant effect, contributing 78.3%. In 20—40 cm soil layer, the content of SMBC and SMBN were significantly affected by fertilization methods in maize season and limited irrigation treatment in wheat season, and their interaction had significant effects on the content of SMBN. The soil water content had significantly effect on the SMBN, contributing 88.9%. The SMBN content of 0—20 cm under F2W2 was 94.16 mg/kg, which was significantly higher than that of other treatments ($p < 0.05$). The SMBN and SMBC contents of 20—40 cm under F2W2 were 57.57 mg/kg and 243.77 mg/kg, respectively, which were significantly higher than those of other treatments. SMBC and SMBN were positively correlated with organic carbon, available potassium and nitrate nitrogen, and had a significantly positive correlated with soil water content. (3) The activities of soil sucrase and catalase in 0—20 cm under W2 was the highest, following by W1 and W0, and the differences between different water treatments were significant. Under the same water management condition in wheat season, the activities of sucrase and catalase in 0—20 cm soil layer were the highest under F2, which were significantly higher than that of F1. The activities of soil sucrase, alkaline phosphatase and catalase were positively correlated with the available K and available P in 0—20 cm soil layer, while soil sucrase, urease and catalase activities were positively correlated with soil water content in 0—40 cm soil layer. (4) The yield of wheat under F2W2 was the highest, and the differences in uptake of total N, P and K were significantly compared with other treatments. The yield and the uptake of N, P and K were significantly positively correlated with the activities of sucrase, urease and catalase, and the contents of SMBC and SMBN. Therefore, irrigation at jointing and flowering stages of wheat combined with maize fertilization with subsoiling could effectively accelerate soil nutrient activation, improve soil quality and ensure sustainable of soil production.

Keywords: limited irrigation; layered fertilization; soil enzyme activity; soil microbial biomass C; soil microbial biomass N

土壤微生物生物量作为土壤有机质中最为活跃的组分,对土壤环境变化非常敏感,能够及时反映土壤质量变化^[1]。土壤酶作为土壤生物活性及土壤肥力的重要组成部分,其活性决定土壤中各种生化反应过程的强度和方向^[2]。土壤微生物生物量与土壤酶活性较其他土壤性质更快速地响应水肥管理、种植模式以及土地利用方式带来的变化。因此,近年来将土壤微生物生物量、土壤酶活性作为土壤健康的生物指标来指导农田水肥管理^[3-4]。华北平原作为我国重要的粮食生产区域,常年种植模式为冬小麦—夏玉米复种连作,耕作方式常年采用旋耕,但由于长期旋耕、过量施肥和大量灌水等不合理的田间管理措施,直接影响农田耕层结构和土壤理化性质,导致农田土壤结构

退化,土壤养分库容减少和水分利用效率低下,从而改变土壤的微环境,间接影响土壤微生物量和酶的活性。因此,合理的灌溉、施肥和耕作在小麦、玉米粮食生产中的重要性日益凸显。薛丽华等^[5]于2008年开展田间定位试验研究发现,随着春季灌水量增加,土壤酶活性均显著提高;亦有研究^[6]表明,在相同施肥水平下,水分亏缺会限制肥料对微生物量的增加效应,充分灌溉较水分亏缺可有效提高土壤微生物量碳、氮;陈聪聪^[7]研究发现,深松分层施肥有利于打破犁底层,改善土壤结构,增加土壤的水分和养分,为土壤微生物的生长、繁殖提供适宜的环境,进而提高土壤微生物生物量碳、氮含量。在作物施肥相关研究中,侯化亭等^[8]通过田间试验得出土壤微生物生物量

碳、氮含量随着施肥量的增加而增加;Ju 等^[9]采用 N¹⁵ 同位素示踪的方法研究发现,施氮量的增加提高土壤肥料氮残留。此外,王平等^[10]、程宪国等^[11]研究表明,玉米季追施氮肥有效促进下茬小麦产量和氮素利用效率的提高,同时证明养分的携出量在一定程度上能够更好地反映土壤的养分供应能力。因此,本研究综合比较分析玉米季不同施肥方式和小麦季不同灌水水平对小麦开花期土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响,对改善土壤微环境具有重要意义。

目前关于冬小麦土壤微生物生物量及土壤酶活性的研究大多集中于统一灌水和氮素作用下的结果,而玉米季深松施肥和冬小麦限水灌溉条件下土壤微生物生物量及土壤酶活性的研究相对较少。因此,本研究以冬小麦开花期土壤为研究对象,通过设置小麦季不同灌水处理,分析玉米季深松分层施肥对小麦开花期土壤耕层微生物生物量和酶活性的影响,为本区域冬小麦限水灌溉条件下促进土壤养分活化、提升土壤质量提供科学理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验设在邯郸市曲周县第四疃镇李庄村(36°86'N, 115°02'E)进行,该区属暖温带大陆性半干旱季风气候,小麦生育期间平均温度 8.6 °C,降水量 160 mm,光照时间 1 396.6 h;试验地土质为壤土,土壤容重 1.44 g/cm³,0—20 cm 土层有机质含量 18.61 g/kg,全氮含量 0.94 g/kg,速效磷含量 11.61 mg/kg,速效钾含量 137.6 mg/kg,pH 7.21。前茬作物为夏玉米,收获后秸秆粉碎还田。

1.2 试验设计

玉米季深松分层施肥试验开始于 2018 年,设置常规施肥方式(F1),肥料类型为复合型速效肥,结合播种进行底施,施肥深度 5 cm;分层施肥方式(F2),氮肥类型为缓释尿素,控释期为 60 天,磷钾肥全部施于土壤 20—30 cm 处,氮肥按照 5:5 的比例分别施于 5—15 cm 与 20—30 cm 土层土壤。施肥量为 N 210 kg/hm²,P₂O₅ 120 kg/hm²,K₂O 150 kg/hm²,其他管理措施与常规高产农田相同。小麦季采用双因素裂区设计,玉米季施肥方式为主区,小麦春季灌水处理为副区。小麦季施肥量为 N 210 kg/hm²,P₂O₅ 150 kg/hm²,K₂O 90 kg/hm²,氮肥基追比为 5:5,磷钾肥做基肥播前一次施用;灌水处理设春季不灌水(W0)、拔节期灌溉(W1)75 mm、拔节和开花期灌溉(W2)各灌溉 75 mm,重复 3 次,共 18 个小区,小区面积 120 m²(8 m×15 m)。2020 年 10 月 20 日播种,行距 15 cm,播量 225 kg/hm²。为保证出苗及越冬,

所有处理灌越冬水 75 mm,其他管理措施同高产田。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 取样时期与方法 于小麦开花期用直径 5 cm 的土钻在各小区小麦行间分 0—20,20—40 cm 取耕层土壤,所取土样立即放到冰盒中带回实验室。样品去除植物残体及根系,分成 3 部分:一部分采用烘干法测定土壤水分;另一部分过 2 mm 筛,放入 4 °C 冰箱内保存,用于微生物量碳、氮、酶活性和铵态氮、硝态氮测定;最后一部分风干后过 0.15 mm 筛,用于测定土壤养分。收获期各小区测定实际产量,同时采集作物样品,用于测定籽粒和植株养分。

1.3.2 测定方法

(1)土壤微生物生物量碳氮(SMBC 和 SMBN):采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L K₂SO₄ 提取法,浸提后利用碳氮联合分析仪测定。

(2)土壤酶活性:土壤酶活性指标包括蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性,测定方法参照关松荫^[12]的《土壤酶及其研究法》;土壤有机碳(TOC)采用重铬酸钾容量法—外加热法进行测定;土壤硝态氮和铵态氮采用自动流动分析仪进行测定;速效磷用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾用 1 mol/L NH₄OAc 浸提—火焰光度计法测定;植物全氮用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—自动流动分析仪进行测定;植物全磷用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—钒钼黄比色法测定;植物全钾用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮—火焰光度计法测定^[13]。

1.4 数据处理与分析

数据采用 Microsoft Excel 2010 进行处理和绘图,采用 SPSS 25.0 进行显著性差异分析,用 Canoco 5.0 软件对微生物生物量碳、氮与土壤环境因子进行 RDA 冗余分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 玉米季深松施肥对小麦限水灌溉条件下土壤理化性质的影响

由表 1 可知,不同处理的土壤理化性质在不同土层存在显著差异($p < 0.05$),且玉米季不同施肥模式×小麦季不同灌水水平的交互作用对各土层土壤含水量有显著影响,对硝态氮、速效钾和速效磷含量有极显著影响($p < 0.01$),对铵态氮无显著影响,而且 0—20,20—40 cm 土层土壤有机碳含量影响结果不一致。在玉米季同一施肥方式下,各土层土壤含水量表现为 W2 处理显著高于 W0 和 W1,在小麦季同一灌水水平下,0—20,20—40 cm 土层土壤含水量均表现为 F2>F1,且在 W2 和 W1 处理下 F2 显著高于 F1;在 0—20 cm 土层深度土壤有机碳含量均高于

20—40 cm 土层(除 F2W0 外),在玉米季同一施肥模式下,0—20 cm 土层土壤有机碳含量均表现为 W2>W1>W0,F2 处理下 W2 显著高于 W1 和 W0,W0 和 W1 处理差异不显著。在 20—40 cm 土层土壤有机碳含量总体表现为 F2W2 最高,显著高于其他处理;在小麦季同一灌水水平下,0—20 cm 土层土壤有机碳含量在 F1 和 F2 处理下差异均不显著,20—40 cm 土层,W2 处理下均以 F2 较高,显著高于 F1;F2W2 处理下土壤硝态氮和土壤速效钾在 0—20,20—40

cm 土层含量均最高,且土壤硝态氮含量显著高于其他处理;小麦季同一灌水处理,土壤速效磷含量各土层均表现为 F2>F1,显著高于 F1,且在 F2W1 处理含量最高,较 F2W2 和 F2W0 处理分别提高 11.66% 和 46.97%,原因可能是因为土壤含水量过高或过低均影响土壤化学性质,如 pH 和氧化还原电位等,进而影响土壤速效磷含量。综上所述,F2W2 处理可改善土壤理化性状,提高土壤肥力,进而改善农田土壤生态环境。

表 1 不同处理小麦开花期 0—20,20—40 cm 土壤理化性状

土层深度/cm	处理	体积含水量/%	有机碳/(g·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	
0—20	F1	W0	13.33±0.33e	9.22±0.08bc	2.87±0.53a	4.26±0.30e	148.03±0.32e	11.57±0.54e
	W1	16.67±0.33d	9.61±0.03abc	4.18±0.71a	10.40±0.25b	154.45±0.01c	19.43±0.49cd	
	W2	35.00±0.58b	10.46±0.06ab	4.29±0.32a	7.43±0.46c	153.12±0.32d	18.41±0.31d	
	F2	W0	15.00±0.58de	8.75±0.88c	3.44±0.31a	5.98±0.07d	155.56±0.03b	21.49±0.73bc
	W1	20.00±1.16c	9.11±0.57bc	3.48±0.34a	5.03±0.03e	155.77±0.20b	25.48±0.48a	
	W2	41.33±4.27a	10.71±0.14a	4.48±0.56a	12.03±0.10a	156.51±0.19a	22.82±1.33b	
	F 值	48.2**	0.5ns	0.003ns	2.3ns	528.5**	131.3**	
20—40	F1	W	74.0**	7.4**	3.3ns	168.5**	142.4**	34.9**
	F×W	6.3*	0.5ns	0.9ns	207.9**	106.0**	7.6**	
	W0	15.00±2.08e	8.35±0.03cd	3.39±0.37a	7.62±0.23b	135.71±0.28b	5.76±0.40b	
	W1	19.00±0.58d	8.61±0.03c	2.96±0.36a	4.03±0.25c	132.38±0.90c	3.40±0.26c	
	W2	30.33±1.45b	7.99±0.16de	3.52±0.64a	3.41±0.37c	96.33±0.45e	4.01±0.24c	
	F2	W0	18.00±1.00de	9.10±0.07b	3.55±0.28a	3.41±0.41c	115.67±2.13d	7.63±0.40a
	W1	26.33±0.88c	7.91±0.02e	4.01±0.30a	3.43±0.08c	148.89±0.39a	7.76±0.37a	
F2	W2	41.67±0.67a	10.13±0.24a	3.07±0.29a	8.92±0.77a	149.02±0.37a	5.28±0.26b	
	F 值	52.2**	54.3**	0.6ns	0.4ns	407.2**	86.9**	
	W	132.5**	22.3**	0.1ns	18.7**	187.0**	19.6**	
	F×W	5.8*	68.9**	1.8ns	70.9**	668.2**	12.4**	

注:表中数据为平均值±标准误;不同土层深度同一列处理间不同字母表示不同水肥管理间差异显著($p<0.05$);* 和 ** 表示处理间在 0.05,0.01 上存在显著差异;ns 表示处理间无显著差异。F1 为常规施肥处理;F2 为分层施肥;W0 为春季不灌水;W1 为拔节水(灌 1 水);W2 为拔节水+开花水(灌 2 水)。下同。

2.2 不同处理对土壤微生物量碳、氮含量的影响

2.2.1 不同处理对土壤微生物量碳含量的影响

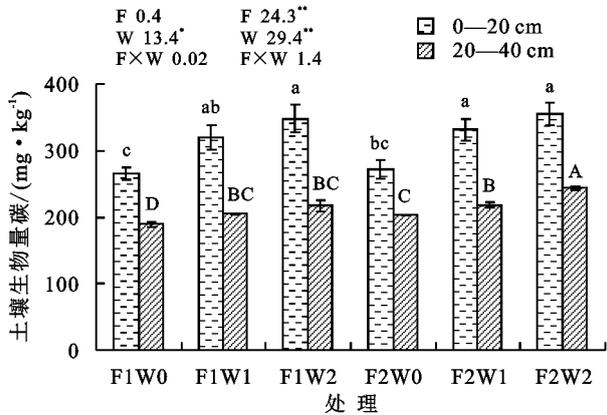
从图 1 可以看出,玉米季不同施肥方式和小麦季不同灌水水平下小麦 SMBC 含量在各土层存在显著差异($p<0.05$)。0—20 cm 土层,与不同施肥模式相比,小麦季不同灌水水平显著影响 SMBC,但无明显的交互影响;20—40 cm 土层,两处理因素对 SMBC 含量均有显著影响,但交互作用不显著。0—20 cm 土层中 SMBC 含量变化范围为 266.06~355.12 mg/kg,20—40 cm 土层中变化范围为 189.38~243.77 mg/kg。不同处理中,SMBC 含量在 0—20,20—40 cm 土层深度表现为 W2>W1>W0。F1 处理,0—20,20—40 cm 土层均表现为 W2 和 W1 显著高于 W0,W2 和 W1 差异不显著;F2 处理,0—20 cm 土层 W1 和 W2 差异不显著,但显著高于 W0;20—40 cm 土层 W2、W1 与 W0 差异显著。在小麦季同一灌水水平下,0—20,

20—40 cm 土层均表现为 F2>F1,0—20 cm 土层差异均不显著;20—40 cm 土层 W0 和 W2 灌水处理下,F2 处理显著高于 F1。其原因可能是深松分层施肥改善土壤理化性状,为土壤微生物的生长、繁殖提供适宜的环境,进而提高 SMBC 含量。

2.2.2 不同处理对土壤微生物量氮含量的影响

从图 2 可以看出,玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水水平对麦田 SMBN 含量在不同土层均有显著性差异($p<0.05$),且玉米季不同施肥模式×小麦季不同灌水水平的交互作用对 0—20 cm 土层 SMBN 含量有显著影响。0—20,20—40 cm 土层中 SMBN 含量变化范围分别为 51.27~94.16,34.83~57.57 mg/kg。玉米季同一施肥模式下,SMBN 含量在 0—20,20—40 cm 土层表现为 W2>W1>W0。在小麦季同一灌水水平下,F2 处理 0—20 cm 土壤 MBN 含量显著高于 F1 处理;20—40 cm 土层,除 W0 处理无显著性差异外,W1 和

W2 处理下, F2 均显著高于 F1。整体而言, 0—20, 20—40 cm 土层 SMBN 含量在 F2W2 处理达到最高, 显著高于其他处理。由此可知, 玉米季深松分层施肥和小麦季灌水水平下有利于提高 SMBN 含量。



注: 图中不同字母表示不同土层深度同一列处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 玉米季不同施肥模式和小麦限水灌溉条件下土壤微生物量碳含量

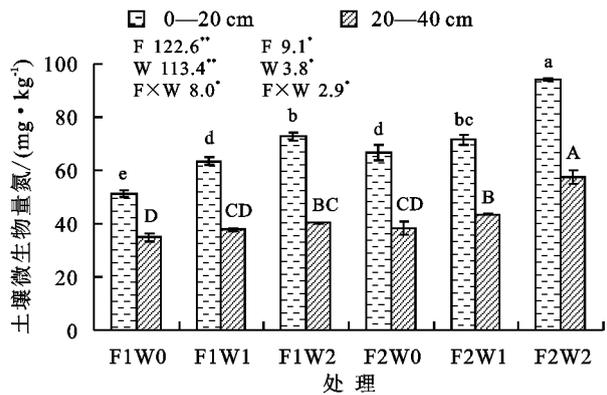


图 2 玉米季不同施肥模式和小麦限水灌溉条件下土壤微生物量氮含量

2.3 玉米季深松施肥对小麦限水灌溉条件下土壤酶活性的影响

2.3.1 玉米季深松施肥对小麦限水灌溉条件下土壤蔗糖酶活性的影响 由图 3 可知, 玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水水平对土壤蔗糖酶活性在不同土层均有显著性差异, 但二者交互作用对各土层土壤蔗糖酶无显著影响 ($p < 0.05$), 各处理均表现为 0—20 cm 较高。在玉米季相同施肥条件下, 各土层均表现为 $W2 > W1 > W0$; 0—20 cm 土层, F1 施肥方式下, W2 处理分别比 W1、W0 处理提高 9.33% 和 29.09%; F2 施肥方式下, W2 较 W1 和 W0 处理分别提高 8.15% 和 31.20%。整体而言, F2W2 处理最高, 而且显著高于其他处理。小麦季相同水分处理下, 0—20 cm 土层 F2 处理较 F1 分别提高 10.14% (W0), 13.16% (W1) 和 11.94% (W2), 差异达显著水平; 20—40 cm 土层, F1 和 F2 处理下 W2 和 W1 均显著高于 W0, F2W2 处理土壤蔗糖酶活性较 F1W2 提高 24.88%, 差异显

著。综上表明, 与常规施肥相比, 玉米季深松分层施肥能显著提高蔗糖酶活性; 与水分胁迫 (W0) 相比, 充分灌水可大幅度提高土壤蔗糖酶活性。

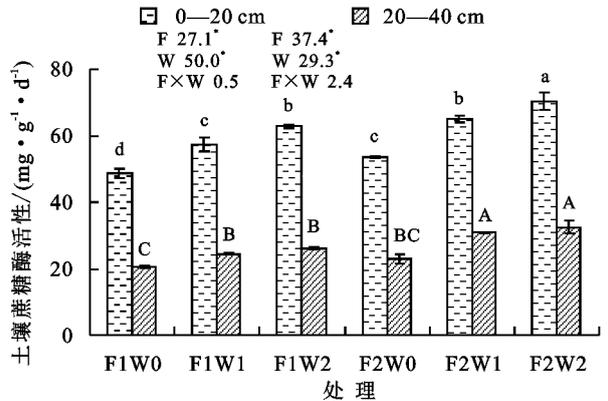


图 3 玉米季不同施肥模式和小麦限水灌溉条件下土壤蔗糖酶活性

2.3.2 玉米季深松施肥对小麦限水灌溉条件下土壤脲酶活性的影响 从图 4 可以看出, 土壤脲酶活性在玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水水平下存在显著差异 ($p < 0.05$)。0—20 cm 土层, 与玉米季不同施肥模式相比, 小麦季不同灌水水平显著影响脲酶活性, 但无明显的交互影响; 20—40 cm 土层, 2 个处理对脲酶均有显著影响, 但交互作用不显著。玉米季相同施肥条件下, 0—20, 20—40 cm 土层均表现为 $W2 > W1 > W0$, 且在 F2 处理下, W2 和 W1 较 W0 处理分别提高 36.29%, 11.28% (0—20 cm) 和 29.14%, 8.16% (20—40 cm), 差异达显著水平; 在小麦季相同水分管理条件下, 0—20 cm 土层 W0 处理深松施肥低于常规施肥处理, 原因可能是水分亏缺导致植物根系活力降低, 进而引起植物根系分泌的各类生物量减少, 从而抑制土壤脲酶活性。W1 和 W2 处理均表现为 $F2 > F1$, 但差异不显著; 20—40 cm 土层所有灌水处理下均没有显著差异。

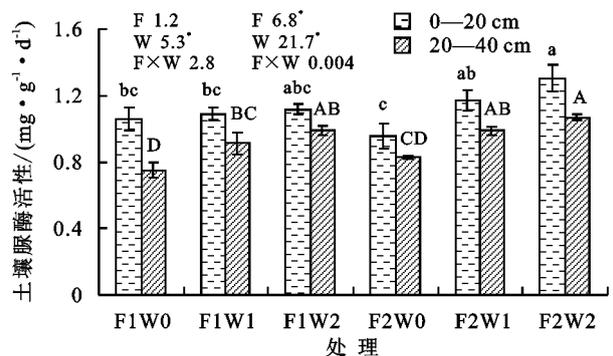


图 4 玉米季不同施肥模式和小麦限水灌溉条件下土壤脲酶活性

2.3.3 玉米季深松施肥对小麦限水灌溉条件下土壤碱性磷酸酶的影响 从图 5 可以看出, 0—20, 20—40 cm 土层玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水处理对土壤碱性磷酸酶活性均有显著影响, 但只在

0—20 cm 存在显著的交互作用 ($p < 0.05$)。玉米季相同施肥处理,0—20 cm 土层,土壤碱性磷酸酶活性变化范围为 37.11~64.53 nmol/(g·h),且在 F2W1 处理显著高于其他处理;F1 施肥方式下,W2 和 W1 处理下土壤碱性磷酸酶活性较 W0 分别提高 48.55% 和 37.69%,差异显著;F2 施肥方式下,W1 较 W2、W0 显著提高 21.82% 和 31.16%;20—40 cm 土层 F1 和 F2 施肥方式下,W2 和 W1 处理的土壤碱性磷酸酶活性分别较 W0 处理显著提高 84.76%,70.61% (F1) 和 46.64%,55.81% (F2);小麦季相同水管理条件下,0—20 cm 土层除 W2 处理外,F2 处理的土壤碱性磷酸酶活性显著高于 F1;20—40 cm 土层,W0 和 W1 灌水水平下,F2 处理显著高于 F1,F2W2 与 F1W2 无显著性差异。

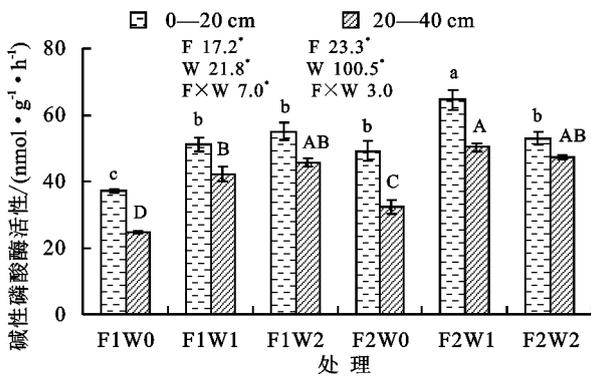


图 5 玉米季不同施肥模式和小麦限水灌溉条件下土壤碱性磷酸酶活性

2.3.4 玉米季深松施肥对小麦限水灌溉条件下土壤过氧化氢酶活性的影响 从图 6 可以看出,玉米季不同施肥模式、小麦季不同灌水水平和二者交互作用对各土层土壤过氧化氢酶有显著影响 ($p < 0.05$),而且 2 个土层土壤过氧化氢酶活性均为 F2W2 处理最高,显著高于其他处理。在玉米季相同施肥条件下,0—20,20—

40 cm 土层各处理土壤过氧化氢酶活性均表现为 $W2 > W1 > W0$,且差异达显著水平;在小麦季相同水管理条件下,各土层过氧化氢酶活性均在 F2 处理下达到最高,且显著高于 F1。综上所述,小麦开花期灌 2 水处理下,玉米季深松分层施肥相比于常规施肥更有利于土壤清除过氧化氢有害物质。

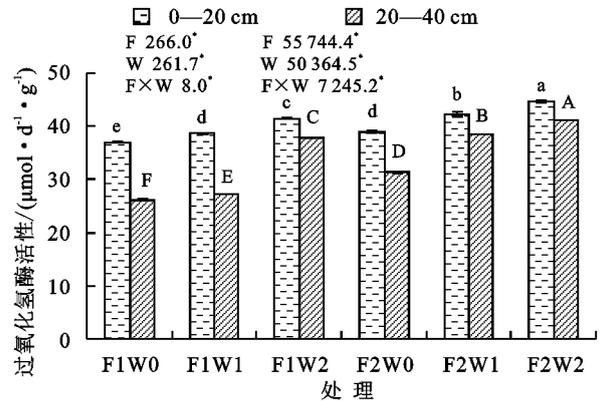


图 6 玉米季不同施肥模式和小麦限水灌溉条件下土壤过氧化氢酶活性

2.4 土壤酶活性与土壤理化性状的相关性

玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水水平下土壤酶活性与土壤各理化性状呈现出不同的相关关系(表 2)。0—20 cm 土层土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性与含水量、硝态氮、速效钾、速效磷呈显著或极显著的正相关关系,而与土壤铵态氮含量相关不显著;土壤脲酶与含水量和有机碳呈显著相关,与其余土壤环境因子无显著相关;土壤碱性磷酸酶活性与土壤速效钾、速效磷呈极显著正相关,与其余土壤环境因子无显著相关。20—40 cm 土层,4 种土壤酶活性与土壤含水量呈极显著相关,与其余土壤环境因子无显著相关。由此可见,土壤含水量是影响土壤酶活性变化的主要因素。

表 2 土壤理化性状与酶活性的相关系数

土层深度/cm	酶活性指标	含水量	铵态氮	硝态氮	速效钾	速效磷	有机碳
0—20	土壤蔗糖酶	0.794**	0.307	0.573*	0.682**	0.645**	0.452
	土壤脲酶	0.601*	0.446	0.372	0.189	0.311	0.608**
	土壤碱性磷酸酶	0.340	0.215	0.136	0.706**	0.778**	0.088
	土壤过氧化氢酶	0.842**	0.453	0.522*	0.687**	0.689**	0.504*
20—40	土壤蔗糖酶	0.791**	0.203	0.088	0.445	0.122	0.334
	土壤脲酶	0.828**	0.185	0.037	0.145	-0.205	0.242
	土壤碱性磷酸酶	0.688**	0.072	-0.231	0.168	-0.118	-0.001
	土壤过氧化氢酶	0.889**	0.155	0.072	0.110	0.160	0.233

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

2.5 土壤微生物生物量碳、氮与土壤理化性状的相关性

RDA 分析可以将样本和环境因子反映在同一个二维排序图上,可以直观看出样本分布和环境因子间的关

系。由表 3 可知,0—20,20—40 cm 土层土壤环境因子对土壤微生物量碳、氮方差解释率和贡献率大小排序分别为含水量>速效钾>铵态氮>有机碳>速效磷和含水量>速效钾>硝态氮>有机碳>铵态氮>速效磷。

进一步分析表明,0—20 cm 土层土壤理化性质对土壤微生物生物量碳氮累计解释率达 75.00%,其中第 1 轴解释率为 73.00%,第 2 轴解释率为 2.00%,土壤微生物量碳、氮与土壤含水量、铵态氮、硝态氮、速效钾、速效磷和有机碳含量均呈正相关;20—40 cm 土层,土壤环境因子对微生物生物量碳氮累计解释率高达 92.94%,第 1 轴解释率为 87.82%,第 2 轴解释率为 5.12%。土壤微生物量碳、氮与土壤含水量、有机碳、速效钾和硝态氮呈正相关,与速效磷和铵态氮呈负相关(图 7)。整体而言,0—20,20—40 cm 土层土壤含水量与微生物量碳、氮呈极显著正相关,其贡献率分别为 78.30%,86.30%。由此表明,土壤含水量是影响土壤微生物量碳、氮变化的主要因素。

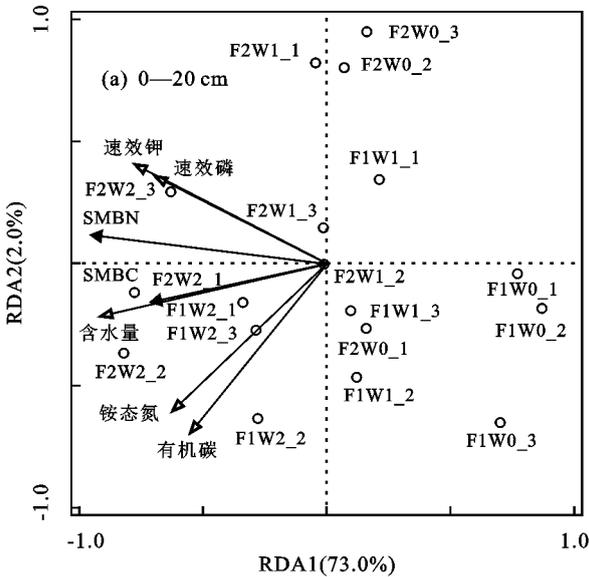


表 3 交互式正向选择分析结果

土层深度/cm	土壤理化性质	解释率/%	贡献率/%	F	p
0—20	含水量	58.8	78.3	22.8	0.002
	速效钾	14.2	19.0	7.9	0.002
	铵态氮	1.5	2.0	0.8	0.388
	有机碳	0.5	0.6	0.3	0.700
	速效磷	<0.1	<0.1	<0.1	0.982
20—40	含水量	80.2	86.3	64.8	0.002
	速效钾	4.0	4.3	3.8	0.028
	硝态氮	3.5	3.8	5.7	0.016
	铵态氮	2.0	2.1	2.0	0.156
	有机碳	2.8	3.0	3.3	0.064
	速效磷	0.4	0.5	0.7	0.512

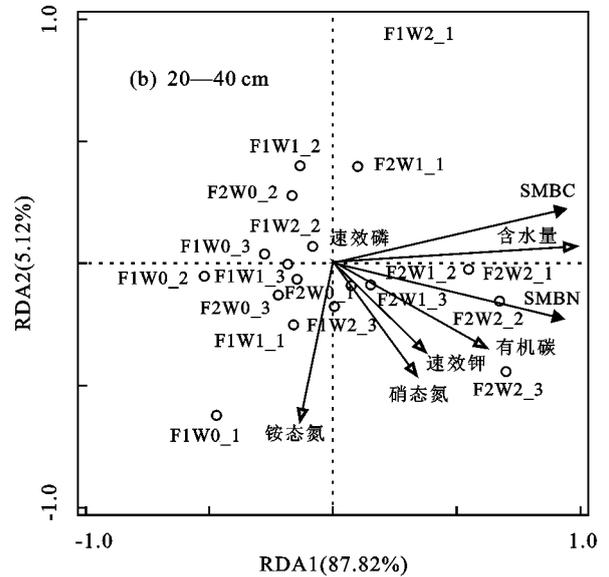


图 7 0—20,20—40 cm 土壤理化性质与土壤微生物生物量碳、氮的冗余分析

2.6 玉米季深松施肥和小麦限水灌溉对小麦产量和养分携出量的影响

由表 4 可知,不同处理对小麦产量和养分携出量均有显著性差异($p < 0.05$),且玉米季不同施肥模式×小麦季不同灌水水平的交互作用对籽粒氮素和茎叶等氮素携出量均有显著影响,对籽粒磷、钾素携出量有极显著影响($p < 0.01$),对小麦产量和茎叶磷、钾素携出量无显著影响。在玉米季同一施肥模式下,W2 处理小麦产量显著高于 W0,与 W1 差异不显著;小麦季同一灌水水平

下,F2 处理产量均高于 F1,但差异不显著;籽粒养分携出量和茎叶钾素携出量均在 F2W2 处理下达到最高,分别为 268.20,53.30,39.90,266.40 kg/hm²,显著高于其他处理。在玉米季同一施肥(F2)模式下,W2 处理下籽粒中养分携出量均显著高于 W1 和 W0,小麦季同一灌水(W2)水平下,F2 处理显著高于 F1;茎叶氮、磷素携出量在 F2W2 处理下最高,但与 F2W1 处理无显著差异。由此可见,F2W2 处理可显著提高小麦养分吸收能力,为获得高产提供保障。

表 4 不同处理条件下冬小麦养分携出量

单位:kg/hm²

处理	产量	籽粒养分携出量			茎叶养分携出量			
		N	P	K	N	P	K	
W0	7258.00c	148.10bc	15.30d	16.30c	20.20b	1.60d	79.90d	
F1	W1	8580.70bc	167.00bc	21.70cd	21.00bc	2.70c	132.00c	
	W2	10035.70ab	177.70b	24.20bc	23.30bc	28.00b	4.00b	148.30c
	W0	8025.10c	116.90c	16.00cd	16.60c	28.70b	3.50bc	129.70c
F2	W1	9786.20ab	181.70b	30.50b	27.20b	54.90a	5.80a	207.10b
	W2	10582.10a	268.20a	53.30a	39.90a	54.60a	6.10a	266.40a
	F 值	4.50*	3.00ns	34.60**	17.80**	74.20**	74.30**	59.80**
W	15.30**	13.50**	37.44**	23.00**	20.80**	30.90**	32.70**	
F×W	0.20ns	6.20*	14.90**	6.90**	6.60*	1.80ns	3.60ns	

注:表中茎叶包含茎、叶、穗轴和颖壳。

2.7 土壤微生物量碳氮和酶活性与小麦产量和养分携出量的相关性

不同处理小麦产量和养分携出量与土壤酶活性和微生物量碳、氮含量密切相关(表 5)。0—20 cm 土层小麦产量和养分携出量与土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性和微生物量碳、氮均呈显著或极显著正相

关,土壤碱性磷酸酶与籽粒中养分携出量呈正相关,但无显著差异;20—40 cm 土层,小麦产量和养分携出量与土壤酶活性和微生物量碳、氮均呈显著或极显著正相关。由此表明,有效的水分和施肥管理方式有利于形成土壤微生物量碳氮环境和提高相关土壤酶活性,从而促进养分释放和籽粒养分吸收。

表 5 产量和养分携出量与土壤微生物量碳氮以及酶活性的相关关系

土层深度/cm	指标	土壤养分	微生物量碳	微生物量氮	蔗糖酶	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	
0—20	产量		0.751**	0.757**	0.800**	0.551*	0.566*	0.813**	
	籽粒养分携出量	N	0.710**	0.756**	0.673**	0.707**	0.168	0.770**	
		P	0.656**	0.882**	0.789**	0.707**	0.314	0.888**	
		K	0.696**	0.864**	0.773**	0.724**	0.357	0.888**	
	茎叶养分携出量	N	0.540*	0.762**	0.728**	0.657**	0.644**	0.848**	
		P	0.570*	0.849**	0.849**	0.572*	0.707**	0.912**	
		K	0.640**	0.913**	0.813**	0.710**	0.585*	0.934**	
	20—40	产量		0.776**	0.608**	0.729**	0.772**	0.758**	0.805**
		籽粒养分携出量	N	0.724**	0.755**	0.637**	0.675**	0.534*	0.624**
P			0.844**	0.894**	0.786**	0.740**	0.621**	0.754**	
K			0.835**	0.845**	0.755**	0.731**	0.645**	0.757**	
茎叶养分携出量		N	0.728**	0.718**	0.804**	0.665**	0.687**	0.782**	
		P	0.817**	0.761**	0.848**	0.840**	0.781**	0.903**	
		K	0.857**	0.836**	0.825**	0.764**	0.735**	0.840**	

3 讨论

土壤作为植物生长发育和微生物生存重要的物质场所,其理化性质差异直接影响土壤健康状况、土壤酶活性和微生物群落结构^[14]。相关研究^[15]表明,不同土地管理方式显著影响土壤有机碳、氮的含量。本研究针对玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水水平对土壤理化性质的影响结果表明,0—20,20—40 cm 土层土壤含水量和硝态氮含量受灌水水平和施肥方式的共同影响,均表现为 F2W2 处理显著高于其他处理,在玉米季同一施肥条件下,麦田土壤含水量随着灌溉次数的增加而增加,这与燕鹏等^[16]的研究结果基本一致。此外,在 W2 灌水水平下,土壤有机碳含量整体显著提升。相关研究^[17-18]表明,水分胁迫通过影响植物根系分泌物形成以及植物光合产物和生物量分配,进而影响土壤有机碳含量,充分灌溉能够显著提高土壤有机碳含量和土壤含水量,这与本试验研究结果相一致。本研究结果表明,小麦季 W2 灌溉处理下,小麦季旋耕—玉米季深松分层施肥较常规施肥有效提高土壤含水量、有机碳、硝态氮和速效钾含量,这与有关研究^[7,19]分析土壤理化性质结果相吻合,玉米季深松施肥可有效改善土壤结构,深松能够打破犁底层,在不翻动土壤的情况下,不会引起土壤养分、水分的大量流失;底层施肥可有效增加土壤养分,从而实现农田土壤的蓄水保

墒能力。亦有研究^[20-21]表明,玉米季磷、钾肥深施土壤均可表现出磷钾素盈余,其磷钾肥的后效可有效促进下茬作物耕层土壤速效磷、速效钾含量,但土壤速效磷在 W1 处理下显著高于 W2,其原因可能是因为土壤含水量过高影响土壤化学性质,如 pH 和氧化还原电位等,进而影响土壤速效磷含量,这与何园球等^[22]在水稻方面的研究相吻合。

土壤微生物生物量作为土壤有机质中最为活跃的组分,参与土壤养分循环和土壤有机质的转化,对土壤环境变化非常敏感,能够及时反映土壤质量变化^[1]。本研究表明,玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水水平对麦田土壤微生物生物量碳、氮具有显著影响,在玉米季同一施肥模式下,土壤微生物量碳、氮含量在 0—20,20—40 cm 土层深度均表现为 W2 > W1 > W0,且 W2 和 W1 处理显著高于 W0,从而说明在小麦关键生育期灌水可有效提升微生物生物量,这与罗慧等^[6]研究结果相类似。在小麦季同一灌水水平下,玉米季深松施肥较常规施肥可有效提高土壤微生物量碳、氮含量。由此表明,土壤深松有助于改善土壤的团粒结构,提高土壤的水分和养分,深层施肥有利于提高土壤养分含量,进而提高土壤微生物量碳、氮和酶活性,这与陈聪聪^[7]的研究结果相一致。

土壤酶作为土壤生物活性及土壤肥力的重要组

成部分,其活性反映出土壤中各种生化反应过程的强度和方向,因此是评价土壤肥力的重要指标之一^[2]。本研究表明,玉米季不同施肥模式和小麦季不同灌水水平对麦田土壤酶活性影响较大。在玉米季同一施肥水平下,W2 处理下各土层土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性总趋势高于 W0 和 W1,这与张传更等^[23]和杨昌钰等^[24]的研究结果一致。在小麦季同一灌水水平下,0—20,20—40 cm 土层深度,F2 处理的土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性均明显高于 F1,从而说明深松分层施肥有利于提高土壤酶活性,这与尹宝重等^[25]的研究结果基本一致。但在研究中发现,土壤碱性磷酸酶在 F2W1 处理下活性最高,其原因可能是因为适宜的水分有助于增加土壤速效磷含量,从而提高碱性磷酸酶活性;相反土壤含水量过高易导致农田出现水淹情况,降低土壤碱性磷酸酶活性,与夏丽丹等^[26]在探究不同水分条件对土壤磷酸酶活性的影响结果相一致。

李娟等^[27]研究表明,土壤微生物生物量和酶活性对土壤环境因子的变化较为敏感,土壤的微小变动均会引起其活性变化。本研究发现,各土层土壤微生物量碳、氮与土壤含水量、有机碳、硝态氮、速效钾含量呈正相关。这是由于土壤微生物可以将有机物转化为可被利用的养分,其中土壤微生物量碳是土壤有机碳的灵敏指示因子,与土壤中 C、N、P 等养分转化密切相关,并能促进土壤养分的有效化,因此,微生物量碳可作为反映土壤养分状况的指标^[28]。亦有研究^[19,29]表明,水分胁迫通过影响植物根系分泌物形成而影响土壤有机碳含量,从而抑制土壤微生物量,高天平等^[18]研究发现,充足灌溉能够显著提高土壤有机碳含量,进而提高土壤微生物量,均与本试验研究结果相一致。此外,本试验结果表明,0—20 cm 土层土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶与速效钾和速效磷存在极显著正相关关系,蔗糖酶可有效促进土壤有机质分解和转化,其活性高低决定氮磷钾的含量及形态^[30]。土壤中过氧化氢酶对于改善土壤肥力具有重要的作用,土壤中速效钾、速效磷通过间接作用影响过氧化氢酶的活性^[31]。各土层土壤含水量与蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶均呈显著或极显著的正相关关系,与韦泽秀等^[32]、周来良^[33]的研究结果相一致,但也有学者^[34]发现,水分胁迫显著增强苹果根际基质中过氧化氢酶活性,这与本试验结果有所不同,可能是因为水分胁迫下土壤酶活性因不同植物种类及不同胁迫程度所产生的根际分泌物不同而异^[16]。

程宪国等^[11]研究表明,养分携出量在一定程度

上能够更好地反映土壤的养分供应能力。本研究发现,0—20,20—40 cm 土层土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性和微生物量碳、氮均与小麦产量和养分携出量呈显著或极显著正相关,这是由于土壤微生物和土壤酶可以将有机物转化为可被利用的养分,微生物量碳与土壤中 C、N、P 等养分转化密切相关,并能促进土壤养分的有效化^[28]。合理的灌溉、施肥均有利于植被—土壤系统营养物质的循环与转换,促进植物根系对土壤养分的吸收与利用,同时植被在生长过程中通过光合作用和根系分泌物形成促进土壤酶及微生物量的增加^[35]。因此,作物养分携出量越高,越有利于土壤酶和微生物量的增加,这与本试验结果基本一致。

4 结论

(1)土壤微生物量碳、氮同时受深松施肥和灌水处理的显著影响,其中 SBMN 受二者交互作用影响显著。0—20 cm 土层,小麦季灌水处理(W1、W2)可显著提高 SMBC 和 SMBN 含量,且 F2W2 处理下 SMBN、SMBC 含量最高,分别为 94.16,355.12 mg/kg,与土壤含水量、速效钾呈显著正相关,其中主要受土壤含水量影响,贡献率为 78.30%。20—40 cm 土层,F2W2 处理下 SMBN 和 SMBC 含量分别为 57.57,243.77 mg/kg,显著高于其他处理,与土壤含水量、有机碳呈显著正相关关系,其中土壤含水量贡献率高达 86.30%。

(2)玉米季相同施肥条件下,0—20 cm 土层各处理土壤蔗糖酶、过氧化氢酶活性均表现为 W2>W1>W0,且差异显著;小麦季相同水分管理条件下,0—20 cm 土层土壤蔗糖酶、过氧化氢酶活性均为 F2 处理显著高于 F1;0—20 cm 土层土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶与速效钾和速效磷呈极显著正相关关系;2 个土层土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性与土壤含水量存在显著或极显著正相关关系。由此说明,土壤含水量是影响土壤酶活性变化的主要因素。

(3)F2W2 处理小麦产量最高,且养分携出量显著高于其他处理,小麦产量和养分携出量与土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性和微生物量碳、氮含量均呈显著或极显著正相关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李宽莹,王泽林,徐兴有,等.不同施肥处理对日光温室土壤微生物数量与酶活性的影响[J].西北林学院学报,2019,34(2):56-61.
- [3] 贾伟,周怀平,解文艳,等.长期有机无机肥配施对褐土

- 微生物生物量碳氮及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(4):700-705.
- [4] Liu E K, Hao B Q, Mei X R, et al. Effects of no-tillage management on soil biochemical characteristics in Northern China [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010,14(8):217-223.
- [5] 薛丽华,王志敏,郭志伟,等.麦田不同灌水处理对土壤酶活性时空分布的影响[J].水土保持学报,2010,24(5):228-232.
- [6] 罗慧,刘水,李伏生.不同灌水施肥策略对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J].生态学报,2014,34(18):5266-5274.
- [7] 陈聪聪.分层施肥方式对夏玉米根系生长发育及土壤理化性状的影响[D].河北保定:河北农业大学,2018.
- [8] 侯化亭,张丛志,张佳宝,等.不同施肥水平及玉米种植对土壤微生物生物量碳氮的影响[J].土壤,2012,44(1):163-166.
- [9] Ju X T, Liu X J, Pan J R, et al. Fate of N-15-labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain[J].*Pedosphere*,2007,17(1):52-61.
- [10] 王平,殷复伟,李平海,等.小麦/玉米轮作模式下氮肥运筹对土壤氮素残留及下茬作物的影响[J].中国农学通报,2021,37(15):63-71.
- [11] 程宪国,汪德水,张美荣,等.不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J].中国农业科学,1996(4):68-75.
- [12] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:274-340.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2005.
- [14] 曲国辉,郭继勋.松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系[J].草业学报,2003,12(1):18-22.
- [15] Zhao Z Q, Shahroui I, Bai Z K, et al. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China[J].*European Journal of Soil Biology*,2013,55:40-46.
- [16] 燕鹏,崔红艳,方子森,等.补充灌溉对土壤水分和胡麻籽粒产量的影响[J].水土保持研究,2017,24(1):328-333,341.
- [17] 肖列.CO₂浓度升高、干旱胁迫和施氮对白羊草生长和根际微生物的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [18] 高天平,张春,刘文涛,等.秸秆还田方式与灌溉量对土壤碳水环境和玉米产量的影响[J].山东农业科学,2019,51(6):108-112.
- [19] 王红光,石玉,王东,等.耕作方式对麦田土壤水分消耗和硝态氮淋溶的影响[J].水土保持学报,2011,25(5):44-47,52.
- [20] 薛冉.生长早期小麦根际土壤养分及微生物对不同水分供应模式响应及其机制的研究[D].兰州:兰州大学,2017.
- [21] 吉庆凯,王栋,杨文宝,等.长期施磷对玉米-小麦轮作系统作物产量和磷素吸收及土壤磷积累的影响[J].应用生态学报,2021,32(7):2469-2476.
- [22] 何园球,樊剑波,李成亮,等.水稻旱作下土壤水分状况和施用磷肥对红壤有效磷含量的影响[J].土壤学报,2011,48(6):1196-1202.
- [23] 张传更,高阳,张立明,等.水分管理措施对施用有机肥麦田土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(2):38-44.
- [24] 杨昌钰,张芮,蔺宝军,等.水分胁迫对设施延迟栽培葡萄根际土壤有机氮及土壤酶活性的影响[J].干旱区研究,2021,38(5):1376-1384.
- [25] 尹宝重,甄文超,郭丽果.海河低平原不同耕作方式下麦田土壤生态环境特征[J].水土保持学报,2015,29(1):186-194.
- [26] 夏丽丹,曹升,张虹,等.不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(5):1101-1111.
- [27] 李娟,赵秉强,李秀英,等.长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1093-1099.
- [28] 刘振花.云冷杉红松混交林不同演替阶段土壤微生物生物量碳与土壤蔗糖酶活性分析[J].防护林科技,2015(1):13-16.
- [29] 刘方春,邢尚军,马海林,等.干旱生境中接种根际促生细菌对核桃根际土壤生物学特征的影响[J].应用生态学报,2014,25(5):1475-1482.
- [30] Yue X, Balooch G, Chiou M, et al. Analysis of the material properties of early chondrogenic differentiated adipose derived stromal cell using an in vitro three dimensional micromass culture system[J].*Biochemical and Biophysical Research Communications*,2007,359(2):311-316.
- [31] 唐海滨,廖超英,刘莉丽,等.蔬菜大棚土壤脲酶、过氧化氢酶活性与土壤养分的关系[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):165-168,179.
- [32] 韦泽秀,梁银丽,井上光弘,等.水肥处理对黄瓜土壤养分、酶及微生物多样性的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1678-1684.
- [33] 周来良.干旱对根际土壤酶、氮磷钾及根部有机酸的影响[D].重庆:西南大学,2009.
- [34] 陶佳.断根与干旱对苹果幼树生长发育及根际环境的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [35] Liljeroth E, Van Veen J A, Miller H J. Assimilate translocation to the rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations[J].*Soil Biology and Biochemistry*,1990,22(8):1015-1021.