

补灌对旱作集雨下麦田微生物呼吸与熵值的影响

徐悦悦¹ 王楹鑫² 马向成² 蔡铁² 贾志宽²

(1. 山西农业大学山西有机旱作农业研究院, 太原 030031; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探明沟垄集雨条件下限量补灌对麦田土壤质量的影响,在冬小麦生育期设置3种降雨年型(丰水年 P1: 275 mm、平水年 P2: 200 mm、干旱年 P3: 125 mm)和4个补灌量水平,以传统畦灌(Traditional flat planting, TF)为对照,对沟垄集雨补灌(Ridge-furrow mulching system, RF)条件下不同土层土壤微生物呼吸、土壤有机碳含量、微生物量碳含量及其熵值(土壤代谢熵和微生物熵)进行研究。连续3年的研究结果表明,与深层土壤相比,沟垄集雨补灌对表层土壤微生物呼吸强度和微生物熵影响更为显著。在冬小麦生育期降雨量和补灌量相同的情况下,沟垄集雨较传统畦灌表层和深层土壤微生物呼吸强度分别增加2.47%~21.67%和3.28%~24.59%,且均在干旱年(降雨量125 mm)达到显著性差异;而土壤有机碳含量分别降低0.42%~15.49%和3.34%~11.52%。微生物熵分别增加9.09%~27.05%和11.9%~24.76%;对同一降雨量下不同补灌处理进行显著性分析结果表明,与传统畦灌对比,沟垄集雨补灌对土壤代谢熵影响不显著。研究结果可为沟垄集雨技术下限量补灌农田土壤质量变化预测及田间补灌管理提供科学依据。

关键词: 农田节水; 补充灌溉; 土壤微生物呼吸; 有机碳; 土壤质量

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0321-09 OSID: 

Response of Wheat Field Microbial Respiration and Its Entropy to Different Supplementary Irrigation under Ridge-furrow Mulching System

XU Yueyue¹ WANG Yingxin² MA Xiangcheng² CAI Tie² JIA Zhikuan²

(1. Shanxi Institute of Organic Dryland Farming, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China
2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil microbial respiration and its entropy (soil metabolic entropy and microbial entropy) are important parameters indicating soil carbon metabolic activity and sensitivity indicators of soil quality, which can reveal the impact of environmental or biological factor changes on soil earlier. Ridge-furrow mulching system is an efficient water-saving cultivation mode widely used in dry farmland in China. In order to prove the influence of limited supplementary irrigation on soil quality under the condition of wheat field, three rainfall conditions (high flow year was 275 mm, normal flow year was 200 mm, and dry year was 125 mm) and four irrigation treatments (150 mm, 75 mm, 37.5 mm, and 0 mm) under the ridge-furrow mulching system (RF) were set up during the growth period. Traditional flat planting (TF) was used as the control. The soil microbial respiration, microbial biomass carbon, and its entropy (soil metabolic entropy and microbial entropy) were determined in different soil layers under RF and TF. The results obtained after three years (October 2017 to June 2020) showed that RF had more significant effects on the soil microbial respiration and microbial entropy in the upper soil layer compared with those in the deep soil. Under the same amount of rainfall and supplementary irrigation during the growth period of winter wheat, soil microbial respiration levels under RF in the upper and deep soil layers were 2.47%~21.67% and 3.28%~24.59% higher compared with TF, respectively, and the difference was significant in the years with low flow year (125 mm). The microbial entropy was increased by 9.09%~27.05% and 11.9%~24.76% in the upper and deep soil layers, respectively, under RF. These results provided a scientific basis for predicting the soil quality and planning irrigation management for fields under RF by clarifying its effects on the sustainable development of land.

Key words: farmland water saving; supplementary irrigation; soil microbial respiration; organic carbon; soil quality

0 引言

我国旱作耕地面积占总耕地面积约 1/3,其中黄土高原半干旱区作为我国最为典型的旱作农业区,拥有全国近 40% 的旱作农田^[1]。小麦是该地区重要粮食作物,种植面积占全国小麦的 27% ~ 30%,其生产对当地粮食结构安全具有重要意义^[2]。然而,该地区年降雨量仅为 300 ~ 600 mm,且 60% 以上降水主要集中在 7—9 月,与小麦生长需求严重错位,降水资源利用率不高,干旱缺水是该地区粮食增产的主要限制因素^[3]。为解决干旱半干旱区缺水和季节性干旱的问题,近年来,沟垄集雨种植技术以其显著的增温保墒作用被广泛采用^[4]。该技术采用垄上覆膜进行集雨,沟内种植作物的方式^[5],可以收集无效降雨,还可以降低地面无效蒸发,增加农田及作物根域土壤含水量,显著提高作物产量和水分利用效率^[6]。值得关注的是,沟垄集雨技术在提高作物产量的同时,土壤水热改变和地膜使用影响土壤基础呼吸、土壤有机碳含量和微生物量碳含量,进而影响土壤微生物熵和代谢熵^[7]。土壤微生物熵是土壤微生物量碳含量占土壤有机碳含量的比例,主要用来反映单位资源所能支持的微生物生物量^[8]。土壤微生物熵通过反映土壤养分及养分利用效率的差异变化,进而预测土壤环境的微妙变化,土壤微生物熵越大,表明土壤养分积累越大,相反土壤养分损失越大。土壤代谢熵可以表征微生物活性对环境因子或者生存条件的响应,是直接反映微生物对碳源利用效率的指标^[9]。基于这样的特性,土壤微生物熵和土壤代谢熵可以作为评价土壤质量的敏感性指标^[10]。LUO 等^[11]在陕西省长武 4 年的春玉米试验表明,0 ~ 40 cm 土壤有机碳在覆膜下表现出一定的增长趋势,与不覆膜相比,显著增加了轻组有机碳含量,降低了 20 ~ 40 cm 微生物碳含量。然而,DONG 等^[12]在西北黄土高原麦玉轮作试验表明,覆膜增加了 0 ~ 10 cm 土层的总有机碳含量及微生物碳含量,降低了可溶性有机碳含量,这说明目前有关覆膜对土壤有机碳含量和微生物量碳含量的影响尚未有统一的结果。此外,有学者发现,根据作物的需水规律在作物不同生育时期科学合理灌水,最大限度地利用有限的水资源,是保证作物高产稳产的关键所在^[13]。

因此,本研究在沟垄集雨种植技术下在作物生长的关键时期进行限量补灌,以传统畦灌为对照,通过分析监测沟垄集雨下土壤有机碳、微生物量碳、土壤微生物呼吸及其熵值(土壤代谢熵、微生物熵)的变化来监测农田土壤质量演变特征,探究沟垄集雨

补灌技术下冬小麦田土壤质量演变规律及如何在节水的前提下保证土壤的可持续发展,为评价沟垄集雨补灌技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在西北农林科技大学旱区节水农业研究院试验站的作物控水监测试验场。该地位于关中平原(34°20'N,108°04'E),属暖温带半湿润大陆性季风气候,海拔 524 m,年均温 12.9℃,多年平均降雨量 550 ~ 600 mm,降雨多集中在 7—9 月,冬小麦生育期相对较少,平水年为 200 mm 左右。

作物控水监测试验场内建有种植区,每小区面积 6.7 m²(3.15 m × 2.13 m),深 3 m,小区四周均为 17 cm 厚的水泥墙,用以防止水分水平交换,种植区中固定有 TDR 土壤水分测量系统,底部设有滤层(0.5 m 厚沙子和石子)和排水管,以防种植区底部积水。遇雨雪电控盖棚,全年防雨水进入。种植区内土壤选取当地代表性土壤,根层(0 ~ 30 cm)基本理化性质为:有机质质量比 11.97 g/kg,全氮质量比 1.31 g/kg,全磷质量比 0.83 g/kg,全钾质量比 6.18 g/kg,速效氮质量比 53.12 mg/kg,速效磷质量比 22.34 mg/kg,速效钾质量比 97.37 mg/kg,pH 值 7.59,容重 1.25 g/cm³,灌溉水为地下水。

1.2 试验设计

本试验于 2017 年 10 月—2020 年 6 月连续 3 年进行。供试品种为“西农 979”。冬小麦于每年 10 月 1 日进行人工整地、起垄、覆膜、施肥,第 2 年 6 月中旬收获,收获后至次年播种前为农田休闲期。播种前施纯氮 225 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²和 K₂O 150 kg/hm²。10 月上旬播种,播种量 2.25 × 10⁶ 粒/hm²,行距 20 cm。播前底墒统一调整为 0 ~ 2 m 土层土壤贮水量 400 mm。

小麦生育期模拟降雨量分别为丰水年 275 mm(P1)、平水年 200 mm(P2)和干旱年 125 mm(P3),各月降雨分布情况根据当地 1982—2014 年小麦生育期降水资料计算而得,降水分布见表 1。在每个降雨水平下设置两种补灌方式:沟垄集雨(图 1)和传统畦灌,两种补灌方式的补灌量设 4 个水平,分别为 150、75、37.5、0 mm,在冬小麦越冬期和拔节期分两次平均灌溉。为便于区分,在降雨量为 275 mm 时,垄沟集雨下各处理名称分别为 P1R150、P1R75、P1R37.5 和 P1R0。在传统平作制度下,处理名称分别为 P1T150、P1T75、P1T37.5 和 P1T0。当降雨量为 200、125 mm 时,处理名称同上表述。为了精确控制降雨量及灌溉量,种植区均配置了灌溉控制系

统,各月不同模拟雨量也通过该系统控制实施,以保证模拟雨量及灌水的适时、均匀。本试验共 24 个处理,每个处理各设 3 个重复。

表 1 冬小麦生长季降水模拟分布

Tab.1 Partition of rainfall simulation during winter wheat-growing seasons

生育时期	降水次数/次	降水时间	降水量/mm		
			P1	P2	P3
苗期	2	10 月 28—29 日	40	32	25
		11 月 24—25 日	30	22	13
越冬期	2	12 月 18—19 日	4	5	4
		1 月 22—23 日	6	5	3
返青期	1	2 月 26—27 日	12	10	5
拔节期	1	3 月 20—21 日	43	24	15
灌浆期	3	4 月 9—10 日	25	30	15
		4 月 26—27 日	25	22	15
		5 月 10—11 日	45	25	15
成熟期	1	5 月 23—24 日	45	25	15

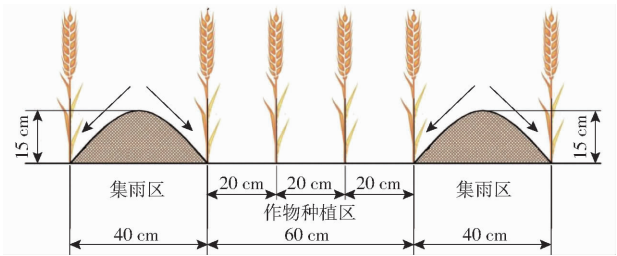


图 1 沟垄集雨种植示意图

Fig.1 Schematic of ridge-furrow mulching system

1.3 样品采集与测定方法

分别于冬小麦分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、开花期、灌浆期进行取样(选取研究期间每个处理在作物各生育时期的平均值进行数据分析),采样深度为 0~20 cm 和 20~40 cm。每次取样时,于每个小区按 S 形选择 5 个点,同一土层土样混合成一个复合样品。取样后除去杂物和石块,迅速混合放入无菌袋内并装入带冰块的取样箱中运回。在实验室将土样除去可见的土壤动物和植物残体,将新鲜土壤过 2 mm 筛,放置于 4℃ 冰箱内,用于测定土壤微生物生物量碳(MBC)含量。

土壤总有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾容量法测定^[14]。土壤微生物生物量碳含量采用氯仿熏蒸浸提法^[15]测定。具体操作如下:称取新鲜土样 10 g 置于真空干燥器中,经氯仿熏蒸后,于 25℃ 的黑暗条件下培养 24 h 后,用抽真空方法反复去除真空泵中残存的氯仿。熏蒸的同时,称取等量新鲜土壤。然后将熏蒸及未熏蒸的土壤样品用 40 mL 0.5 mol/L 的 K₂SO₄溶液震荡浸提 30 min 后,使用定量滤纸过滤。浸提液中有机碳(SOC)含量的测定采用高温外热重铬酸钾氧化法。土壤微生物生物量碳(MBC)含量

计算公式为

C_{MBC} = E_C/K_{EC} (1)

式中 C_{MBC}——土壤微生物生物量碳含量(质量比)
E_C——熏蒸与未熏蒸土样有机碳含量的差值
K_{EC}——转换系数,取 0.45

土壤微生物呼吸强度 M_R采用密闭碱液吸收滴定法测定。具体操作如下:称取 20 g 新鲜土样于 500 mL 广口瓶上悬挂尼龙小网袋中,以 0.1 mol/L NaOH 吸收微生物呼吸释放的 CO₂,25℃ 恒温箱培养 24 h,用 0.1 mol/L HCl 滴定剩余 NaOH,以计算土壤微生物呼吸强度。每个处理重复 3 次。

土壤代谢熵 Q₁计算公式为

Q₁ = M_R/C_{MBC} (2)

式中 M_R——土壤微生物呼吸强度,mg/(kg·h)

微生物熵 Q₂计算公式为

Q₂ = C_{MBC}/C_{SOC} × 100% (3)

式中 C_{SOC}——土壤总有机碳(SOC)质量比,g/kg

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 进行数据整理,Origin 2021 绘制图表,SPSS 18.0 统计软件进行方差分析,用最小显著差异法(LSD)进行差异显著比较。

2 结果与分析

2.1 沟垄集雨条件下限量补灌对冬小麦田不同土层土壤微生物呼吸的影响

不同降雨量下各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层微生物呼吸强度均呈现苗期至越冬期急剧下降,越冬期至开花期缓慢上升,开花期后缓慢下降的规律(图 2,图中数据均为 3 年平均数据。TS 表示分蘖期;RWS 表示越冬期;GS 表示返青期;JS 表示拔节期;FS 表示开花期;GFS 表示灌浆期;Average 表示生育期平均值,下同)。降雨量相同时,同一补灌量下,沟垄集雨处理的微生物呼吸强度略高于传统畦灌处理(图 2)。深层土壤的土壤微生物呼吸强度高于浅层土壤(图 2),且不同补灌处理对拔节期和开花期土壤基础呼吸强度影响较大。在 0~20 cm 土层,冬小麦生育期降雨量 275 mm 下,同一补灌量下沟垄集雨较传统补灌处理土壤微生物呼吸强度增加 2.47%~21.67%,其中只有不进行补灌的处理达到显著性差异(P<0.05)。降雨量 200 mm 下,在开花期,不同补灌量下沟垄集雨较传统补灌处理土壤微生物呼吸增加 3.90%~7.69%。其中处理 P2R150 较 P2T150 和 P2R75 显著提高 4.93% 和 6.25%(P<0.05),而 P2T150 和 P2R75 二者间差异不显著。125 mm 降雨量下,不同补灌量下沟垄集雨补灌较传统畦灌开花期 3 年平均土壤微生物呼吸强

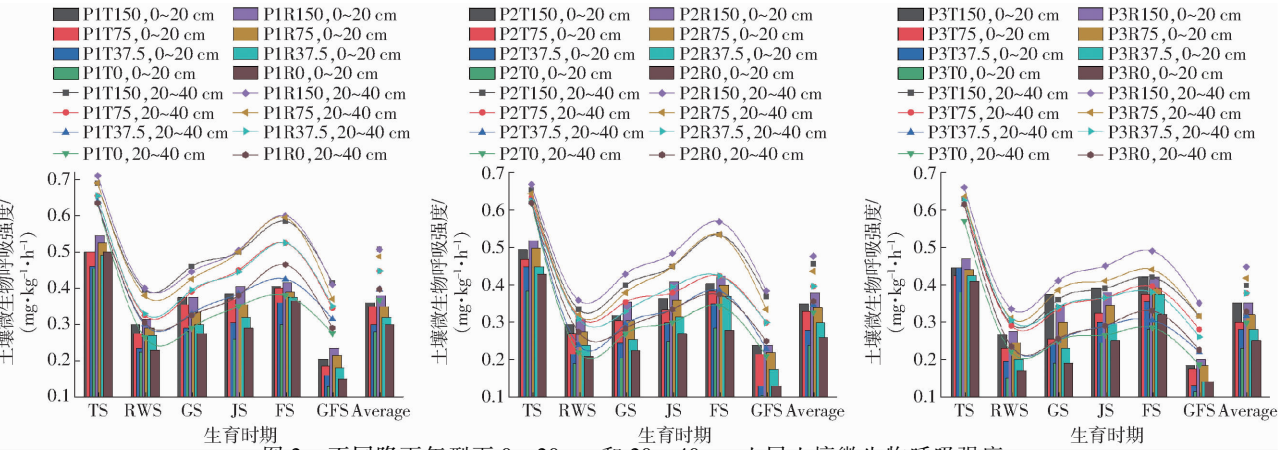


图2 不同降雨年型下0~20 cm和20~40 cm土层土壤微生物呼吸强度

Fig.2 Soil microbial respiration of 0~20 cm and 20~40 cm soil layers under rainfall at P1, P2 and P3

度显著增加4%~14.29% ($P<0.05$)。

在20~40 cm土层,冬小麦生育期降雨量275、200 mm下,在开花期,不同沟垄集雨补灌处理较传统补灌土壤微生物呼吸强度分别增加3.28%~7.10%和4.35%~14.29%。其中P2R37.5和P2T37.5、P2R0和P2T0处理间差异达到显著($P<0.05$),其余补灌量处理均未达到显著性差异。降雨量125 mm下,不同补灌量下沟垄集雨补灌较传统畦灌开花期3年平均土壤微生物呼吸强度显著增加11.39%~24.59% ($P<0.05$)。

2.2 沟垄集雨条件下限量补灌对冬小麦田不同土层土壤微生物量碳含量和有机碳含量的影响

由图3和图4(图中RF表示沟垄集雨补灌,TF表示传统畦灌,下同)可以看出,沟垄集雨补灌可显著提高土壤0~20 cm和20~40 cm微生物量碳含量。沟垄集雨处理的土壤微生物量碳从苗期至开花期持续上升,开花期至灌浆期下降。而传统畦灌处理呈现从苗期至越冬期下降,越冬期至开花期缓慢上升的趋势。冬小麦生育期降雨量275 mm下,在0~20 cm和20~40 cm土层,同一补灌量下沟垄集雨较传统畦灌处理的微生物量碳分别增加10.10%~12.30%和4.11%~6.12%(图3、4)。降雨量200 mm下,在0~20 cm和

20~40 cm土层,同一补灌量下沟垄集雨较传统畦灌处理分别增加10.49%~15.86%和4.37%~7.63%。降雨量125 mm下,在0~20 cm和20~40 cm土层,同一补灌量下沟垄集雨较传统畦灌处理分别增加8.89%~15.07%和6.80%~11.80%。其中在0~20 cm土层沟垄集雨较传统畦灌处理的土壤微生物量碳含量均达到显著性差异($P<0.05$)。

图5和图6为沟垄集雨和传统畦灌处理的0~20 cm和20~40 cm土层有机碳含量在冬小麦整个生育时期的动态变化。由图5、6可以看出,与土壤微生物量碳含量的变化趋势相反,随着降雨量及补灌量的增加,土层0~20 cm和20~40 cm的有机碳含量下降,且当降雨量及补灌量相同时,沟垄集雨处理的有机碳含量低于传统畦灌(图5、6)。冬小麦生育期降雨量275 mm下,在0~20 cm和20~40 cm土层,同一补灌量下沟垄集雨较传统畦灌处理的有机碳分别降低11.12%~15.49%和8.94%~11.51%。降雨量200 mm下,在0~20 cm和20~40 cm土层,同一补灌量下沟垄集雨的有机碳较传统畦灌处理分别降低0.42%~4.26%和3.34%~5.09%。降雨量125 mm下,在0~20 cm和20~40 cm土层,同一补灌量下沟垄集雨较传统畦灌处理

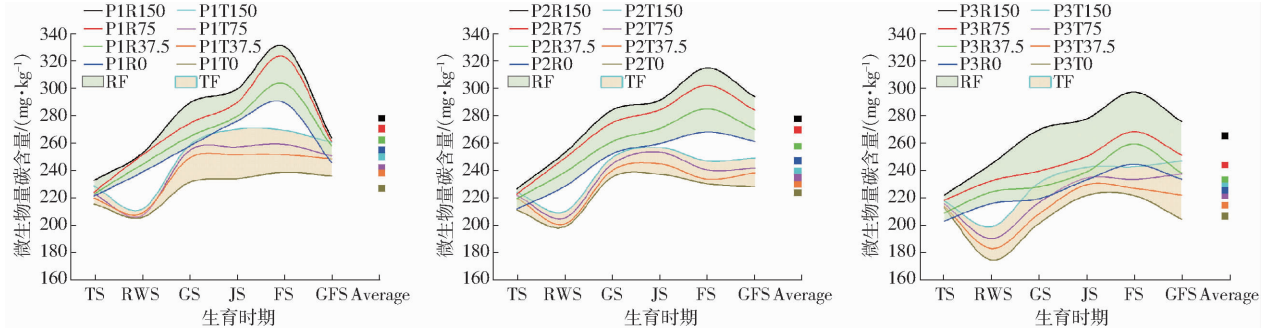


图3 不同降雨年型下0~20 cm土层微生物量碳含量

Fig.3 Microbial biomass carbon of 0~20 cm soil layers under rainfall at P1, P2 and P3

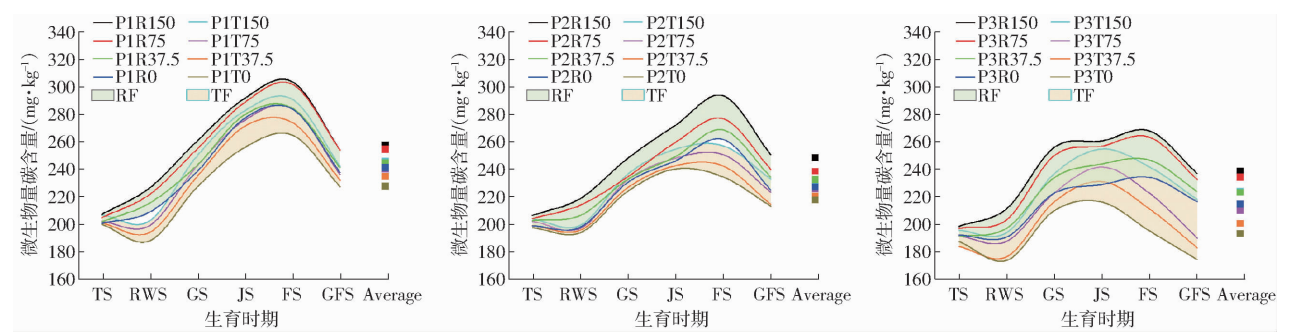


图 4 不同降雨年型下 20 ~ 40 cm 土层微生物量碳含量

Fig. 4 Microbial biomass carbon of 20 ~ 40 cm soil layers under rainfall at P1, P2 and P3

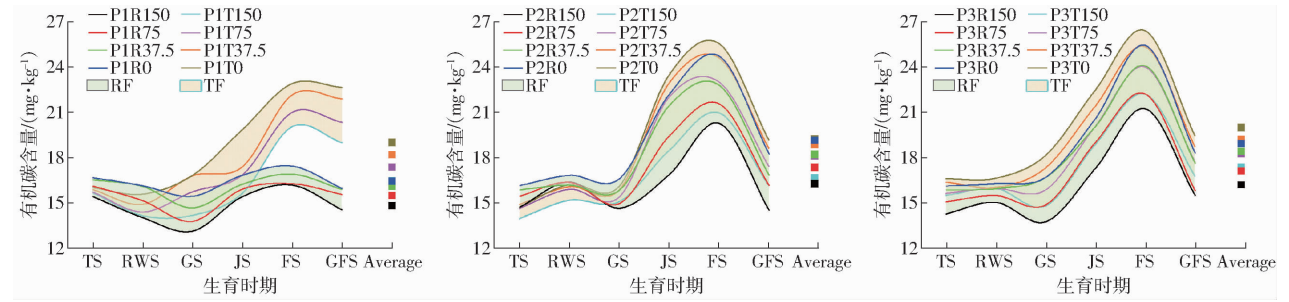


图 5 不同降雨年型下 0 ~ 20 cm 土层有机碳含量

Fig. 5 Organic carbon of 0 ~ 20 cm soil layers under rainfall at P1, P2 and P3

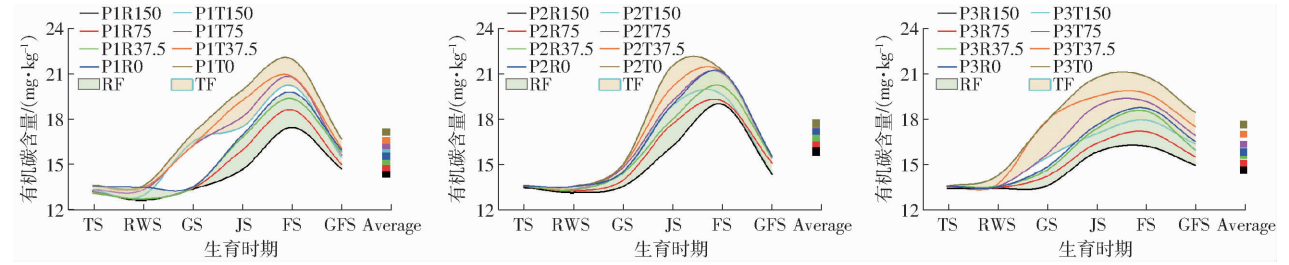


图 6 不同降雨年型下 20 ~ 40 cm 土层有机碳含量

Fig. 6 Organic carbon of 20 ~ 40 cm soil layers under rainfall at P1, P2 and P3

分别降低 4.40% ~ 7.15% 和 7.27% ~ 11.52%。

2.3 沟垄集雨条件下限量补灌对冬小麦田不同土层土壤代谢熵的影响

土壤代谢熵是土壤呼吸强度与微生物生物量碳的比值,反映了单位生物量的微生物在单位时间里的呼吸强度。对不同处理下土壤代谢熵进行测定,结果表明(表 2、3),土壤代谢熵在不同处理下呈现明显的垂直变化特征,表现为深层土壤大于浅层土壤。在 P1、P2 和 P3 降雨量下,不同补灌量处理的土壤代谢熵均值深层土壤是浅层的 1.39 ~ 1.44 倍。且在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层,土壤代谢熵随着降雨量及补灌量的增加呈现增加的趋势。对同一降雨量下不同补灌处理显著性分析结果表明,与传统畦灌对比,沟垄集雨补灌对土壤代谢熵影响不显著。

2.4 沟垄集雨条件下限量补灌对冬小麦田不同土层微生物熵的影响

由表 4、5 可以看出,土壤微生物熵在不同处理

下呈现明显的垂直变化特征,表现为浅层土壤大于深层土壤。且在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层,土壤微生物熵随着降雨量及补灌量的增加呈现增加的趋势。在 0 ~ 20 cm 土层,冬小麦生育期降雨量 275 mm 下,与传统畦灌相比,沟垄集雨补灌处理的微生物熵显著增加 22.08% ~ 27.05% ($P < 0.05$)。处理 P1R150 和 P1R75 显著高于其他处理,且二者之间差异不显著。降雨量 200 mm 下,同一补灌量下,沟垄集雨补灌较传统畦灌处理的微生物熵显著增加 9.09% ~ 18.49% ($P < 0.05$)。降雨量 125 mm 下,沟垄集雨补灌较传统畦灌处理的微生物熵增加 13.16% ~ 22.96% ($P > 0.05$),但并未达到显著性差异。其中处理 P3R150 显著高于其他处理。

在 20 ~ 40 cm 土层,降雨量 275 mm 下,补灌量为 150、75 mm 时,与传统畦灌相比,沟垄集雨补灌处理的微生物熵分别显著增加 20.27% 和 18.86% ($P < 0.05$)。补灌量为 37.5、0 mm 时,沟垄集雨处

表 2 不同降雨年型下冬小麦田 0 ~ 20 cm 土层代谢熵

Tab.2 Changes of soil metabolic quotient in 0 ~ 20 cm soil layers under simulated rainfall conditions during winter wheat growing seasons					
处理	代谢熵/(mg·h ⁻¹)	处理	代谢熵/(mg·h ⁻¹)	处理	代谢熵/(mg·h ⁻¹)
P1T150	1.45 × 10 ^{-3a}	P2T150	1.48 × 10 ^{-3a}	P3T150	1.51 × 10 ^{-3a}
P1T75	1.44 × 10 ^{-3a}	P2T75	1.41 × 10 ^{-3a}	P3T75	1.35 × 10 ^{-3ab}
P1T37.5	1.27 × 10 ^{-3a}	P2T37.5	1.23 × 10 ^{-3ab}	P3T37.5	1.29 × 10 ^{-3abc}
P1T0	1.2 × 10 ^{-3a}	P2T0	1.08 × 10 ^{-3b}	P3T0	1.08 × 10 ^{-3c}
P1R150	1.4 × 10 ^{-3a}	P2R150	1.39 × 10 ^{-3ab}	P3R150	1.33 × 10 ^{-3ab}
P1R75	1.33 × 10 ^{-3a}	P2R75	1.31 × 10 ^{-3ab}	P3R75	1.31 × 10 ^{-3abc}
P1R37.5	1.25 × 10 ^{-3a}	P2R37.5	1.2 × 10 ^{-3ab}	P3R37.5	1.19 × 10 ^{-3bc}
P1R0	1.2 × 10 ^{-3a}	P2R0	1.07 × 10 ^{-3b}	P3R0	1.09 × 10 ^{-3c}

注:同列数字后不同小写字母表示同一降雨水平下不同种植方式和补灌量差异显著($P<0.05$),下同。

表 3 不同降雨年型下冬小麦田 20 ~ 40 cm 土层代谢熵

Tab.3 Changes of soil metabolic quotient in 20 ~ 40 cm soil layers under simulated rainfall conditions during winter wheat growing seasons					
处理	代谢熵/(mg·h ⁻¹)	处理	代谢熵/(mg·h ⁻¹)	处理	代谢熵/(mg·h ⁻¹)
P1T150	2.13 × 10 ^{-3a}	P2T150	2.02 × 10 ^{-3a}	P3T150	1.87 × 10 ^{-3ab}
P1T75	1.93 × 10 ^{-3bc}	P2T75	1.83 × 10 ^{-3abc}	P3T75	1.89 × 10 ^{-3ab}
P1T37.5	1.76 × 10 ^{-3cde}	P2T37.5	1.64 × 10 ^{-3cd}	P3T37.5	1.67 × 10 ^{-3ab}
P1T0	1.67 × 10 ^{-3e}	P2T0	1.56 × 10 ^{-3d}	P3T0	1.60 × 10 ^{-3ab}
P1R150	2.06 × 10 ^{-3ab}	P2R150	2.01 × 10 ^{-3a}	P3R150	1.94 × 10 ^{-3a}
P1R75	2.00 × 10 ^{-3ab}	P2R75	1.92 × 10 ^{-3bed}	P3R75	1.84 × 10 ^{-3ab}
P1R37.5	1.90 × 10 ^{-3bed}	P2R37.5	1.76 × 10 ^{-3ab}	P3R37.5	1.77 × 10 ^{-3ab}
P1R0	1.72 × 10 ^{-3de}	P2R0	1.62 × 10 ^{-3d}	P3R0	1.57 × 10 ^{-3b}

表 4 不同降雨年型下冬小麦田 0 ~ 20 cm 土层微生物熵

Tab.4 Changes of microbial quotient in 0 ~ 20 cm soil layers under simulated rainfall conditions during winter wheat growing seasons					
处理	微生物熵/%	处理	微生物熵/%	处理	微生物熵/%
P1T150	1.54 ^{cd}	P2T150	1.46 ^{bc}	P3T150	1.35 ^{bc}
P1T75	1.41 ^{de}	P2T75	1.33 ^{cd}	P3T75	1.24 ^{bed}
P1T37.5	1.33 ^{ef}	P2T37.5	1.26 ^d	P3T37.5	1.14 ^{cd}
P1T0	1.22 ^f	P2T0	1.21 ^d	P3T0	1.05 ^d
P1R150	1.88 ^a	P2R150	1.73 ^a	P3R150	1.66 ^a
P1R75	1.75 ^{ab}	P2R75	1.57 ^b	P3R75	1.45 ^{ab}
P1R37.5	1.63 ^{bc}	P2R37.5	1.44 ^{bc}	P3R37.5	1.29 ^{bed}
P1R0	1.55 ^{cd}	P2R0	1.32 ^{cd}	P3R0	1.21 ^{bed}

理的微生物熵较传统畦灌处理分别增加 17.65% 和 21.43%,但并未达到显著性差异。降雨量 200 mm 下,补灌量相同时,沟垄集雨较传统畦灌处理的微生物熵增加 11.90% ~ 17.48%,且随着补灌量的增加,微生物熵增加的幅度越大,但处理间差异并不显著。降雨量 125 mm 下,补灌量为 150 mm 时,沟垄集雨较传统畦灌处理微生物熵显著增加 20.74% ($P<0.05$)。补灌量小于 150 mm 时,与传统畦灌相比,沟垄集雨处理的微生物熵增加 20.97% ~ 24.76%。

表 5 不同降雨年型下冬小麦田 20 ~ 40 cm 土层微生物熵

Tab.5 Changes of microbial quotient in 20 ~ 40 cm soil layers under simulated rainfall conditions during winter wheat growing seasons					
处理	微生物熵/%	处理	微生物熵/%	处理	微生物熵/%
P1T150	1.48 ^{bcd}	P2T150	1.43 ^{abc}	P3T150	1.35 ^{bc}
P1T75	1.41 ^{cd}	P2T75	1.36 ^{bcd}	P3T75	1.24 ^{bed}
P1T37.5	1.36 ^{cd}	P2T37.5	1.31 ^{cd}	P3T37.5	1.14 ^{cd}
P1T0	1.26 ^d	P2T0	1.26 ^d	P3T0	1.05 ^d
P1R150	1.78 ^a	P2R150	1.68 ^a	P3R150	1.63 ^a
P1R75	1.69 ^{ab}	P2R75	1.57 ^{ab}	P3R75	1.50 ^{ab}
P1R37.5	1.60 ^{abc}	P2R37.5	1.48 ^{abc}	P3R37.5	1.39 ^{abc}
P1R0	1.53 ^{abcd}	P2R0	1.41 ^{bcd}	P3R0	1.31 ^{bed}

3 讨论

3.1 沟垄集雨条件下限量补灌对土壤微生物量碳、有机碳以及微生物呼吸的影响

土壤微生物生物量碳既是土壤养分转化与循环的动力,又可作为土壤中植物有效养分的储备库,其对土壤环境因子的变化极为敏感,土壤中微小的改变均会引起其活性变化,常被作为评价土壤微生物生态系统质量的重要指标^[16]。本研究中,在不同降雨量及补灌量下,沟垄集雨补灌处理不同土层的土壤微生物量碳均高于传统畦灌。这可能是由于覆膜

改变了土壤内部微环境,提高了土壤微生物活性,加速了土壤呼吸,进而影响了微生物量。赵彤等^[17]、刘爽等^[18]研究不同植被对土壤微生物量碳的影响时发现 MBC 与土壤含水量呈显著正相关。在本研究中,同一降雨量和补灌量下沟垄集雨处理的 MBC 均大于传统畦灌,这可能是由于沟垄集雨显著的增加了土壤水分含量^[19],进而影响了土壤微生物量碳含量。然而,有学者发现^[20],在湿地环境中,水分环境与微生物量之间呈显著负相关,这是由于在土壤水分高于田间持水量时,土壤通气性随着水分增加而降低,土壤盐度增加,土壤生存环境恶化,微生物量碳减少。本研究中沟垄集雨处理较传统平作的微生物呼吸增加幅度在干旱年型较丰水年更为明显证明了此观点。本研究还发现,沟垄集雨和传统畦灌处理的 MBC 在 0 ~ 20 cm 土层均达到显著性差异,说明沟垄集雨对浅层土壤的微生物量碳影响更为显著。这可能是由于覆膜对耕层土壤的温度影响更大^[21],较高的温度使植株和根部生长更为旺盛,土壤微生物量碳随之增加,这与 RAMIREZ 等^[22]的研究结果一致。

有研究表明,覆膜可导致土壤有机碳含量提高,其原因可能是覆膜导致土壤温度升高,进而提高初级生产力,能够增加土壤有机碳储量^[23]。然而在本研究中,沟垄集雨处理不同土层的土壤有机碳含量略低于传统畦灌处理,这与 KAHN 等^[24]的研究结果不一致。这可能是由于地膜覆膜虽然改变了土壤生态环境^[25],改善了土壤理化性质,还会增加土壤微生物和酶的活性^[1],但同时沟垄集雨补灌也增加了土壤水分含量^[26],加速了土壤有机碳的矿化^[27],不利于土壤有机碳的积累。在作物生育期土壤有机碳含量由小到大依次为丰水年、平水年、干旱年,也说明了土壤含水量较高时微生物可利用的碳源丰富,提高了土壤有机碳的矿化速率^[28]。

土壤呼吸强度是表征土壤质量和肥力的重要生物学指标,尤其是土壤微生物呼吸强度反映了土壤的生物活性和土壤物质代谢的强度^[29]。影响土壤呼吸作用的因素有很多,如不同的耕作、施肥、栽培方式、水热环境等^[30]。本研究中,沟垄集雨补灌处理在不同土层的土壤微生物呼吸强度均高于传统畦灌。这是由于沟垄集雨处理土壤环境中有机碳含量低于传统畦灌,微生物对有机碳的竞争更为激烈,呼吸速率较高^[31]。SONNENHOLZNER 等^[32]也发现土壤呼吸随着土壤有机碳的稳定性的增加而减少,这与本研究结果一致。同时,有研究表明,土壤微生物呼吸和微生物量碳呈显著

的正相关关系^[33],本研究中沟垄集雨的土壤微生物量碳含量高于传统畦灌处理正说明了这一点。而且,沟垄集雨处理较传统平作的微生物呼吸增加幅度在干旱年型下更为明显,这也说明沟垄集雨技术在降雨较为贫瘠的地区集雨效果更为显著。此外,土壤微生物呼吸在一定范围内随土壤含水量的增大而增强,在接近田间持水量的一定范围内,在饱和或永久萎蔫含水量时,土壤微生物呼吸停滞^[34]。在本研究中,在作物降雨丰水年间,当补灌量超过 75 mm 时,土壤微生物呼吸呈现平缓的趋势,且随着降雨量及补灌量的减少,沟垄集雨较传统畦灌处理的土壤微生物呼吸强度增幅越为明显,说明沟垄集雨补灌由于增加了土壤水分含量进而增强了土壤微生物呼吸,但过高的土壤含水量会导致其他环境因子也发生变化,如土壤温度、土壤通气性、pH 值等也会对微生物产生不同程度的影响,土壤水分条件对微生物的影响减弱。

3.2 沟垄集雨补灌对土壤微生物熵和代谢熵的影响

土壤微生物熵能充分反映土壤中活性有机碳所占的比例,并可表示土壤总碳库的可利用程度^[12]。有研究表明土壤微生物熵越高,表征土壤有机碳的活性程度越高,土壤中有机碳向微生物生物量转化的速率越快。周正虎等^[35]整合 19 个生态演替过程中土壤微生物熵的变化,发现土壤微生物熵在 84% 的生态演替序列中表现出随着生态演替进程而增加,表明土壤微生物熵的变异很大程度上可以反映土壤质量的演变。在本研究中,在同一降雨量及补灌量下,沟垄集雨补灌处理的土壤微生物熵均大于传统畦灌。且随着降雨量和补灌量的增加,土壤微生物熵增加越为显著,说明沟垄集雨补灌处理提高了土壤质量。其原因可能是沟垄集雨补灌的水分状况优于传统畦灌处理^[31],有利于改善根际土壤生态环境,促进微生物活性^[36],增加微生物生物量,有机碳周转快,从而增加了土壤微生物熵^[37]。通过对比不同降雨量下土壤微生物熵变化特征发现,随着降雨量的减少,土壤微生物熵呈现减小的趋势,这说明在土壤水分充足的情况下,有机碳向微生物量转化的速率较快。尤其在干旱年间,同一补灌量条件下,沟垄集雨较传统补灌的微生物熵增加显著,这与土壤微生物增加的规律保持一致。本研究结果还表明,沟垄集雨对微生物熵的影响浅层大于深层,说明与深层土壤相比,沟垄集雨对表层土壤的微环境影响更为显著。这与 ROWINGGS 等^[38]和 SCHAUFLE 等^[39]的试验结果一致。

土壤代谢熵可以表征微生物活性对环境因子或者生存条件的响应,是直接反映微生物对碳源利用效率的指标^[10]。GREGO 等^[40]通过探究肥料使用对土壤代谢熵的影响得出“土壤质量提高,土壤代谢熵有减少的趋势”的结论,土壤代谢熵越大说明微生物将更多的碳源用于呼吸作用而非微生物自身细胞建造,对碳源利用效率低下,不利于土壤质量的提升^[8]。本研究结果表明,降雨量及补灌量一致时,在 0~20 cm 土层,沟垄集雨处理的土壤代谢熵较传统畦灌均有所下降。说明在浅层土壤,沟垄集雨处理较传统平作对碳源利用效率更高,这与本研究结果土壤沟垄集雨对浅层土壤的微生物量碳影响更为显著保持一致。在 20~40 cm 土层,当降雨量及补灌量一致时,沟垄集雨处理的土壤代谢熵较传统畦灌均小幅度的提高,但并未达到显著性差异,但均显著低于表层土壤,这可能是由于深层土壤可利用有机质较少,微生物需保持较高的碳利用效率完成自身生存^[41]。而在不同降雨年型下,与土壤微生物熵的变化特征相反,随着降雨量的减少,土壤代谢熵呈现小幅度增加的趋势,尤其在干旱年型下,沟垄集雨补灌措施虽然增加了土壤水分含量,但在严重水分胁迫下,补充灌溉缓解了作物生长面临的水分需求^[42],但土壤环境仍不利于微生物对碳源的利用。

4 结 论

(1)在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,冬小麦生育期降雨量 275 mm 下,不同补灌量下沟垄集雨较传统平作种植的土壤微生物呼吸强度分别增加 2.47%~21.67% 和 3.28%~7.10%,微生物量碳含量分别增加 10.10%~12.30% 和 4.11%~6.12%,而有机碳含量分别降低 11.12%~15.49% 和 8.94%~11.51%;降雨量 200 mm 下,沟垄集雨处理与传统平作间的差异在冬小麦开花期最为显著,土壤微生物呼吸强度分别增加 3.90%~7.69% 和 4.35%~14.29%,微生物量碳含量分别增加 10.49%~15.86% 和 4.37%~7.63%,有机碳含量分别降低 0.42%~4.26% 和 3.34%~5.09%;降雨量 125 mm 下,与传统平作相比,在不同补灌量下沟垄集雨的土壤微生物呼吸强度在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别增加 4.00%~14.29% 和 11.39%~24.59%,微生物量碳含量分别增加 8.89%~15.07% 和 6.80%~11.80%,有机碳含量分别减少 4.40%~7.15% 和 7.27%~11.52%。

(2)在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,在不同补灌处理中,与传统平作相比,沟垄集雨种植均显著提高了土壤微生物熵,而对土壤代谢熵影响不显著。

参 考 文 献

[1] LIU X E, LI X G, LONG H, et al. Film-mulched ridge-furrow management increases maize productivity and sustains soil organic carbon in a dryland cropping system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78: 1434–1441.

[2] 张少宏, 付鑫, IHSAN Muhammad, 等. 秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 236–241.

ZHANG Shaohong, FU Xin, IHSAN Muhammad, et al. Effects of straw and plastic film mulching on nitrogen composition of soil aggregates in dryland wheat field on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 236–241. (in Chinese)

[3] 赵刚, 樊廷录, 李尚中, 等. 黄土旱塬集雨保墒措施对苹果发育和土壤水分变化的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 155–160.

ZHAO Gang, FAN Tinglu, LI Shangzhong, et al. Effects of rainwater harvesting and soil moisture conservation measures on apple growth and soil moisture change in the dry loess plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 155–160. (in Chinese)

[4] REN X, CAI T, CHEN X, et al. Effect of rainfall concentration with different ridge widths on winter wheat production under semiarid climate[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 77:20–27.

[5] GAN Y T, SIDDIQUE K, TURNER N C, et al. Ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. Advances in Agronomy, 2013, 118: 429–476.

[6] WANG Q A, REN X A, SONG X Y, et al. The optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-covering material in rainwater harvesting for oats production in semiarid regions of China[J]. Field Crops Research, 2015, 172: 106–118.

[7] WANG Y, LI X, HAI L, et al. Film fully-mulched ridge-furrow cropping affects soil biochemical properties and maize nutrient uptake in a rainfed semi-arid environment[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2014, 60(4): 486–498.

[8] MUNOZ C, MONREAL C M, SCHNITZER M, et al. Influence of Acacia caven (Mol) coverage on carbon distribution and its chemical composition in soil organic carbon fractions in a Mediterranean-type climate region[J]. Geoderma, 2008, 144(1–2): 352–360.

[9] KAISER K, KALBITZ K. Cycling downwards- dissolved organic matter in soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 52: 29–32.

[10] LI C, YAN K, TANG L, et al. Change in deep soil microbial communities due to long-term fertilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 75: 264–272.

- [11] LUO S, ZHU L, LIU J, et al. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to soil surface mulching in semiarid farmland[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 67:35–42.
- [12] DONG Q G, YANG Y C, YU K, et al. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 133–143.
- [13] 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): 328–341.
YAN Peng, CUI Hongyan, FANG Zisen, et al. Effects of supplementary irrigation on soil moisture and seed yield of Flax[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 328–341. (in Chinese)
- [14] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707.
- [15] PANDEY C B, SINGH G B, SINGHS K, et al. Soil nitrogen and microbial biomass carbon dynamics in native forests and derived agricultural land uses in a humid tropical climate of India[J]. *Plant & Soil*, 2010, 333(1–2): 453–467.
- [16] ZHANG X, XIN X, ZHU A, et al. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 99–107.
- [17] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 176–183.
ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al. Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P in loess hilly region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 176–183. (in Chinese)
- [18] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135–3143.
LIU Shuang, WANG Chuankuan. Temporal and spatial patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3135–3143. (in Chinese)
- [19] SHAHZAD A, XU Y Y, MA X C, et al. Planting patterns and deficit irrigation strategies to improve wheat production and water use efficiency under simulated rainfall conditions[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1408.
- [20] WANG J, VOLLRATH S, BEHRENDTS T, et al. Distribution and diversity of gallionella-like neutrophilic iron oxidizers in a tidal freshwater marsh[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2011, 77(7): 2337–2344.
- [21] 冯禹, 郝卫平, 高丽丽, 等. 地膜覆盖对旱作玉米田水热通量传输的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 300–313.
FENG Yu, HAO Weiping, GAO Lili, et al. Effect of plastic film mulching on water and heat flux transfer in dry maize field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 300–313. (in Chinese)
- [22] RAMIREZ K S, CRAINE J M, FIERER N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1918–1927.
- [23] CALLESEN I, LISKI J, RAULUND R K, et al. Soil carbon stores in Mordic well-drained forest soils—relationships with climate and texture class[J]. *Global Change Biology*, 2010, 9(3): 358–370.
- [24] KAHN M S, LAL R, ANN V M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 151–158.
- [25] WANG Y, LI X, HAI L, et al. Film fully-mulched ridge-furrow cropping affects soil biochemical properties and maize nutrient uptake in a rainfed semi-arid environment[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(4): 486–498.
- [26] SHAHZAD A, XU Y Y, JIA Q M, et al. Interactive effects of planting models with limited irrigation on soil water, temperature, respiration and winter wheat production under simulated rainfall conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 204: 198–211.
- [27] 李成, 王让会, 李兆哲, 等. 冬小麦-夏玉米农田蒸散与 CO₂ 净交换特征及影响因素[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 331–339.
LI Cheng, WANG Ranghui, LI Zhaozhe, et al. Characteristics and influencing factors of net exchange between evapotranspiration and CO₂ between winter wheat and summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 331–339. (in Chinese)
- [28] 许恩兰, 林雪婷, 郭剑芬. 水分对武夷山不同海拔土壤有机碳矿化的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2019, 14(1): 30–37.
XU Enlan, LIN Xueting, GUO Jianfen. Effects of moisture on soil organic carbon mineralization at different elevations in Wuyi Mountain[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2019, 14(1): 30–37. (in Chinese)
- [29] VANESSA N L, RAM C, GREENE R S, et al. Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2008, 44: 943–954.
- [30] MONSON R K, DAVID L L, SEAN P B, et al. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition[J]. *Nature*, 2006, 439(7077): 711–714.
- [31] BRECHET L, VALERIE L D, STEPHANE P, et al. Short- and long-term influence of litter quality and quantity on simulated heterotrophic soil respiration in a lowland tropical forest[J]. *Ecosystems*, 2017, 20(6): 1190–1204.
- [32] SONNENHOLZNER S, BOYD C E. Vertical gradients of organic matter concentration and respiration rate in pond bottom soils [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2000, 31(3): 376–380.
- [33] ATKINS J, EPSTEIN H, WELSCH D. Vegetation and elevation influence the timing and magnitude of soil CO₂ efflux in a humid, topographically complex watershed[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(10): 2975–2994.

- ZHAO Juan, QUAN Pengkun, ZHANG Mengsheng, et al. Design of apple quality integrated non-destructive testing device based on multi-band LED light source[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 326–332. (in Chinese)
- [16] YANG B, GUO W, HUANG X, et al. A portable, low-cost and sensor-based detector on sweetness and firmness grades of kiwifruit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105831.
- [17] SINGH H, SRIDHAR A, SAINI S S. Ultra-low-cost self-referencing multispectral detector for non-destructive measurement of fruit quality[J]. Food Analytical Methods, 2020, 13(10): 1879–1893.
- [18] 刘卉, 郭文川, 岳绒. 猕猴桃硬度近红外漫反射光谱无损检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 145–149.
LIU Hui, GUO Wenchuan, YUE Rong. Non-destructive detection of kiwifruit firmness based on near-infrared diffused spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 145–149. (in Chinese)
- [19] XIA Y, FAN S, TIAN X, et al. Multi-factor fusion models for soluble solid content detection in pear (*Pyrus bretschneideri* ‘Ya’) using Vis/NIR online half-transmittance technique[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 110: 103443.
- [20] 朱伟兴, 江辉, 陈全胜. 特征波长筛选在近红外光谱测定梨硬度中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 368–372.
ZHU Weixing, JIANG Hui, CHEN Quansheng. Application of characteristic wavelengths selection in determination of pear firmness by near infrared (NIR) spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 368–372. (in Chinese)
- [21] TAN Z, XIE J, CHEN J, et al. Optimization of detection device geometry for NIR spectroscopy using a three-layered model of stone fruit[J]. Optical Review, 2016, 23(5): 1–7.
- [22] MCGLONE V A, JORDAN R B, MARTINSEN P J. Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for ‘Royal Gala’ apple[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 25(2): 135–144.
- [23] NICOLAÏ B M, BEULLENS K, BOBELYN E, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(2): 99–118.
- [24] 刘卉. 猕猴桃、桃和梨品质的近红外漫反射光谱无损检测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
LIU Hui. Nondestructive detection of kiwifruits, peaches and pears quality based on near-infrared spectroscopy analysis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
-

(上接第 329 页)

- [34] IRVINE J, LAW B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests[J]. Global Change Biology, 2010, 8(12): 1183–1194.
- [35] 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化[J]. 植物生态学报, 2016, 40(12): 43–52.
ZHOU Zhenghu, WANG Chuankuan. Changes in carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry between soil and microorganisms during ecosystem succession[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(12): 43–52. (in Chinese)
- [36] HAIMING T, XIAO P X, WEN G T, et al. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on soil organic carbon and carbon management index under a double-cropping rice system in Southern China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49: 1–14.
- [37] WANG F, XU M, STEDTFELD R D, et al. Long-term effect of different fertilization and cropping systems on the soil antibiotic resistome[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(22): 13037–13046.
- [38] ROWINGS D W, GRACE P R, KIESE R, et al. Environmental factors controlling temporal and spatial variability in the soil-atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O from an Australian subtropical rainforest[J]. Global Change Biology, 2012, 18(2): 726–738.
- [39] SCHAUFLEER G, KITZLER B, SCHINDLBACHER A, et al. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61(5): 683–696.
- [40] GREGO S, MARINARI S, MOSCATELLI M C, et al. Effect of ammonium nitrate and stabilised farmyard manure on microbial biomass and metabolic quotient of soil under *Zea mays* L[J]. Agricoltura Mediterranea, 1998, 128(2): 132–137.
- [41] 周焱, 徐宪根, 王丰, 等. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(qMB, qCO₂) [J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 265–269.
ZHOU Yan, XU Xiangen, WANG Feng, et al. Soil microbial biomass, microbial respiration and its quotient values (qMB, qCO₂) at different elevations in Wuyi Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 265–269. (in Chinese)
- [42] 靳宁, 张东彦, 李振海, 等. 基于多光谱卫星模拟波段反射率的冬小麦水分状况评估[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 243–252.
JIN Ning, ZHANG Dongyan, LI Zhenhai, et al. Water condition assessment of winter wheat based on reflectance of simulated band by multi-spectral satellite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 243–252. (in Chinese)