中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

不同冬季作物对稻田蚯蚓及蚯蚓粪产量的影响

李　超，赵　杨，郭立君，程凯凯，唐海明，黄　敏，汤文光，文　丽，汪　柯，崔　婷，肖小平

Effects of winter crops on the earthworm yield and earthworm cast in paddy fields

LI Chao, ZHAO Yang, GUO Lijun, CHENG Kaikai, TANG Haiming, HUANG Min, TANG Wenguang, WEN Li, WANG Ke, CUI Ting, and XIAO Xiaoping

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200821

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

镉–乙草胺胁迫对蚯蚓–土壤–玉米系统的影响

The combined effects of cadmium and acetochlor on an earthworm–soil–maize system

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 549–558

长江中游稻田种植模式对土壤有机碳及碳库管理指数的影响

Effects of paddy field cropping patterns on soil organic carbon and carbon pool management index in the middle reaches of the Yangtze River

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(7): 1205–1214

不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响

Effects of different winter planting patterns on carbon management index of paddy field

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1163–1171

水肥管理对稻田CH_4排放及其全球增温潜势影响的评估

Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(7): 958–967

冬季作物–双季稻轮作种植模式氮、磷、钾养分循环与产量可持续性特征

Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and sustainability of rice yield in a winter crop–double cropping rice rotation system

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 705–716

紫云英与氮肥配施对早稻干物质生产及氮素吸收利用的影响

Effect of combined application of Chinese milk vetch and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and dry matter accumulation in early rice

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(4): 563–571

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1615−1624

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200821

李超, 赵杨, 郭立君, 程凯凯, 唐海明, 黄敏, 汤文光, 文丽, 汪柯, 崔婷, 肖小平. 不同冬季作物对稻田蚯蚓及蚯蚓粪产量的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1615−1624
LI C, ZHAO Y, GUO L J, CHENG K K, TANG H M, HUANG M, TANG W G, WEN L, WANG K, CUI T, XIAO X P. Effects of winter crops on the earthworm yield and earthworm cast in paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1615−1624

不同冬季作物对稻田蚯蚓及蚯蚓粪产量的影响*

李 超[1], 赵 杨[3], 郭立君[1], 程凯凯[1], 唐海明[1], 黄 敏[2],
汤文光[1], 文 丽[1], 汪 柯[1], 崔 婷[4], 肖小平[1**]

(1. 湖南省土壤肥料研究所 长沙 410125; 2. 湖南农业大学作物环境研究中心 长沙 410128;
3. 湖南省水稻研究所 长沙 410125; 4. 南县农业局 南县 413200)

摘 要: 基于大田调查, 结合 2017—2020 年的降雨量及积温数据, 研究了稻田种植不同冬季作物 (T1, 冬闲; T2, 冬种紫云英; T3, 冬种油菜) 对威廉环毛蚓 (*Pheretima guillelmi*) 产量及蚯蚓粪产量的影响, 以期为稻田蚯蚓增效提供理论及技术支撑。结果表明: 蚯蚓产量、蚯蚓粪产量及冬季作物产量在不同年度间的波动幅度均较大, 不同年度间的蚯蚓产量变异系数 (CV) 与冬季作物产量 CV 值极显著 (P<0.01) 正相关; 2018—2019 年 10—12 月的持续降雨及 12—2 月的低温导致冬季作物及蚯蚓产量大幅下降。蚯蚓产量、蚯蚓粪产量与土壤有机质含量显著正相关 (P<0.05), 与冬季作物产量均呈极显著正相关 (P<0.01)。冬闲、冬种紫云英和冬种油菜的蚯蚓密度分别为 8.4~12.8 条·m^{-2}、11.2~30.8 条·m^{-2} 和 20.4~49.1 条·m^{-2}, 蚯蚓平均密度分别为 10.8 条·m^{-2}、20.7 条·m^{-2} 和 36.3 条·m^{-2}; 蚯蚓产量分别为 290~428 kg·hm^{-2}、368~1054 kg·hm^{-2} 和 763~1845 kg·hm^{-2}, 蚯蚓平均产量分别为 373 kg·hm^{-2}、695 kg·hm^{-2} 和 1364 kg·hm^{-2}; 蚯蚓粪产量分别为 1921~3126 kg·hm^{-2}、3023~10 116 kg·hm^{-2} 和 6034~18 958 kg·hm^{-2}, 蚯蚓粪平均产量分别为 2652 kg·hm^{-2}、6438 kg·hm^{-2} 和 12 545 kg·hm^{-2}; 平均值均表现为油菜>紫云英>冬闲。粪蚓比伴随冬季作物产量的增加而增加, 平均为 8.8。油菜不同产量水平间的蚯蚓产量及蚯蚓粪产量的变幅均小于紫云英。综上, 蚯蚓产量及蚯蚓粪产量受年际间气候干扰较大, 冬季作物高产田块的土壤有机质含量较高, 有利于提高蚯蚓产量、蚯蚓粪产量及其产量稳定性, 且冬种油菜的效果更好。

关键词: 蚯蚓; 蚯蚓粪; 土壤有机质; 产量; 稻田; 冬季作物; 油菜; 紫云英
中图分类号: S154.5 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of winter crops on the earthworm yield and earthworm cast in paddy fields*

LI Chao[1], ZHAO Yang[3], GUO Lijun[1], CHENG Kaikai[1], TANG Haiming[1], HUANG Min[2],
TANG Wenguang[1], WEN Li[1], WANG Ke[1], CUI Ting[4], XIAO Xiaoping[1**]

(1. Hunan Province Soil and Fertilizer Research Institute, Changsha 410125, China; 2. Crop and Environment Research Center, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Hunan Province Rice Research Institute, Changsha 410125, China; 4. Nanxian Agricultural Bureau, Nanxian 413200, China)

* 国家自然科学基金项目 (41807008)、湖南省自然科学基金项目 (2018JJ3305) 和国家重点研发计划项目 (2016YFD0300906) 资助
** 通信作者: 肖小平, 主要从事稻田培肥及农作制研究。E-mail: hntfsxxping@163.com
李超, 主要从事稻田培肥与耕作生态研究。E-mail: hnchaoli0419@163.com
收稿日期: 2020-10-25 接受日期: 2021-02-22

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41807008), the Natural Science Foundation of Hunan Province (2018JJ3305), and the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300906).
** Corresponding author, E-mail: hntfsxxping@163.com
Received Oct. 25, 2020; accepted Feb. 22, 2021

Abstract: There is a large market demand for earthworms; thus, earthworm breeding will increase in the future. However, artificial earthworm breeding faces many problems, such as large labor input, high breeding costs, and difficulty in large-scale breeding. Increased earthworm production by planting winter crops may be an effective way to solve these problems. This study incorporated a field investigation and rainfall and accumulated temperature data from 2017 to 2020 to investigate the effects of different winter crops, including fallow (T1), milk vetch (T2), and rapeseed (T3), on the yield and cast of *Pheretima guillelmi* to provide theoretical and technical support for earthworm production in paddy fields. The results showed that the coefficient of variation (CV) of earthworm yield in different years was positively correlated with the CV of winter crops yield (P<0.01). Continuous rainfall from October to December and low temperatures from December to February from 2018 to 2019 led to a significant decrease in the yields of winter crops and earthworms. The soil organic matter content (average value under three yield levels) was in the order of rapeseed > milk vetch > fallow, and the earthworm yield and earthworm manure yield were significantly positively correlated with the soil organic matter content (P<0.05) and with winter crop yield. The earthworm individuals number per m^2 of fallow, milk vetch, and rapeseed was 8.4−12.8, 11.2−30.8, and 20.4−49.1, respectively, the average earthworm individuals number per m^2 was 10.8, 20.7 and 36.3, respectively. The earthworm yield was 290−428 kg·hm^{-2}, 368−1054 kg·hm^{-2}, and 763−1845 kg·hm^{-2}, respectively, and the average earthworm yield were 373 kg·hm^{-2}, 695 kg·hm$^{-2,}$ and 1364 kg·hm^{-2}, respectively. The earthworm cast yield was 1921−3126 kg·hm^{-2}, 3023−10 116 kg·hm^{-2}, and 6034−18 958 kg·hm^{-2}, respectively, and with the averages of 2652 kg·hm^{-2}, 6438 kg·hm^{-2}, and 12 545 kg·hm^{-2}, respectively. The averages were in the order of rapeseed > milk vetch > fallow. The ratio of cast weight to fresh earthworm weight increased with increasing winter crop yield, with an average value of 8.8; the average values for fallow, milk vetch, and rapeseed were 7.1, 9.1, and 9.0, respectively. Variation in earthworm yield and earthworm cast yield between different yield levels of rapeseed was less than that of milk vetch, indicating that rapeseed was beneficial for higher yield stability for earthworms and earthworm casts. In summary, the yield of earthworms and casts was greatly disturbed by rainfall and accumulated temperature, and the high-yield fields of winter crops had high soil organic matter content, which was conducive to increasing the yields of earthworms and earthworm casts and increasing their stability. Planting rapeseed also had a beneficial effect.

Keywords: Earthworm; Earthworm cast; Soil organic matter; Yield; Paddy field; Winter crop; Rapeseed; Milk vetch

蚯蚓营养丰富, 蛋白质含量占干重的 56%~65%, 蚯蚓自溶液的游离氨基酸含量高达 50~70 g·L^{-2}, 含有 10 种人体必需的氨基酸, 不饱和脂肪酸含量高, 饱和脂肪酸含量低, 微量元素含量丰富, 并因其特殊的生活环境促使体内含有多种活性成分[1]。蚯蚓除可作为传统的中药材原料外, 还可用于提取“蚓激酶”“氨基酸”作为轻工业的重要原料, 以及为现代畜牧业、渔业提供优质的饲料及饵料[2]。因此, 目前市场上的蚯蚓缺口较大, 蚯蚓养殖将是大势所趋, 但蚯蚓人工养殖存在劳动力投入大、养殖成本高及及大规模养殖难度大等难题。中国南方稻区大约有 9.3×10^6 hm^2 冬闲田, 其中 72% 较容易开发利用[3]。冬季的低温高湿气候及冬季作物的旱作环境为蚯蚓提供了良好的生存条件; 同时, 冬季作物的落叶及前茬的稻草秸秆可为蚯蚓提供充足的食物及适宜的生长繁殖条件。因此, 通过在稻田种植冬季作物, 实行水旱轮作, 充分利用冬季的温光水热资源, 挖掘稻田蚯蚓产量潜力, 有利于缓解蚯蚓市场缺口大这一难题。

目前, 在稻田水旱轮作系统仅在小麦 (*Triticum aestivum*)-水稻 (*Oryza sativa*)、油菜 (*Brassica napus*)-水稻系统有过少量关于蚯蚓的报道[4-7], 主要集中在蚯蚓提高水稻产量及稻米品质[4-5,8], 改善土壤结构[9], 活化土壤养分[10-13], 优化土壤微生物群落结构[14] 等方面, 而有关冬季作物对稻田蚯蚓及蚯蚓粪产量的影响研究尚少见相关报道。落叶是蚯蚓的重要食物来源。通常来说, 作物落叶生物量伴随作物生物量的增加而增加[15-16], 且不同作物落叶的 C/N 比不同, 蚯蚓更青睐于取食低 C/N 比的有机物料[17-19]。同一作物在栽培措施一致的条件下, 高地力水平下良好的土壤环境有利于作物高产[20], 其较高的落叶生物量可保障蚯蚓食物的充足供应; 同时, 高地力水平下的土壤有机质含量较高, 其有利于蚯蚓种群的增长[21], 而蚯蚓产生的蚯蚓粪可显著增加后茬作物的地上部生物量及产量[22], 有利于促进稻田水旱轮作系统的可持续性发展。因此, 本研究基于大田调查, 以冬闲田为对照, 拟开展冬季种植紫云英 (*Astragalus sinicus*) 及油菜不同产量水平下的稻田蚯蚓及蚯蚓粪产量差异研究, 以期为促进稻田蚯蚓增效及缓解蚯蚓市场缺口提供一定理论及技术支撑。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域与供试材料

研究区域地处湖南省益阳市南县三仙湖镇, 年平均气温 16.6 ℃, 降水量 1237.7 mm, 雨日 136.3 d, 日照时数 1775.7 h, 蒸发量 1236.2 mm。属亚热带过渡到季风湿润气候类型。土壤类型为紫潮泥黏土。该区域采用水旱轮作模式, 淹水季种植水稻, 旱作季种

植冬季作物紫云英及油菜, 品种分别为‘湘紫 1 号’和‘华湘油 16 号’, 均采用免耕直播栽培。

蚯蚓鉴定主要参照《中国动物图谱——环节动物》[23] 和《中国土壤动物检索图鉴》[24]。经鉴定, 该研究区域的优势蚯蚓种群为土壤中自然存在的深栖类表土排粪的威廉环毛蚓 (*Pheretima guillelmi*)[4], 其在冬季作物生长季由田埂等周边生境陆续迁至田间进行生长繁殖, 水稻生长季灌水后由田间迁至田埂等周边生境进行避难过渡。因此, 本研究仅研究冬季作物生长期内的蚯蚓 (威廉环毛蚓) 及蚯蚓粪产量。

1.2　研究设计

同一区域同一土壤类型下, 稻田不同冬季作物不同产量水平下的落叶类型、落叶产量等差异较大, 进而可能影响蚯蚓的生长繁殖。因此, 为探明自然生产条件下不同冬季作物不同产量水平间的蚯蚓及蚯蚓粪产量差异, 本研究基于 2017—2020 年的大田调查, 以冬闲 (T1) 为对照, 将冬种紫云英 (T2) 及油菜 (T3) 的不同田块的产量划分为低、中、高 3 类, 分别为低产紫云英 (T2-L)、中产紫云英 (T2-M)、高产紫云英 (T2-G)、低产油菜 (T3-L)、中产油菜 (T3-M)、高产油菜 (T3-G), 共计 7 个调查处理。每个调查处理挑选有代表性的田块 5 块, 每个田块面积 2000 m^2 左右。种植冬季作物的田块在水稻收获后, 及时用开沟机开好厢沟、围沟和腰沟, 沟深 15~20 cm, 沟宽 20~30 cm, 做到沟沟相通。紫云英 10 月中旬播种, 播种量为 22.5 $kg·hm^{-2}$, 油菜 10 月中旬播种, 采用免耕直播栽培, 播种、施肥及病虫草害管理参照作者已发表文章[25]。

1.3　测定项目与方法

降雨量及气温: 数据来源于湖南省益阳市南县气象局, 包括 2017—2020 年冬季作物生长期 (10 月至翌年 4 月) 的逐日平均气温、逐日降雨量。5 ℃为蚯蚓的生物学起点温度, 低于 5 ℃蚯蚓进入休眠状态。故活动积温 $Y=N\times T$, N 为气温≥5 ℃的天数, T 为气温≥5 ℃的平均气温; 有效积温 $K=N(T-5)$。

土壤有机质: 2020 年油菜成熟期及紫云英翻压前, 每个调查田块用土钻按棋盘法选取 15 个点, 取 0~20 cm 耕层土壤, 室内风干除杂后, 采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测量土壤有机质含量。

冬季作物测产: 2020 年油菜成熟期, 每个田块按 5 点取样法选取 5 个取样点, 每个取样点测量 4 m^2, 脱粒风干后称取干重, 然后以 9% 的籽粒含水量计算油菜产量。紫云英盛花期, 挑晴朗天气在每个田块选取 5 个取样点, 每个取样点测量 1 m^2, 称鲜重测产。

蚯蚓及蚯蚓粪测产: 在油菜及紫云英测产后, 对应每个田块按对角线取样法, 每条对角线取样 7 个点, 共 13 个点, 每个点测量 1 m^2, 取样深度 20 cm, 将蚯蚓人工挖出并计数, 去除泥土等杂物后称鲜重。同时在每个调查点内选取 40 cm×30 cm 的代表性样方, 将其土壤表层蚯蚓粪收集带回实验室, 去除秸秆、福寿螺壳等杂物后风干称重。最后按 0.9 的厢面系数 (厢宽 : 沟宽=9 : 1) 折算冬季作物生长期内的蚯蚓及蚯蚓粪产量。此处, 水稻生长季灌溉阶段 (5 月下旬至 9 月中旬), 蚯蚓无法生存, 水稻生育后期 (9 月下旬至 10 月上旬) 断水后, 虽有幼龄蚯蚓逐渐迁入田埂附近区域, 但蚯蚓粪产量极低, 可忽略。因此, 本文中的蚯蚓粪产量被视为冬季作物生长期内蚯蚓所产生的粪的产量。

蚯蚓个体生物量(鲜重) = 单位面积蚯蚓产量(鲜重)/单位面积蚯蚓密度　　(1)

蚯蚓粪个体产量 = 单位面积蚯蚓粪产量/单位面积蚯蚓密度(鲜重)　　(2)

粪蚓比=蚯蚓粪个体产量/蚯蚓个体生物量(鲜重)　　(3)

变幅为 T2 或 T3 模式下 3 个冬季作物产量水平 (L、M、G) 各指标值的最大值减去最小值再除以平均值。

变异系数(CV) = 标准差×100/年度平均值　　(4)

1.4　数据处理

运用 SPSS Statistics 21、Excel 2007 实用数据分析软件对试验数据进行统计分析和作图。

2　结果与分析

2.1　试验期间降雨量和气温的变化特征

表 1 表明: 不同年度间冬季作物生长期内的降雨量差异较大, 2018—2019 年 10—12 月的降雨量占总降雨量的 43.1%, 而 2017—2018 年、2019—2020 年仅分别为 21.7%、21.3%。2018—2019 年 10 月、11 月、12 月的降雨量分别为 2017—2018 年的 1.9 倍、1.9 倍和 9.0 倍, 为 2019—2020 年的 1.9 倍、2.3 倍和 3.1 倍。降雨量 CV 值较大的月份主要集中在 10 月至翌年 2 月, 在 32.6%~97.5% 波动, 表现为 12 月>11 月>10 月>1 月>2 月。结果表明 10—12 月是造成不同年度间冬季作物生长期内降雨量差异的关键月份。

表 2 表明: 冬季作物生长期 (10 月至翌年 4 月) 内, 连续 3 年气温≤5 ℃的月份均出现在 12 月至翌年 1 月, 且不同年度间的霜冻 (≤0 ℃) 天数波动

表 1 2017—2020 年试验区冬季作物生育期内的降雨量

Table 1 Rainfall during the growing season of winter crops in 2017−2020 in the study area

月份 Month	降雨量 Rainfall (mm)				CV (%)
	2017—2018	2018—2019	2019—2020	平均 Mean	
10	48.7	90.1	48.3	62.4	38.5
11	52.4	96.8	41.8	63.7	45.8
12	9.3	84.0	26.9	40.1	97.5
1	101.6	51.4	104.6	85.9	34.8
2	43.5	85.9	77.8	69.1	32.6
3	129.1	130.8	115.9	125.3	6.5
4	124.0	89.5	134.7	116.1	20.4
累计 Accumulation	508.6	628.5	550.0	562.4	10.8

表 2 2017—2020 年研究区冬季作物生育期内的积温

Table 2 Accumulated temperature during the growing season of winter crops in 2017−2020 in the study area

月份 Month	≤5 ℃天数 Days with ≤5 ℃ (d)					活动积温 Active accumulated temperature (℃)					有效积温 Effective accumulated temperature (℃)				
	2017—2018	2018—2019	2019—2020	平均 Mean	CV (%)	2017—2018	2018—2019	2019—2020	平均 Mean	CV (%)	2017—2018	2018—2019	2019—2020	平均 Mean	CV (%)
10	0	0	0	0	0	542.5	580.5	604.5	575.8	5.4	387.5	425.5	449.5	420.8	7.4
11	0	0	0	0	0	391.5	399.5	420	403.7	3.6	241.5	249.5	270	253.7	5.8
12	2(0)	14(5)	1(0)	5.7(1.7)	127.7	249	163	265	225.7	24.3	109	78	115	100.7	19.7
1	14(10)	17(2)	11(0)	14(4)	21.4	123.5	92.5	133	116.3	18.2	38.5	22.5	33	31.3	25.9
2	5(0)	16(2)	2(0)	7.7(0.7)	96.1	215	98	279.5	197.5	46.6	100	38	144.5	94.2	56.8
3	0	0	0	0	0	448	410	429.5	429.2	4.4	293	255	274.5	274.2	6.9
4	0	0	0	0	0	598	562	530	563.3	6.0	448	412	380	413.3	8.2
12—2	2(10)	47(9)	14(0)	27.3(6.4)	63.6	587.5	353.5	677.5	539.5	31.0	82.5	46.2	97.5	75.4	35.0
10—4	21(10)	47(9)	14(0)	27.3(6.4)	63.6	2567.5	2305.5	2661.5	2511.5	7.3	1617.5	1480.5	1666.5	1588.2	6.1

括号内的数据代表日平均气温≤0 ℃的霜冻天数。The data in brackets represents the number of days with an average daily temperature ≤0 ℃.

较大。≤5 ℃及霜冻期主要集中在 1 月。不同年份间冬季作物生长期内的活动积温差异较小, CV 值仅为 7.3%, 但 12 月至翌年 2 月的活动积温 CV 值达 31.0%, 其中 2018—2019 年的活动积温最低, 仅为 353.5 ℃, 较 2017—2018 年、2019—2020 年分别降低 39.8%、47.8%。2018—2019 年 12 月、1 月、2 月的活动积温较 2017—2018年分别降低 34.5%、25.1%、54.4%, 较 2019—2020 年分别降低 38.5%、30.5%、64.9%。不同年度间及不同月份间的有效积温差异的表现规律同活动积温一致。表明不同年份间冬季作物生长期内的积温差异较大, 主要集中在 12 月至翌年 2 月的低温期。

2.2 冬季作物产量

2019 年紫云英 (T2) 平均产量较 2018 年和 2020 年分别减少 33.5% 和 37.3%, 2019 年油菜 (T3) 平均产量较 2018 年和 2020 年分别减少 20.3% 和 36.5%。2019 年的紫云英产量变幅较 2018 年、2020 年分别增加 15.0 个百分点、23.4 个百分点, 油菜分别增加 5.8 个百分点、30.5 个百分点, T2 的平均变幅较 T3 增加 63.1 个百分点。紫云英的产量 CV 值变化范围为 19.0%~30.2%, 表现为 T2-M>T2-L>T2-G。油菜产量 CV 值变化范围为 17.9%~37.9%, 表现为 T3-L>T3-M>T3-G。油菜产量 CV 值变化范围大于 T2, 但 T3 的平均 CV 值较 T2 仅增加 2.4%, 未达显著差异(表 3)。结果表明同一冬季作物不同年份间的产量变幅差异较大, 高产田块的冬季作物产量变异小, 稳产性更好, 以冬种油菜效果最佳。

2.3 土壤有机质

土壤有机质含量 (3 种产量水平的均值) 表现为 T3>T2>T1, 冬种紫云英及油菜的土壤有机质含量较冬闲分别增加 10.1%、16.0%(图 1)。冬种紫云英及油菜条件下, 土壤有机质含量均伴随冬季作物产量的增加而显著递增 (P<0.05)。表明种植冬季作物有利于提高土壤的有机质含量, 其中冬种油菜效果更好。

2.4 蚯蚓产量

从表 4 可知, T1 的蚯蚓密度及蚯蚓产量范围分别为 8.4~12.8 条·m^{-2} 和 290~428 kg·hm^{-2}, T2 分别为 11.2~30.8 条·m^{-2} 和 368~1054 kg·hm^{-2}, T3 分别为 20.4~49.1 条·m^{-2} 和 763~1845 kg·hm^{-2}, 平均蚯蚓密度及蚯蚓产量均表现出 T3>T2>T1, T2 和 T3 的平均蚯蚓密度较 T1 分别显著增加 91.7% 和 236.1% (P<0.05),

表 3　2018—2020 年冬季作物产量

Table 3　Yields of winter crops in 2018−2020

冬季作物 Winter crop	产量水平 Yield level	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm^{-2})				CV (%)
			2018	2019	2020	平均 Mean	
紫云英 Milk vetch	低 Low	T2-L	6288c	4281c	8284c	6284c	24.5b
	中 Middle	T2-M	21 020b	11 651b	20 964b	17 878b	30.2a
	高 High	T2-G	36 489a	26 464a	38 406a	33 786a	19.0c
	平均 Mean		21 266	14 132	22 551	19 316	24.6
	变幅 Variation (%)		142	157	133.6	142.4	
油菜 Oilseed rape	低 Low	T3-L	830c	606c	1280c	905c	37.9 a
	中 Middle	T3-M	1409b	1167b	1738b	1438b	19.9b
	高 High	T3-G	2102a	1687a	2427a	2072a	17.9b
	平均 Mean		1447	1153	1815	1472	25.2
	变幅 Variation (%)		87.9	93.7	63.2	79.3	

不同小写字母代表在P<0.05水平同种作物不同产量水平差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among different yield levels of the same crop at P<0.05 level.

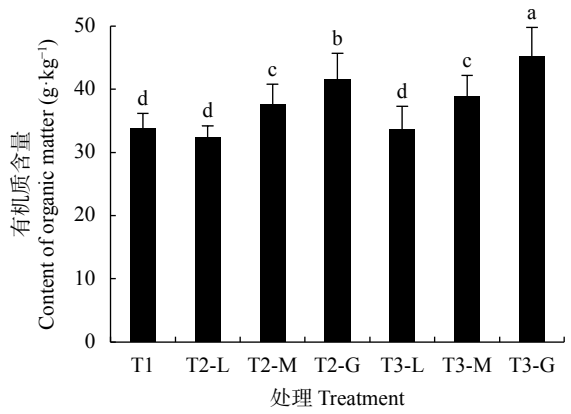

图 1　不同冬季作物条件下的土壤有机质含量

Fig. 1　Effects of different winter crops and their yield levels on the content of soil organic matter

不同小写字母代表 P<0.05 水平不同处理间差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at P<0.05 level.

T2 和 T3 的平均蚯蚓产量较 T1 分别显著增加 86.2% 和 265.2%, T3 的平均蚯蚓密度及蚯蚓产量较 T2 分别显著增加 75.4% 和 96.1%。同时, 蚯蚓密度及产量在不同年度间均表现出较大的波动。冬种紫云 (T2) 条件下, 密度 CV 值伴随紫云英产量的增加呈现先增后降的趋势, 而冬种油菜 (T3) 条件下, 则伴随油菜产量的增加而降低, 但均以 T2-G 和 T3-G 的蚯蚓密度 CV 值最低。蚯蚓个体生物量表现为 T3>T1>T2, T3 的个体生物量较 T2、T1 分别增加 11.9% 和 8.7%。T2、T3 不同年度间的平均蚯蚓密度及产量均伴随冬季作物产量的增加而增加, 且 T2 不同年度间的平均蚯蚓密度及产量变幅大于 T3, 较 T3 分别增加 17.1 个百分点及 17.0 个百分点。表明冬季作物高产的田块, 其蚯蚓产量与产量稳产性也较高, 以冬种油菜效果更好。

表 4　不同冬季作物条件对蚯蚓密度、产量及个体生物量的影响

Table 4　Effects of different winter crops and their yield levels on earthworm density, yield, and individual biomass

年份 Year	指标 Index	T1	T2				T3			
			L	M	G	平均 Mean	L	M	G	平均 Mean
2018	密度 Density (×10^4 individuals·hm^{-2})	11.3±0.4f	16.1±0.6e	22.3±0.8d	28.4±1.1cd	22.3	32.9±1.1c	40.2±1.4b	49.1±1.8a	40.7
	产量 Yield (kg·hm^{-2})	402±15g	553±18f	724±22e	935±41d	737	1224±38c	1476±49b	1842±68a	1514
	个体生物量 Individual biomass (g)	3.6±0.1b	3.4±0.1bc	3.3±0.0c	3.3±0.1c	3.3	3.7±0.1a	3.7±0.1a	3.8±0.2a	3.7
2019	密度 Density (×10^4 individuals·hm^{-2})	8.4±0.2e	11.2±0.3de	14.6±0.5d	20.2±0.7c	15.3	20.4±0.6c	26.7±0.9b	33.6±1.2a	26.9
	产量 Yield (kg·hm^{-2})	290±10e	368±13de	480±16d	681±21c	510	763±23c	983±31b	1247±42a	998
	个体生物量 Individual biomass (g)	3.5±0.1b	3.3±0.0c	3.3±0.1c	3.4±0.1bc	3.3	3.7±0.1a	3.7±0.2a	3.7±0.1a	3.7
2020	密度 Density (×10^4 individuals·hm^{-2})	12.8±0.4g	17.6±0.5f	25.3±1.1e	30.8±1.2d	24.6	35.6±1.3c	40.2±1.5b	48.4±1.5a	41.4
	产量 Yield (kg·hm^{-2})	428±11g	592±15f	871±34e	1054±40d	839	1371±44c	1520±51b	1845±56a	1579
	个体生物量 Individual biomass (g)	3.3±0.0b	3.4±0.1b	3.4±0.1b	3.4±0.1b	3.4	3.9±0.2a	3.8±0.2a	3.8±0.1a	3.8
平均 Mean	密度 Density (×10^4 individuals·hm^{-2})	10.8	15.0	20.7	26.5		29.6	35.7	43.7	
	产量 Yield (kg·hm^{-2})	373	504	692	890		1120	1327	1645	
	个体生物量 Biomass per individual (g)	3.5	3.4	3.3	3.4		3.8	3.7	3.8	
CV (%)	密度 Density	20.6	22.4	26.2	21.0		27.4	21.8	20.0	
	产量 Yield	19.7	23.8	28.5	21.3		28.3	22.5	20.9	
	个体生物量 Individual biomass	3.2	2.2	3.0	2.0		1.9	1.6	1.3	

不同小写字母代表P<0.05水平不同处理间差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at P<0.05 level.

2.5 蚯蚓粪产量

总体上看, 蚯蚓粪产量表现出同蚯蚓产量相似的趋势 (表 5)。T1、T2、T3 的蚯蚓粪产量范围分别为 1921~3126 kg·hm^{-2}、3023~10 116 kg·hm^{-2} 和 6034~18 958 kg·hm^{-2}, 个体蚯蚓粪产量范围分别为 22.9~25.8 g·条$^{-1}$、27.0~33.8 g·条$^{-1}$ 和 29.6~39.2 g·条$^{-1}$, 均表现出 T3>T2>T1。T2、T3 的平均蚯蚓粪产量较 T1 分别显著增加 142.7% 和 373.0%, 平均蚯蚓粪个体产量分别显著增加 25.2% 和 38.9%。T2、T3 不同产量水平间的蚯蚓粪产量在不同年度间的波动规律同前文的蚯蚓产量。T3 的平均蚯蚓粪产量及个体产量较 T2 分别显著增加 94.9% 和 11.0%。T2、T3 不同年度间的平均蚯蚓粪产量及个体产量均伴随冬季作物产量的增加而增加, 且 T2 不同年度间的平均蚯蚓粪产量变幅较 T3 增加 14.6 个百分点, 而蚯蚓粪个体产量变幅较 T3 仅降低 1.6 个百分点。表明冬季作物高产的田块, 其蚯蚓粪产量与产量稳产性也较高, 冬种油菜效果更好。

表 5 不同冬季作物对蚯蚓粪产量及个体产量的影响

Table 5 Effects of different winter crops and their yield levels on yield of earthworm cast

年份 Year	指标 Index	T1	T2				T3			
			L	M	G	平均 Mean	L	M	G	平均 Mean
2018	蚯蚓粪产量 Earthworm cast yield (kg·hm^{-2})	2910±113f	4913±218e	6902±297d	9587±349c	7134	10 534±372c	13 836±523b	18 043±741a	14 138
	个体蚯蚓粪产量 Cast yield per earthworm (g)	25.8±1.1c	30.5±1.3b	31.0±1.5b	33.8±1.2ab	31.7	32.0±1.2b	34.4±1.3ab	36.7±1.4a	34.4
2019	蚯蚓粪产量 Earthworm cast yield (kg·hm^{-2})	1921±87e	3023±119de	4102±178d	6117±268c	4414	6034±232c	8193±311b	10 736±345a	8321
	个体蚯蚓粪产量 Cast yield per earthworm (g)	22.9±1.1d	27.0±1.2c	28.1±1.4bc	30.3±1.4ab	28.5	29.6±1.2b	30.7±1.3ab	32.0±1.4a	30.7
2020	蚯蚓粪产量 Earthworm cast yield (kg·hm^{-2})	3126±121f	5134±214e	8045±322d	10 116±366cd	7765	11 836±412c	14 736±527b	18 958±702a	15 177
	个体蚯蚓粪产量 Cast yield per earthworm (g)	24.4±1.0e	29.2±1.2d	31.8±1.2cd	32.8±1.3c	31.3	33.2±1.3c	36.7±1.4b	39.2±1.6a	36.4
平均	蚯蚓粪产量 Earthworm cast yield (kg·hm^{-2})	2652	4357	6350	8607		9468	12 255	15 912	
	个体蚯蚓粪产量 Cast yield per earthworm (g)	24.3	28.9	30.3	32.3		31.6	33.9	36.0	
CV(%)	蚯蚓粪产量 Earthworm cast yield	24.2	26.6	31.9	25.2		32.2	28.9	28.3	
	个体蚯蚓粪产量 Cast yield per earthworm	6.0	6.1	6.4	5.6		5.8	8.9	10.2	

不同小写字母代表P<0.05水平不同处理间差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at P<0.05 level.

2.6 粪蚓比

T1、T2 和 T3 不同产量水平下的平均粪蚓比分别为 7.1、9.1 和 9.0, 平均为 8.8, 说明稻田每 1 kg 威廉环毛蚯蚓可产生 8.8 kg 蚯蚓粪。T1 的粪蚓比显著低于 T2、T3, T2、T3 不同产量水平下的平均粪蚓比相对 T1 分别增加 28.2% 和 26.8%, T2 相对 T3 仅增加 1.1%, 未达显著差异。同一模式下, 粪蚓比伴随冬季作物产量的增加而增加, T2、T3 不同产量水平下的粪蚓比变幅表现为 T3>T2, 分别为 11.6% 和 14.3%。表明种植冬季作物可显著提高粪蚓比, 且冬季作物高产田块的粪蚓比更高 (图 2)。

2.7 蚯蚓产量、蚯蚓粪产量与作物产量、土壤有机质的相关分析

蚯蚓产量、蚯蚓粪产量与土壤有机质含量均显著 (P<0.05) 正相关 (图 3a, d), 与紫云英鲜草产量及油菜产量均呈极显著 (P<0.01) 正相关 (图 3b, c, e, f)。同时, 前文已证实不同年度间冬季作物生长期内的降雨及积温差异较大, 导致不同年度间的蚯蚓产量、蚯蚓粪产量及冬季作物产量波动较大, 且蚯蚓及蚯

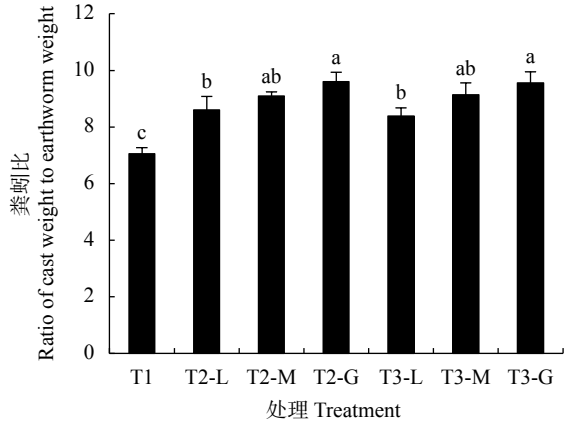

图 2 不同冬季作物对粪蚓比的影响

Fig. 2 Effects of different winter crops and their yield levels on the ratio of cast weight to earthworm weight

不同小写字母代表 P<0.05 水平不同处理间差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at P<0.05 level.

蚓粪不同年度间的产量 CV 值与冬季作物产量 CV 值极显著正相关 (图 4)。因此, 冬季作物高产田块, 其土壤有机质含量较高, 有利于提高蚯蚓产量、蚯蚓粪产量及其产量稳定性。

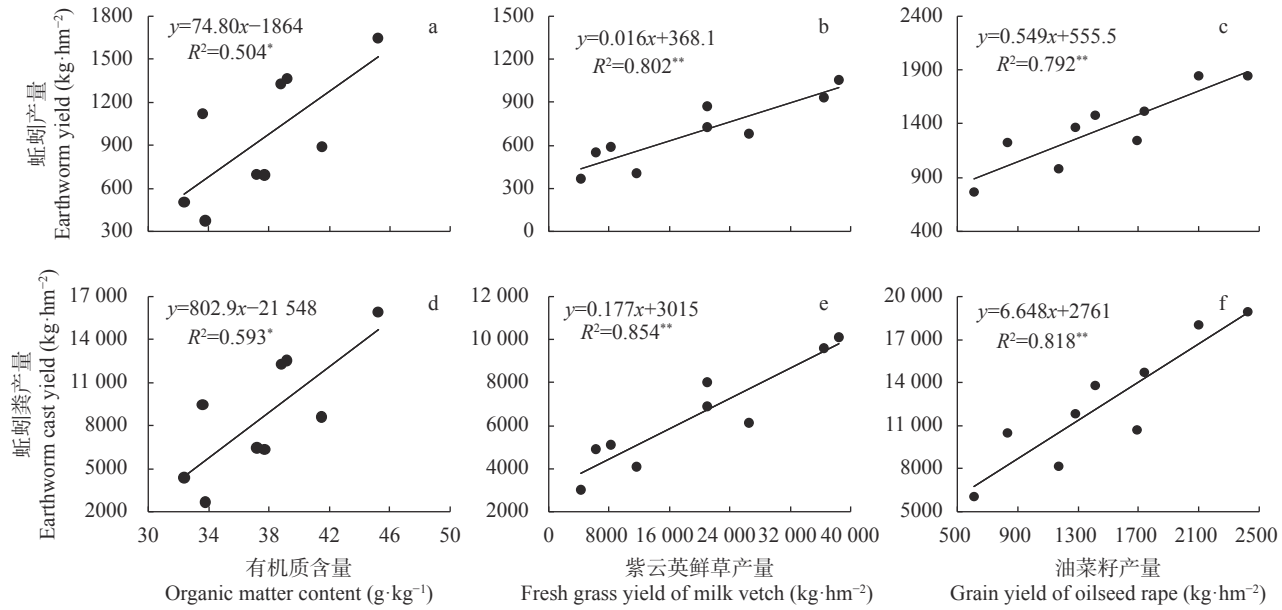

图 3　蚯蚓产量 (a, b, c) 及蚯蚓粪产量 (d, e, f) 与土壤有机质和冬季作物紫云英、油菜产量的相关系

Fig. 3　Correlations of earthworm yield (a, b, c) and earthworm cast yield (d, e, f) with soil organic matter content and yields of winter crop of milk vetch and oilseed rape

*和**分别表示在 $P<0.05$ 及 $P<0.01$ 水平显著相关及极显著相关, * and ** indicate significant and highly significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

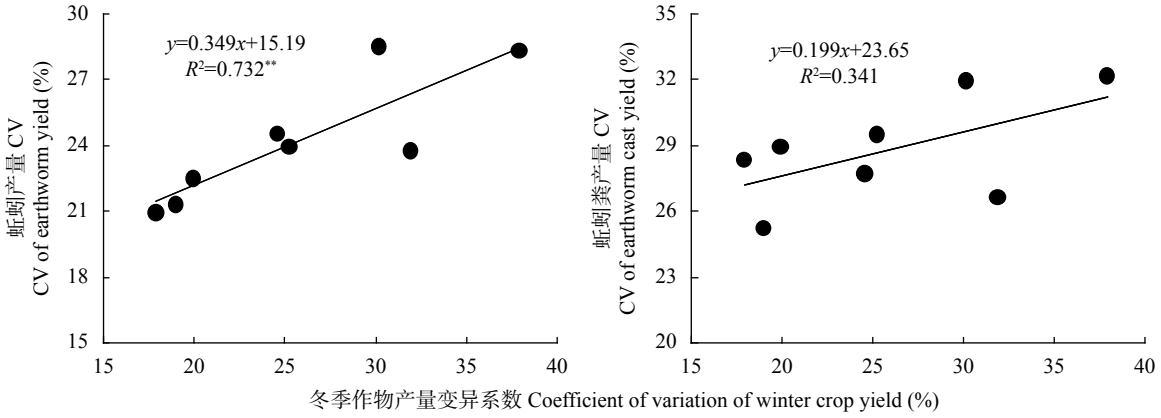

图 4　冬季作物产量变异系数 (CV) 与蚯蚓产量及蚯蚓粪产量变异系数 (CV) 间的相关性

Fig. 4　Correlations of coefficients of variation (CV) of earthworm yield, earthworm cast yield with winter crop yield

3　讨论

冬季作物易受持续阴雨及低温冻害等不利气候的影响[26]。如油菜产量与苗期日平均气温呈显著正相关, 与全生育期降雨量呈负相关, 其中冬前苗期持续降雨导致的减产风险最大[26-27]。蚯蚓属中温型湿生动物, 对土壤温度和湿度变化较为敏感, 蚯蚓生长繁殖的最适温度为 20~25 ℃, 最适湿度为 35%~60%, 且土壤湿度对幼蚓孵化的影响明显强于土壤温度[28-29]。本研究表明, 不同月份在 2017—2020 年的降雨量及积温 CV 值的波动幅度均较大, 表现为降雨量大于积温, 且降雨量及积温差异最大的月份分别集中在 10—12 月、12—2 月, 2018—2019 年 10—12 月的持续降雨及 12—2 月的持续低温导致了蚯蚓的大幅减产, 这与刘满强等[30] 研究证实的蚯蚓种群的季节波动性强的研究结果一致。这主要由于 10—12 月的强降雨易导致免耕稻田渍水, 抑制了蚯蚓种群的增长, 降低了稻田蚯蚓前期繁殖的基数。同时渍水易导致油菜等冬季作物烂根、叶片功能锐减, 植株水分亏缺严重, 渍害消除后恢复生长慢, 生物量

大幅下降[31-32], 导致可供蚯蚓取食的落叶数量大幅减少, 从而进一步抑制了蚯蚓种群的增长, 这在本研究中冬季作物的产量 CV 值与蚯蚓产量 CV 值呈极显著正相关的结果中进一步得到验证。

与冬闲相比, 种植冬季作物可显著增加蚯蚓的密度及产量[4,33]。Huang 等[4] 研究发现, 冬种油菜较冬闲可显著增加蚯蚓 (*Pheretima guillelmi*) 密度 68%~154%。本研究表明: 冬种紫云英、油菜的蚯蚓密度较冬闲分别显著增加 91.7% 和 236.1%, 蚯蚓产量较冬闲分别显著增加 86.2% 和 265.2%, 这可能主要由于冬种油菜或紫云英条件下的落叶为蚯蚓提供了充足的食物, 从而促进种群的增长。同时, 覆盖植被类型决定了归还土壤的有机物数量和质量, 也是影响蚯蚓种群分异的主要驱动因子[30,34]。蚯蚓更青睐于取食低 C/N 比的有机物料, 如种植豆科作物更有利于促进蚯蚓种群密度及产量的增加[33,35]。Hubbard 等[19] 证实, 与小麦-玉米 (*Zea mays*) 轮作相比, 大豆 (*Glycine max*)-玉米轮作可显著增加蚯蚓 (*Aporrectodea trapezoides*) 密度 96.8%, 产量增加 31.5%。Bilalis 等[36] 证实, 相比棉花 (*Gossypium* spp.), 豆科作物更有利于蚯蚓种群的增长。但本研究表明: 冬种油菜条件下的蚯蚓密度、蚯蚓产量及蚯蚓粪产量均显著高于豆科植物紫云英, 可能是因为冬种油菜条件下的土壤有机质含量高于紫云英, 而高有机质含量的土壤更有利于蚯蚓种群的生长繁殖。同时, 也可能与蚯蚓更喜欢取食油菜落叶有关。

通常来说, 在相同的外界环境条件下, 作物生物量与作物产量呈正相关关系[37]。因此, 高产田块的作物秸秆或落叶的数量高于中、低产田块, 从而增加了可供蚯蚓取食的食物来源, 有利于蚯蚓种群的生长繁殖。本研究表明: 免耕条件下蚯蚓密度、蚯蚓产量、蚯蚓粪产量及粪蚓比均伴随紫云英及油菜产量的增加而显著增加, 这表明蚯蚓产量与冬季作物产量是协同互促的关系, 冬季作物高产田块的土壤环境有利于增加蚯蚓种群, 促进免耕条件下土壤表层蚯蚓粪的积累。本研究中蚯蚓每年可产蚯蚓粪 1.9~11.9 t·hm^{-2}, 这低于竹林的 42.6 t·hm^{-2}[38], 玉米及木薯 (*Manihot esculenta*) 系统中的 15.2~432.0 t·hm^{-2}[39], 这可能主要是因为气候及作物系统的差异所致。土壤表层的蚯蚓粪主要功能有: ①减少土壤蒸发, 蒸发量伴随蚯蚓粪覆盖度和厚度的增加而减小[40]。②增加土壤有机质含量, 新鲜蚯蚓粪的有机质含量可达土壤有机质含量的 3.5 倍, 有机质能够促进团聚体结构的形成, 增加土壤孔隙, 增强土壤保水性能[40-42]。③加速土壤养分矿化及循环[43]。④增加有益微生物种群, 优化微生物群落结构[14]。蚯蚓粪通过以上功能直接或间接地促进作物根系生长及地上部生物量的积累, 提高作物产量[22,44], 最终实现作物产量与蚯蚓产量的协同提高。

本研究只基于大田调查开展了不同冬季作物对蚯蚓及蚯蚓粪产量的初步探索, 年限较短, 应开展长期跟踪研究, 进一步明确气候、冬季作物产量及蚯蚓产量三者之间的关系。同时, 下一步应开展室内盆栽实验及大田小区试验, 就冬季作物落叶数量及质量对蚯蚓生长繁殖的影响进一步开展相关研究。

4 结论

冬季作物、蚯蚓产量及蚯蚓粪产量在不同年度间的波动幅度均较大, 10—12 月的持续降雨及 12 月至翌年 2 月的低温是导致 2018—2019 年冬季作物及蚯蚓产量大幅下降的关键因素。蚯蚓产量、蚯蚓粪产量与土壤有机质含量显著正相关, 与冬季作物产量均呈极显著正相关。蚯蚓密度、蚯蚓产量及蚯蚓粪产量均表现为冬种油菜>冬种紫云英>冬闲, 且油菜不同产量水平间的蚯蚓产量及蚯蚓粪产量的变幅均小于紫云英。粪蚓比伴随冬季作物产量的增加而增加, 平均为 8.8。综上, 蚯蚓产量及蚯蚓粪产量受不同年际间的气候干扰较大, 冬季作物高产田块的土壤有机质含量较高, 有利于提高蚯蚓产量、蚯蚓粪产量及其产量稳定性, 且冬种油菜的效果更好。

参考文献 References

[1] 武金霞, 赵晓瑜. 蚯蚓体内生物活性成分的研究[J]. 自然杂志, 2004, 26(1): 27−30
WU J X, ZHAO X Y. Study on biological active components from earthworm[J]. Nature Magazine, 2004, 26(1): 27−30

[2] 宾冬梅. 蚯蚓的开发利用研究进展[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2006, (4): 457−460
BIN D M. Research progress on development and utilization of earthworms[J]. Journal of Hunan Environment-Biological Polytechnic, 2006, (4): 457−460

[3] 谭淑豪. 南方冬闲田季节性规模经营模式分析[J]. 农业经济问题, 2010, 31(5): 62−65, 111
TAN S H. The strategic significance of developing winter fallow farmland in Southern China and seasonal scale management mode and development strategy[J]. Issues in Agricultural Economy, 2010, 31(5): 62−65, 111

[4] HUANG M, ZHAO C R, ZHOU X F, et al. Earthworm responses to cropping rotation with oilseed rape in no-tillage rice fields and the effects of earthworm casts on human-essential amino acid content in rice grains[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 127: 58−63

[5] 赵春容. 油菜田蚯蚓粪便对水稻产量形成和稻米食味营养品

质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018
ZHAO C R. Effects of earthworm feces produced in oilseed rape fields on yield formation and eating and nutritional quality in rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018

[6] 王霞, 胡锋, 李辉信, 等. 秸秆还田情况下蚯蚓活动对稻麦轮作土壤磷素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 341−344
WANG X, HU F, LI H X, et al. Effects of earthworm activity on soil phosphorus in wheat-rice soil receiving corn straw[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2004, 23(2): 341−344

[7] 胡锋, 王霞, 李辉信, 等. 蚯蚓活动对稻麦轮作系统中土壤微生物量碳的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 965−969
HU F, WANG X, LI H X, et al. Effects of earthworms on soil microbial biomass carbon in rice-wheat rotation agro-ecosystem[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(6): 965−969

[8] HUANG M, ZHOU X F, XIE X B, et al. Rice yield and the fate of fertilizer nitrogen as affected by addition of earthworm casts collected from oilseed rape fields: a pot experiment[J]. PLoS One, 2016, 11(11): e0167152

[9] BOTTINELLI N, ZHOU H, CAPOWIEZ Y, et al. Earthworm burrowing activity of two non-Lumbricidae earthworm species incubated in soils with contrasting organic carbon content (Vertisol vs. Ultisol)[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(8): 951−955

[10] 李双喜, 郑宪清, 袁大伟, 等. 生物耕作对土壤理化特性、酶活性及青花菜生长和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1018−1023
LI S X, ZHENG X Q, YUAN D W, et al. Effects of biological tillage on physicochemical properties and soil enzyme activity and growth and quality of *Brassica oleracea* var. *italica*[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1018−1023

[11] 于建光, 李辉信, 陈小云, 等. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 818−824
YU J G, LI H X, CHEN X Y, et al. Effects of straw application and earthworm inoculation on soil labile organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 818−824

[12] 刘宾. 蚯蚓活动对土壤氮素矿化及微生物生物量的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2006
LIU B. Effects of earthworms on soil nitrogen mineralization and microbial biomass[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006

[13] 刘德辉, 胡锋, 胡佩. 蚯蚓活动对红壤磷素有效性的影响及其活化机理研究[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2299−2306
LIU D H, HU F, HU P. Influence of earthworm activities on phosphorus availability of red soil and activated mechanism induced by earthworm[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2299−2306

[14] SHEEHAN C, KIRWAN L, CONNOLLY J, et al. The effects of earthworm functional diversity on microbial biomass and the microbial community level physiological profile of soils[J]. European Journal of Soil Biology, 2008, 44(1): 65−70

[15] 杨光, 冯云艳, 张含笑, 等. 不同磷素籽粒生产效率类型油菜的物质生产及农艺性状[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(6): 778−787
YANG G, FENG Y Y, ZHANG H X, et al. Agronomic characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.) in different phosphorus use efficiency for grain production[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(6): 778−787

[16] 陈秀斌. 不同熟期油菜品种在早晚播下生长发育及产量比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013
CHEN X B. Comparative study on growth development and yield of different maturity canola varieties in early and late sowing date[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013

[17] 王争妍, 雷紫烟, 叶志雄, 等. 蚯蚓作用下不同C/N秸秆还田对土壤CO_2及N_2O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1908−1915
WANG Z Y, LEI Z Y, YE Z X, et al. Influence of earthworm activity on soil CO_2 and N_2O emissions by incorporating different C/N residues[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1908−1915

[18] DRESBØLL D B, RASMUSSEN I S, THORUP-KRISTENSEN K. The significance of litter loss and root growth on nitrogen efficiency in normal and semi-dwarf winter oilseed rape genotypes[J]. Field Crops Research, 2016, 186: 166−178

[19] HUBBARD V C, JORDAN D, STECKER J A. Earthworm response to rotation and tillage in a Missouri claypan soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(4): 343−347

[20] 王寅, 李小坤, 李雅颖, 等. 红壤不同地力条件下直播油菜对施肥的响应[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 121−129
WANG Y, LI X K, LI Y Y, et al. Responses of direct-seeding rapeseed to fertilization in fields of red soil different in fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 121−129

[21] 王邵军, 王红, 李霁航. 不同土地利用方式对蚯蚓数量及生物量分布的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 118−123
WANG S J, WANG H, LI J H. Effects of different land use types on spatial-temporal distribution of earthworm density and biomass[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 118−123

[22] HUANG M, ZHAO C R, ZOU Y B, et al. Yield effect of applying earthworm castings produced during the oilseed rape-growing season in rice-oilseed rape cropping fields to rice[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 10759

[23] 陈义. 中国动物图谱——环节动物[M]. 北京: 科学出版社, 1959: 2−16
CHEN Y. Animal Atlas of China—Annelids[M]. Beijing: Science Press, 1959: 2−16

[24] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 90−106
YIN W Y. China Soil Animal Retrieval Illustrated Book[M]. Beijing: Science Press, 1998: 90−106

[25] 李薇, 何海, 崔婷, 等. 油—稻免耕直播栽培技术及其经济效益分析[J]. 湖南农业科学, 2019, (7): 23−25
LI W, HE H, CUI T, et al. No-tillage and direct seeding cultivation technology of rape-rice and its economic benefit analysis[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2019, (7): 23−25

[26] 丛日环, 张智, 鲁剑巍. 长江流域不同种植区气候因子对冬油菜产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(6): 894−903
CONG R H, ZHANG Z, LU J W. Climate impacts on yield of winter oilseed rape in different growth regions of the Yangtze

River Basin[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(6): 894−903

[27] 周顺亮, 冯敏玉, 叶清, 等. 油菜产量与苗期气象条件的相关分析[J]. 江西农业学报, 2007, 19(9): 22−24
ZHOU S L, FENG M Y, YE Q, et al. Correlation analysis of rape yield and climatic condition at seedling stage[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007, 19(9): 22−24

[28] 高文, 祝汇江, 许磊, 等. 不同温湿度条件对蚯蚓生长的影响[J]. 上海农业科技, 2018, (1): 51
GAO W, ZHU H J, XU L, et al. Effects of different temperature and humidity conditions on the growth of earthworms[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2018, (1): 51

[29] 张花, 杨效东, 杜杰, 等. 土壤温度和湿度对外来种蚯蚓*Pontoscolex corethrurus*产茧和幼蚓孵化的影响[J]. 动物学研究, 2008, 29(3): 305−312
ZHANG H, YANG X D, DU J, et al. Influence of soil temperature and moisture on the cocoon production and hatching of the exotic earthworm *Pontoscolex corethrurus*[J]. Zoological Research, 2008, 29(3): 305−312

[30] 刘满强, 胡锋, 陈小云, 等. 退化红壤不同植被恢复方式对蚯蚓种群的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2152−2156
LIU M Q, HU F, CHEN X Y, et al. Effects of different vegetation restoration of degraded red soil on earthworm population dynamics[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2152−2156

[31] 谭方颖, 毛留喜, 钱永兰, 等. 2017年夏收粮油作物全生育期气象条件及其影响分析[J]. 中国农业气象, 2017, 38(9): 609−611
TAN F Y, MAO L X, QIAN Y L, et al. Analysis of meteorological conditions and their impacts during the growth period of grain and oil crops in summer harvest in 2017[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(9): 609−611

[32] 宋丰萍, 胡立勇, 周广生, 等. 渍水时间对油菜生长及产量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(1): 170−176
SONG F P, HU L Y, ZHOU G S, et al. Effects of waterlogging time on rapeseed (*Brassica napus* L.) growth and yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(1): 170−176

[33] MCINGA S, MUZANGWA L, JANHI K, et al. Conservation agriculture practices can improve earthworm species richness and abundance in the semi-arid climate of eastern cape, South Africa[J]. Agriculture, 2020, 10(12): 576

[34] 张卫信, 李健雄, 郭明昉, 等. 广东鹤山人工林蚯蚓群落结构季节变化及其与环境的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1362−1370
ZHANG W X, LI J X, GUO M F, et al. Seasonal variation of earthworm community structure as correlated with environmental factors in three plantations of Heshan, Guangdong, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6): 1362−1370

[35] PELOSI C, BAROT S, CAPOWIEZ Y, et al. Pesticides and earthworms. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(1): 199−228

[36] BILALIS D, SIDIRAS N, VAVOULIDOU E, et al. Earthworm populations as affected by crop practices on clay loam soil in a Mediterranean climate[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 2009, 59(5): 440−446

[37] 杨俊, 丁峰, 陈晨, 等. 小麦生物量及产量与无人机图像特征参数的相关性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 104−110
YANG J, DING F, CHEN C, et al. Correlation of wheat biomass and yield with UAV image characteristic parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 104−110

[38] CHAKRABORTY S, PAUL N, CHAUDHURI P S. Earthworm casting activities under bamboo plantations of West Tripura, India and their impact on soil physicochemical properties[J]. Current Science, 2020, 119(7): 1169−1177

[39] ASAWALAM D O. Influence of cropping intensity on the production and properties of earthworm casts in a *Leucaena* alley cropping system[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, 42(6): 506−512

[40] 李彦霈, 邵明安, 王娇. 蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 633−640
LI Y P, SHAO M A, WANG J. Effects of earthworm cast mulch on soil evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 633−640

[41] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209−1218
LIU X D, QIAO Y N, ZHOU G Y. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(12): 1209−1218

[42] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618−623
PENG X H, ZHANG B, ZHAO Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618−623

[43] VAN GROENIGEN J W, VAN GROENIGEN K J, KOOPMANS G F, et al. How fertile are earthworm casts? A meta-analysis[J]. Geoderma, 2019, 338: 525−535

[44] 张树杰, 张春雷. 接种蚯蚓对油菜籽粒产量和含油率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1499−1503
ZHANG S J, ZHANG C L. Effects of inoculating earthworm on the seed yield and its oil content of winter oilseed rape[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1499−1503