

自然生草和蚯蚓对渭北旱塬苹果园土壤特性及苹果品质的影响

白岗栓^{1,2} 邹超煜³ 邵发琦⁴ 杨凯齐⁵

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3. 吉安市湿地管理中心, 江西 吉安 343000;

4. 安康市农业科学研究所, 陕西 安康 725021;

5. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要 为了提高渭北旱塬苹果园的土壤水分,降低土壤容重,提高果实产量及品质,本研究以果园清耕为对照,探讨自然生草(繁缕和牛繁缕群落)、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理对果园土壤水分、土壤容重和苹果产量及品质等的影响。结果表明:自然生草和自然生草+蚯蚓处理在苹果开花坐果期、幼果膨大期、花芽分化期、果实采前膨大期和落叶期分别提高0~100 cm、0~90 cm、0~130 cm、0~160 cm和0~100 cm土层土壤水分,且在果实采前膨大期,即雨季对果园土壤水分的影响最为显著,而清耕+蚯蚓处理仅在果实采前膨大期提高0~160 cm土层土壤水分;清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理分别降低果园0~20 cm和0~30 cm土层土壤容重,而自然生草处理对果园土壤容重无显著影响;自然生草+蚯蚓处理果园土壤中的蚯蚓量高于清耕+蚯蚓处理;自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理均提高了苹果产量和果实可溶性固形物含量,降低了果实可滴定酸含量和固酸比,但是对果实单果质量、果形指数、着色面积和果实硬度无显著影响;不同处理中,自然生草+蚯蚓处理对果园土壤水分、土壤容重和苹果产量及品质影响最为显著。综上,渭北旱塬应积极推广自然生草+蚯蚓的果园土壤管理模式。

关键词 清耕; 自然生草; 蚯蚓; 土壤水分; 土壤容重; 苹果品质

中图分类号 S661.1;S152.7

文章编号 1007-4333(2022)03-0146-12

文献标志码 A

Effects of self-sown grass and earthworm on the soil property and apple quality of apple orchards in Weibei dry plateau

BAI Gangshuan^{1,2}, ZOU Chaoyu³, SHAO Faqi⁴, YANG Kaiqi⁵

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. Ji'an Wetland Management Center, Ji'an 343000, China;

4. Institute of Ankang Agricultural Science Research, Ankang 725021, China;

5. Colleague of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to increase the soil moisture, reduce soil bulk density in apple orchards and improve the yield and quality of fruit, by taking clean tillage as control, the effects of self-sown grass (*Stellaria media* and *Malachium aquaticum* community), clean tillage + earthworm and self-sown grass + earthworm on soil moisture, soil bulk density, fruit yield and quality of apple orchards in the Weibei dry plateau were systematically investigated. The results showed that: The self-sown grass and self-sown grass + earthworm treatments increased soil moisture in 0 - 100 cm, 0 - 90 cm, 0 - 130 cm, 0 - 160 cm and 0 - 100 cm soil layers at the flowering and fruit-bearing stage, young fruit enlargement stage, flower bud differentiation stage, pre-harvest enlargement stage and abscission stage, respectively. At the pre-harvest enlargement stage, i. e. the rainy season had the most significant effects, while the clean tillage + earthworm

收稿日期: 2021-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501602);延安山仑院士工作站科研项目(20181201)

第一作者: 白岗栓, 研究员, 主要从事果树栽培及农田生态研究, Email: gshb@nwsuaf.edu.cn

treatment only increased the soil water in 0–160 cm soil layer. Soil bulk density in both 0–20 cm and 0–30 cm soil layers was decreased by in clear tillage + earthworm and self-sown grass + earthworm treatments, and the self-sown grass treatment had no significant effects on soil bulk density. The amount of earthworm in soil of self-sown grass + earthworm orchard was higher than that of clear tillage + earthworm orchard. In self-sown grass, clear tillage + earthworm and self-sown grass + earthworm orchards the fruit yield and fruit soluble solid content were increased, and the fruit titratable acid content and ratio of fruit soluble solid to titratable acid were decreased, and there were no significant effects on single fruit weight, fruit shape index, colored area and fruit firmness. Among the four different treatments, self-sown grass + earthworm had the most significant effects on soil moisture, soil bulk density, apple yields and apple quality. Therefore, the orchard soil management mode of self-sown grass + earthworm could be promoted actively in the Weibei dry plateau.

Keywords clean tillage; self-sown grass; earthworm; soil moisture; soil bulk density; fruit quality

渭北旱塬地处陕西省关中平原与陕北黄土丘陵沟壑区之间,海拔 800~1 300 m,为黄土高原地势较为平缓的部分,是中国最大的优质苹果 (*Malus domestica*) 生产基地,但渭北旱塬为雨养农业区,降水量偏少,土壤干燥化严重且土壤有机质含量低,影响苹果的优产和高产^[1-3]。为了减少土壤水分消耗,渭北旱塬果园的地面管理大多为清耕,以减少生草对土壤水分的消耗,但连续多年的清耕易导致土壤有机质降低及土壤水分蒸发,不利于果树健康持续生长^[4-5]。生草可改善果园的土壤水分状况,提高土壤有机质,改善果园立地环境^[4-10]。果园生草有人工生草和自然生草 2 种方式,人工生草多选用豆科和禾本科植物,但这些植物往往根系庞大,分布较深,在干旱的渭北旱塬存在与果树争水争肥的问题^[11-16],生产中难以推广;自然生草的物种丰富,覆盖度高,能有效改善土壤的微环境^[17-25]。渭北旱塬西部果园自然生草的种类主要为繁缕 (*Stellaria media*) 和牛繁缕 (*Malachium aquaticum*),根系分布浅,耗水量少,覆盖度高,不需要播种及刈割,可有效提高果园土壤水分^[26]。如何将生草果园的枯枝落叶快速转化为土壤有机质,改善果园的土壤环境是生草果园土壤管理中急需解决的问题。蚯蚓作为土壤中的大型动物之一,能够直接采食作物秸秆、畜禽粪便和城市污泥等有机固体废弃物,并将其转化为蚯蚓粪及土壤有机质;蚯蚓在取食、消化、掘穴、排泄和分泌等过程中,能够改善土壤的孔隙结构、土壤理化性状和生物学特性等,促进土壤水分入渗,增加土壤养分的有效性,加速土壤有机质的矿化,改良土壤的通透性,提高土壤肥力,促进作物生长,提高土地生产力^[27-33]。有关蚯蚓改善果园土壤环境的多为果园施用蚯蚓粪或果园添加蚯蚓和作物秸秆,利用蚯蚓取食作物秸秆,将作物秸秆转化为土壤有机质

等来改善果园的土壤环境^[34-39],而直接把蚯蚓投放于自然生草的果园中,自然生草与蚯蚓相结合来改善果园土壤环境及促进果树生长,特别是提高果园深层土壤水分方面的研究未见报道。本研究以果园清耕为对照,直接把蚯蚓投放于清耕和自然生草(繁缕和牛繁缕群落)的果园中,探讨清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓及自然生草处理对果园土壤水分、土壤容重、果实产量及品质的影响,为提高渭北旱塬果园土壤水分及果实品质提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验园位于渭北旱塬西部的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(35°12' N, 107°40' E, 海拔 1 220 m)。试验园年均降水量为 551.7 mm,其中 4~10 月为 494.1 mm,日照时数为 2 226.5 h,日照百分率为 51%;年均气温为 9.1 °C,≥10 °C 的活动积温为 3 029 °C,无霜期为 171 d。试验园土壤为黑垆土,耕层(0~20 cm 土层)土壤有机质质量分数为 9.24 g/kg,全氮为 0.91 g/kg,速效氮为 53.65 mg/kg,全磷为 0.24 g/kg,速效磷为 40.28 mg/kg,全钾为 7.28 g/kg,速效钾为 214.25 mg/kg,pH 为 7.8,土壤容重为 1.32 g/cm³,田间持水量为 22.21%,土壤萎蔫系数为 9.2%。20~200 cm 土层土壤容重平均为 1.34 g/cm³。试验前果园土壤管理为清耕。

1.2 试验材料

供试苹果园建于 1996 年春季,南北行向,株行距为 3.0 m×4.0 m,主栽品种为‘红富士’(Red Fuji),砧木为新疆野苹果 (*Malus sieversii*),面积 2.0 hm²,树形为小冠疏层形。2008—2016 年平均产量为 42 000 kg/hm²,2018 年因晚霜危害造成绝收,2020 年因晚霜危害减产 50%左右。2016 年冬季修剪前

树干直径约为 9.0 cm,树高约 400.0 cm,树冠直径约 370.0 cm,处于盛果期。试验前果园土壤管理为清耕,试验始于 2017 年 3 月,止于 2020 年 12 月。

果园自然生草的种类主要为繁缕和牛繁缕,根系多分布于 0~10 cm 土层,能够快速自我繁殖^[26]。投放的蚯蚓为‘大平 2 号’赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),体长 4~5 cm,体重 0.19~0.24 g,具有明显环带,试验前采取一定量的果园耕层土壤,过筛后将土壤水分调整为 16.66%(田间持水量的 75%)左右后将供试蚯蚓投放于该土中驯化 24 h。

1.3 试验设计与测定

1.3.1 试验设计

试验以果园清耕为对照,监测清耕+蚯蚓、自然生草+蚯蚓及自然生草处理果园 0~200 cm 土层土壤水分、0~60 cm 土层土壤容重、0~30 cm 土层土壤蚯蚓数量及生物量、苹果产量和果实品质。试验重复 3 次,共 12 个小区,不同小区随机排列。每个小区南北长 48 m,东西宽 20 m,每个小区有 4 行苹果树,每行 15 株。试验期间不同处理的施肥、修剪、疏花疏果、果实套袋和病虫害防治等管理措施相同。

1.3.1.1 清耕

试验前果园土壤管理为清耕,2017 年 3 月下旬果树萌芽前用低矮型旋耕机进行旋耕(深度 15 cm),2017 年 4 月—2020 年 12 月每间隔 2~3 个月旋耕 1 次,行间及树盘下的杂草及时去除,确保试验小区没有杂草滋生。

1.3.1.2 自然生草处理

试验前果园土壤管理为清耕,2017 年 3 月下旬果树萌芽前旋耕后让其自然生草。生草期间出现的灰藜(*Chenopodium album*)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)、龙葵(*Solanum nigrum*)等高大杂草及时去除,保留繁缕、牛繁缕和荠菜(*Capsella bursa-pastoris*)、婆婆纳(*Veronica didyma*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、鸡肠草(*Herba centipeda*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、箭叶旋花(*Convolvulus arvensis*)和马齿苋(*Portulaca oleracea*)等低矮草本。自然生草期间杂草的高度低于 30 cm,2017 年 4 月—2020 年 12 月一直未进行刈割。

1.3.1.3 清耕+蚯蚓处理

2017 年 3 月—2020 年 12 月果园地面管理同清耕。2017 年 9 月上旬雨后(该区域 7 月下旬至 10 月上旬为雨季)向果园均匀投放蚯蚓,投放量为

50 条/m²,约 11.0 g/m²。

1.3.1.4 自然生草+蚯蚓处理

2017 年 3 月—2020 年 12 月果园地面管理同自然生草处理。2017 年 9 月上旬雨后向果园均匀投放蚯蚓,投放量为 50 条/m²,约 11.0 g/m²。

1.3.2 试验监测

1.3.2.1 土壤水分

2020 年在果树开花坐果期(4 月 15 日)、幼果膨大期(5 月 15 日)、花芽分化期(6 月 20 日)、果实采前膨大期(9 月 10 日)和落叶期(11 月 15 日)采用蛇形法布点,在每个小区树行中部选取 5 个采样点,以 10 cm 土层为 1 层,分层采集 0~200 cm 土层土壤,烘干法测定土壤水分含量。

1.3.2.2 土壤容重

2020 年苹果采收后(10 月 15 日),采用蛇形法布点,在每个小区树行中部选取 5 个采样点,以 10 cm 土层为 1 层,环刀法分层测定 0~60 cm 土层土壤容重。

1.3.2.3 蚯蚓数量及生物量

2020 年苹果采收后,采用蛇形法布点,在每个小区树行中部选取 60 cm×60 cm 大小的 5 个样方,以 10 cm 土层为 1 层,用铲子分层挖取 0~30 cm 土层土壤并分别放置于编织袋上,过筛,清点蚯蚓数量;清点后的蚯蚓经自来水冲洗并在筛中抖动,除去蚯蚓身体附着的水分后,用百分之一天平称取蚯蚓质量,然后折合为单位面积的蚯蚓数量及生物量。

1.3.2.4 果实产量及品质

2020 年苹果采收期(10 月 10 日),采用蛇形法布点,在每个小区各选择 5 棵苹果树,用电子台秤测定单株苹果产量并折合为单位面积苹果产量。在测定果实产量前,在树冠东、西、南和北 4 个方向外围中部各随机采集 5 个带有果柄的果实,用于测定果实品质,其中果实着色面积用目测法测定,果实纵径和横径(mm)用游标卡尺测定并计算果形指数,果形指数=果实纵径/果实横径;果实单果质量用百分之一电子天平测定,果实硬度用 GY-1 型果实硬度计测定,果实可溶性固形物含量用 PR-100 型数字糖度计测定,果实可滴定酸含量用 GMK-835F 果实酸度计测定^[40]并计算固酸比,固酸比=可溶性固形物含量/可滴定酸含量。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 2010 制作图表,SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析($P < 0.05$);若差异显著,

则采用 Duncan's 多重比较进行检验。

2 结果与分析

2.1 土壤水分含量

开花坐果期不同处理 0~100 cm 土层土壤水分含量差异相对较大,100~200 cm 差异相对较小(图 1(a))。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理 0~100 cm 土层土壤水分分别比清耕提高了 7.38%、3.28% 和 9.84%，自然生草和自然生草+蚯蚓处理均显著高于 ($P < 0.05$) 清耕；自然生草+蚯蚓处理较清耕+蚯蚓处理提高了 6.35%，也达到显著差异 ($P < 0.05$)。不同处理 100~200 cm 土层土壤水分含量基本一致，相互之间无显著差异(表 1)。

幼果膨大期不同处理 0~90 cm 土层土壤水分含量差异相对较大,90~200 cm 土层差异相对较小(图 1(b))。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理 0~90 cm 土层土壤水分含量分别较清耕提高了 6.98%、3.14% 和 9.22%，自然生草和自然生草+蚯蚓处理均显著高于 ($P < 0.05$) 清耕；自然生草+蚯蚓处理较清耕+蚯蚓处理提高了 5.90%，也达到显著差异 ($P < 0.05$)。不同处理 130~200 cm 土层土壤水分含量基本相近，相互之间无显著差异(表 1)。

花芽分化期不同处理 0~130 cm 土层土壤水分含量差异相对较大,130~200 cm 土层差异相对较小(图 1(c))。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理 0~130 cm 土层土壤水分含量分别较清耕提高了 6.98%、3.14% 和 9.22%，自然生草和自然生草+蚯蚓处理均显著高于 ($P < 0.05$) 清耕；自然生草+蚯蚓处理较清耕+蚯蚓处理提高了 5.90%，也达到显著差异 ($P < 0.05$)。不同处理 130~200 cm 土层土壤水分含量基本相近，相互之间无显著差异(表 1)。

果实采前膨大期不同处理 0~130 cm 土层土壤水分含量差异相对较大,130~200 cm 土层差异相对较小(图 1(d))。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理 0~130 cm 土层土壤水分含量分别较清耕提高了 6.98%、3.14% 和 9.22%，自然生草和自然生草+蚯蚓处理均显著高于 ($P < 0.05$) 清耕；自然生草+蚯蚓处理较清耕+蚯蚓处理提高了 5.90%，也达到显著差异 ($P < 0.05$)。不同处理 130~200 cm 土层土壤水分含量基本相近，相互之间无显著差异(表 1)。

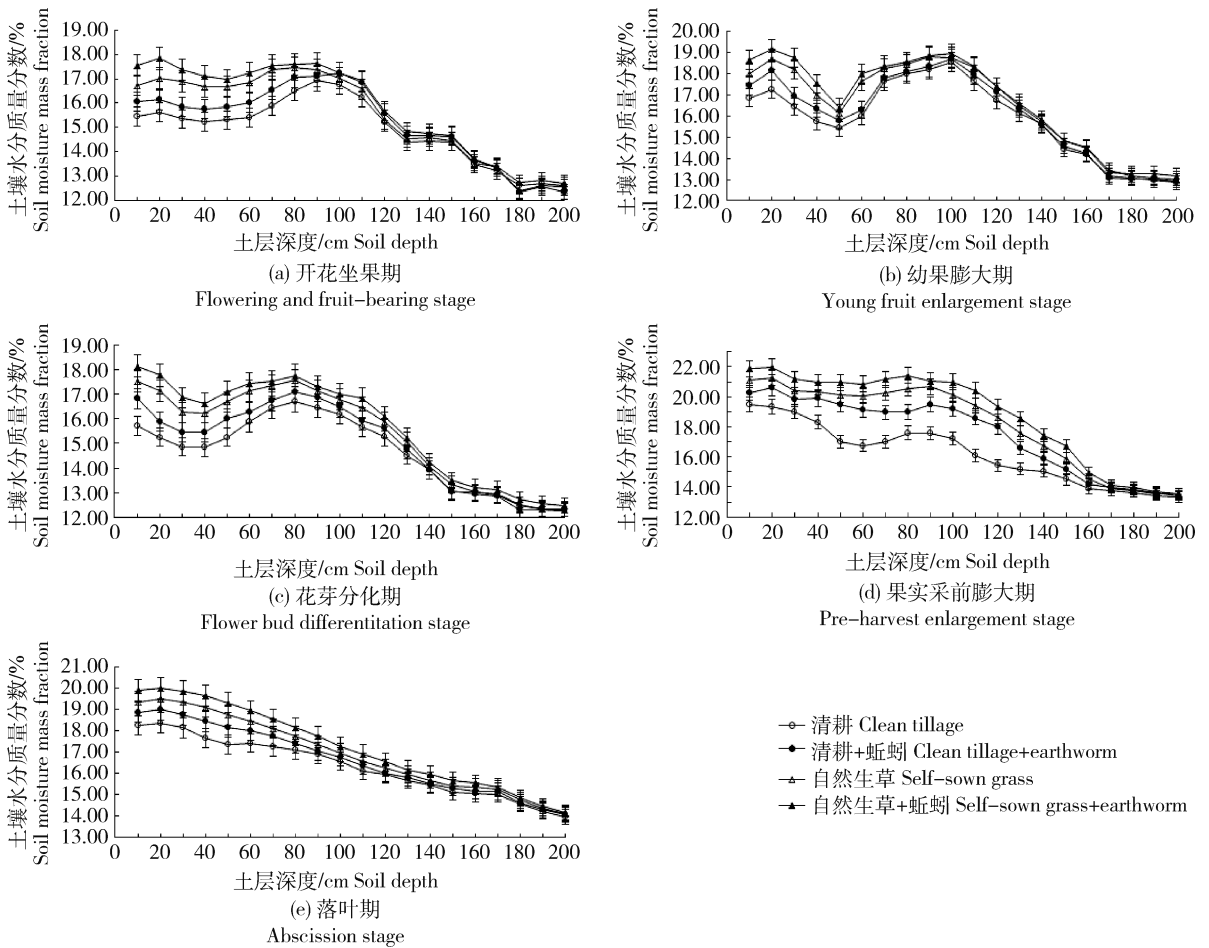


图 1 不同处理在不同生长期的土壤水分含量

Fig. 1 Soil moisture of different treatments in different growth stages

表1 不同处理不同时期的土壤水分

Table 1 Soil moisture in different treatments and growth stages

%

生长时期 Growth stage	处理 Treatment	土层深度 Soil depth	
		0~100 cm	100~200 cm
开花坐果期 Flowering and fruit-bearing stage	清耕	15.85±1.24 c	13.94±0.98 a
	自然生草	17.02±1.26 ab	14.07±0.94 a
	清耕+蚯蚓	16.37±1.32 bc	14.07±0.89 a
	自然生草+蚯蚓	17.41±1.35 a	14.16±0.96 a
幼果膨大期 Young fruit enlargement stage	清耕	16.83±1.32 c	15.04±0.84 a
	自然生草	17.90±1.45 ab	15.34±0.88 a
	清耕+蚯蚓	17.23±1.34 bc	15.15±0.82 a
	自然生草+蚯蚓	18.24±1.48 a	15.41±0.91 a
花芽分化期 Flower bud differentiation stage	清耕	15.61±1.26 c	12.87±0.67 a
	自然生草	16.70±1.29 ab	12.93±0.72 a
	清耕+蚯蚓	16.10±1.24 bc	12.81±0.69 a
	自然生草+蚯蚓	17.05±1.32 a	13.12±0.74 a
果实采前膨大期 Pre-harvest enlargement stage	清耕	16.83±1.54 c	13.53±0.54 a
	自然生草	19.24±1.72 ab	13.69±0.48 a
	清耕+蚯蚓	18.38±1.78 b	13.71±0.57 a
	自然生草+蚯蚓	19.99±1.81 a	13.84±0.53 a
落叶期 Abscission stage	清耕	17.50±1.35 c	15.12±0.74 a
	自然生草	18.46±1.44 ab	15.37±0.69 a
	清耕+蚯蚓	18.01±1.52 bc	15.23±0.76 a
	自然生草+蚯蚓	18.94±1.56 a	15.56±0.81 a

注:表中同一列中不同字母表示存在显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters within the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level between different treatments. The same below.

果实采前膨大期处于雨季,不同处理 0~160 cm 土层土壤水分含量差异相对较大,160~200 cm 土层差异则相对较小(图 1(d))。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理 0~160 cm 土层土壤水分含量分别较清耕提高了 14.32%、9.21% 和 18.78%,均显著高于($P<0.05$)清耕;自然生草+蚯蚓处理较清耕+蚯蚓处理提高了 8.76%,也达到显著差异($P<0.05$)。不同处理 160~200 cm 土层土壤

水分含量基本相近,相互之间无显著差异(表 1)。

落叶期不同处理 0~100 cm 土层土壤水分含量差异相对较大,100~200 cm 土层差异相对较小(图 1(e))。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理 0~100 cm 土层土壤水分平均含量分别较清耕提高了 5.49%、2.91% 和 8.23%,自然生草和自然生草+蚯蚓处理均显著高于($P<0.05$)清耕;自然生草+蚯蚓处理较清耕+蚯蚓处理提高了

5.16%，也达到显著差异($P < 0.05$)。不同处理100~200 cm 土层土壤水分含量基本相同，相互之间无显著差异(表1)。

2.2 土壤容重

果园投放蚯蚓后，清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理0~10 cm 土层和10~20 cm 土层土壤容重

显著低于($P < 0.05$)清耕，自然生草+蚯蚓处理20~30 cm 土层土壤容重也显著低于($P < 0.05$)清耕，而自然生草处理的土壤容重与清耕、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理之间无显著差异。与清耕相比，自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理对30 cm 以下土层的土壤容重均无显著影响(表2)。

表2 不同处理的土壤容重
Table 2 Soil bulk density of different treatments

处理 Treatment	土层深度 Soil depth					
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	50~60 cm
清耕 Clean tillage	1.31±0.12 a	1.32±0.13 a	1.34±0.07 a	1.34±0.06 a	1.33±0.05 a	1.33±0.04 a
自然生草 Self-sown grass	1.29±0.11 ab	1.29±0.11 ab	1.32±0.06 ab	1.32±0.06 a	1.33±0.05 a	1.33±0.04 a
清耕+蚯蚓 Clean tillage+earthworm	1.25±0.09 b	1.25±0.10 b	1.30±0.06 ab	1.32±0.05 a	1.33±0.05 a	1.33±0.04 a
自然生草+蚯蚓 Self-sown grass+earthworm	1.24±0.08 b	1.24±0.09 b	1.27±0.07 b	1.30±0.05 a	1.33±0.05 a	1.33±0.04 a

2.3 蚯蚓数量及生物量

无论是清耕果园还是自然生草果园，均以10~20 cm 土层的蚯蚓数量较多且生物量较大，0~10 cm 土层居中，20~30 cm 土层则较少及较小(表3)。

不同土层中，蚯蚓数量和生物量从少到多均依次为清耕、自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理，不同处理间均存在显著差异($P < 0.05$)。清耕和自然生草处理未投放蚯蚓，其蚯蚓应为土壤中原有的其它种类的蚯蚓，故其量很少。2017年9月清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理的蚯蚓投放量均为50条/m²，2020年10月清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理0~30 cm 土层土壤中的蚯蚓数量分别为25.92条/m²和43.47条/m²(表3)，在忽略土壤原有蚯蚓的状况下，蚯蚓数分别减少了48.16%和13.06%，生物量分别减少了49.45%和15.73%。自然生草+蚯蚓处理3年后的蚯蚓数量和生物量分别较投放时减少了13.06%和15.73%，说明该处理投放的蚯蚓基本可在渭北旱塬果园生长发育。

2.4 果实产量及品质

2020年苹果开花坐果期遭遇霜冻，不同处理的产量仅为常年的50%左右。果园自然生草及投放蚯蚓，改善了果园的土壤环境及小气候，有利于果树

抵抗霜冻^[37-39,41]，提高座果率，因而自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理的苹果产量分别较清耕提高了6.91%、5.85%和9.84%，均与清耕达到显著差异($P < 0.05$)(表4)。

2020年不同处理的苹果产量均较常年偏低，不同处理的单果质量、果形指数、着色面积和果实硬度等均处于同一水平，之间无显著差异；但自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理的果实可溶性固形物含量均显著高于($P < 0.05$)清耕，自然生草和自然生草+蚯蚓处理的可滴定酸含量显著低于($P < 0.05$)清耕，自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理的固酸比均显著高于($P < 0.05$)清耕(表4)。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理显著提高了果实产量，显著改善了果实的风味品质，其中自然生草+蚯蚓处理的效果较为突出。

3 讨论

3.1 对土壤水分的影响

渭北旱塬为雨养农业区，土层深厚，降水是果园土壤获取水分的唯一途径^[13-14]。如何促进降水入渗，减少土壤水分蒸发是渭北旱塬苹果丰产的首要因素^[26]。试验果园自然生草的草类主要为繁缕和牛

表3 不同处理不同土层的蚯蚓数量及生物量

Table 3 Number and biomass of earthworms in different soil layers of different treatments

处理 Treatment	0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm		0~30 cm	
	数量/(条/m ²) Number of earthworm	生物量/(g/m ²) Biomass	数量/(条/m ²) Number of earthworm	生物量/(g/m ²) Biomass	数量/(条/m ²) Number of earthworm	生物量/(g/m ²) Biomass	数量/(条/m ²) Number of earthworm	生物量/(g/m ²) Biomass
清耕 Clean tillage	0.24±0.02 d	0.05±0.01 d	0.27±0.02 d	0.06±0.01 d	0.12±0.01 d	0.03±0.01 d	0.63±0.02 d	0.14±0.01 d
自然生草 Self-sown grass	0.38±0.03 c	0.08±0.01 c	0.56±0.04 c	0.12±0.02 c	0.26±0.02 c	0.05±0.01 c	1.20±0.04 c	0.25±0.02 c
清耕+蚯蚓 Clean tillage+earthworm	10.41±0.98 b	2.24±0.03 b	12.46±1.21 b	2.68±0.14 b	3.05±0.31 b	0.64±0.02 b	25.92±1.21 b	5.56±0.14 b
自然生草+蚯蚓 Self-sown grass+earthworm	16.57±1.24 a	3.49±0.24 a	21.42±1.86 a	4.64±0.23 a	5.48±0.46 a	1.14±0.04 a	43.47±1.86 a	9.27±0.24 a

表4 不同处理的果实产量及品质

Table 4 Fruit yields and fruit quality of different treatments

处理 Treatment	果实产量/ (kg/hm ²) Fruit yields	果实品质 Fruit quality						
		单果质量/g Single fruit weight	果实指数 Fruit shape index	着色面积/% Colored area	硬度/ (kg/cm ²) Fruit firmness	可溶性固形物质量分数/% Soluble solids mass fraction	可滴定酸质量分数/% Titratable acid mass fraction	固酸比 Ratio of soluble solids to titratable acid
清耕 Clean tillage	12 810±912 b	215.46±20.14 a	0.89±0.02 a	95.6±2.01 a	9.58±0.42 a	11.64±1.24 b	0.39±0.04 a	29.85±3.24 b
自然生草 Self-sown grass	13 695±1 024 a	214.73±19.85 a	0.88±0.02 a	96.6±2.14 a	9.64±0.37 a	12.34±1.35 a	0.37±0.03 b	33.35±2.98 a
清耕+蚯蚓 Clean tillage+earthworm	13 560±1 113 a	216.58±20.25 a	0.89±0.02 a	96.7±2.08 a	9.62±0.34 a	12.26±1.32 a	0.38±0.03 ab	32.26±3.15 a
自然生草+蚯蚓 Self-sown grass+earthworm	14 070±1 204 a	215.35±19.68 a	0.88±0.02 a	97.8±2.12 a	9.71±0.36 a	12.47±1.36 a	0.37±0.03 b	33.70±3.08 a

繁缕,根系分布浅,覆盖度高,土壤水分消耗少并可减少土壤表层水分蒸散^[26],且杂草根系可作为土壤水分入渗的通道,促进降水快速入渗到土壤中,提高果园土壤水分含量^[42];清耕果园的表层土壤裸露于大气中,降水初期受雨滴的打击,易在土壤表层形成结皮,阻碍降水入渗到深层土壤中而形成地表径流,不利于土壤蓄存较多的水分,而自然生草果园的土壤表层覆盖着杂草,可减少雨滴打击或减缓打击程度,土壤表层不易形成土壤结皮,可有效促进降水入渗到土壤中,增加土壤水分含量^[42]。果园投放蚯蚓后,蚯蚓以新鲜的有机植物残体为食并将地表凋落物混入土壤中,加速枯枝落叶的分解并形成土壤有机质^[34-39];蚯蚓在土壤中生活,在土壤表面和土体内部均可产生一定量的蚯蚓粪,而土壤表层的蚯蚓粪可抑制土壤表层水分蒸发,土壤中的蚯蚓粪则可改善土壤的通气、透水和蓄水保肥等,促进土壤水分入渗并提高土壤水分含量^[43-44];蚯蚓在土壤中掘穴与挖洞,在土壤中形成许多大孔隙,有利于降水快速入渗到较深的土壤中,减少地表径流及土壤水分蒸发,提高土壤的蓄水保水能力^[43-46],因而果园投放蚯蚓后土壤水分较高,特别是在雨季,降水较多,自然生草和自然生草+蚯蚓处理可有效促进大量降水入渗到深层土壤中,蓄积较多的土壤水分,为渭北旱塬“秋雨春用”提供了基础,有利于果树春季抗御霜冻和开花坐果,从而提高果实产量。

3.2 对土壤容重和蚯蚓数量及生物量的影响

繁缕和牛繁缕平伏于地面生长,不需耕种和刈割,减少了机械对土壤的碾压,促进土壤孔隙均匀分布及土壤大孔隙形成,并为蚯蚓提供丰富的饵料,利于蚯蚓繁衍生息^[7,45],因而自然生草后0~30 cm土层土壤容重略有降低,且蚯蚓量高于清耕。果园投放蚯蚓后,蚯蚓在取食、消化、掘穴、排泄和分泌等过程中会产生一定量的蚯蚓粪,而蚯蚓粪具有较好的孔隙度、通气性和较大的表面积^[43-46],从而改善土壤的理化性状和生物学特性,改良土壤的通透性,降低土壤容重^[27-33],因而清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理0~20 cm土层和0~30 cm土层土壤容重显著低于清耕。由于试验所选用的蚯蚓为表栖类蚯蚓,主要在0~15 cm土层活动,故对30 cm以下土层土壤容重无影响。

自然生草缩小了土壤的日温差和年温差^[48-50],提高了土壤有机质^[27-33,18-25]和土壤水分^[26];自然生草后的枯枝落叶较多,为蚯蚓提供较多的饵料及相

对较好的生活环境,利于蚯蚓在土壤中的生息繁衍,因而自然生草+蚯蚓处理的蚯蚓数量及生物量高于清耕+蚯蚓处理。自然生草+蚯蚓处理的蚯蚓量较高,蚯蚓活动量大,制造的土壤孔隙多,且自然生草可减少土壤水分蒸发,促进土壤微生物活动^[17-26],因而自然生草+蚯蚓处理的土壤容重较低,土壤水分和蚯蚓量较高。通常情况下蚯蚓活动的最适温度为20~27℃左右,0~5℃进入休眠状态,0℃以下便可冻死,而渭北旱塬冬季土壤冻土层可达20 cm左右,本研究投放的蚯蚓为表栖型,主要活动于0~15 cm土层,因而绝大多数蚯蚓越冬后死亡,而残存于较深土层中的蚯蚓及蚯蚓卵在春季土壤解冻后又逐渐恢复繁衍生息,因而测试土壤中的蚯蚓量低于投放的蚯蚓量。渭北旱塬自然生草果园投放蚯蚓3年后其蚯蚓的数量和生物量较投放时分别减少13.06%和15.73%,说明自然生草果园投放的蚯蚓基本可正常生长发育。

3.3 对苹果产量及品质的影响

渭北旱塬果园土壤水分供给不足^[11-14],有机质含量低为优质苹果高产的主要限制因素^[1-3]。自然生草可提高土壤有机质^[51],自然生草+蚯蚓处理不仅降低了土壤容重,提高了土壤水分,为苹果根系生长发育提供了良好的土壤环境,且投放的蚯蚓在土壤中活动,产生一定量的蚯蚓粪,进一步提高了土壤有机质,改善土壤的理化性状和生物学特性,增加土壤养分的有效性,加速土壤有机质的矿化^[27-33],而且蚯蚓粪可使植物产生系统获得性抗性,提高植物的抗病和抗虫能力,提高植物的抗逆性^[52-54],促进土壤微生物活动^[55],缓解连作障碍^[56],因而果园投放蚯蚓后苹果树体的抗逆性提高,在遭遇晚霜危害的状况下座果率高,其产量及品质均较清耕有所提高。不同处理对单果质量、果形指数、着色面积及果实硬度影响较小,首先是2020年受晚霜的危害,树体结果量少,树体营养充足,不同处理的果实生长发育良好;其次是试验园果树修剪比较合理,果园通风透光较好,有利于果实生长发育及着色^[57]。

4 结论

在渭北旱塬,雨季分别向清耕和自然生草的果园投放蚯蚓,3年后自然生草+蚯蚓处理的果园土壤蚯蚓量高于清耕+蚯蚓处理,自然生草和自然生草+蚯蚓处理在果树整个生长期的土壤水分均高于清耕,而清耕+蚯蚓处理仅在果实采前膨大期高于

清耕。清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理较清耕分别降低了0~20 cm土层和0~30 cm土层土壤容重。自然生草、清耕+蚯蚓和自然生草+蚯蚓处理均提高了苹果产量,提高果实风味品质,但对果实外观品质和果实硬度无显著影响。不同处理中,自然生草+蚯蚓处理对果园土壤水分、土壤容重、苹果产量及果实品质影响最为显著,渭北旱塬应积极推广自然生草+蚯蚓的果园地面管理模式。

参考文献 References

- [1] 赵帅翔, 张卫峰, 姜远茂, 张福锁. 黄土高原苹果过量施氮因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 484-491
Zhao S X, Zhang W F, Jiang Y M, Zhang F S. Factors leading to excessive nitrogen fertilization on apple in the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 484-491 (in Chinese)
- [2] 葛顺峰, 朱占玲, 魏绍冲, 姜远茂. 中国苹果化肥减量增效技术途径与展望[J]. 园艺学报, 2017, 44(9): 1681-1692
Ge S F, Zhu Z L, Wei S C, Jiang Y M. Technical approach and research prospect of saving and improving efficiency of chemical fertilizers for apple in China[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(9): 1681-1692 (in Chinese)
- [3] 尹承苗, 王玫, 王嘉艳, 陈学森, 沈向, 张民, 毛志泉. 苹果连作障碍研究进展[J]. 园艺学报, 2017, 44(11): 2215-2230
Yin C M, Wang M, Wang J Y, Chen X S, Shen X, Zhang M, Mao Z Q. The research advance on apple replant disease[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(11): 2215-2230 (in Chinese)
- [4] Celano G, Palese A M, Ciucci A, Martorella E, Vignozzi N, Xiloyannis C. Evaluation of soil water content in tilled and cover-cropped olive orchards by the geoelectrical technique[J]. *Geoderma*, 2011, 163(3/4): 163-170
- [5] Ramos M E, Benitez E, García P A, Robles A B. Cover crops under different managements vs. frequent tillage in almond orchards in semiarid conditions: Effects on soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(1): 6-14
- [6] Paynel F, Philip J M., Bernard C J. Root exudates: A pathway for short-term N transfer from clover and ryegrass [J]. *Plant and Soil*, 2001, 229(2): 235-243
- [7] Andersen L, Kühn B F, Bertelsen M, Bruus M, Larsen S E, Strandberg M. Alternatives to herbicides in an apple orchard, effects on yield, earthworms and plant diversity [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 172(1): 1-5
- [8] Sánchez E E, Giayetto A, Cichón L, Fernández D, Aruani M C, Curetti M. Cover crops influence soil properties and tree performance in an organic apple (*Malus domestica* Borkh) orchard in northern Patagonia[J]. *Plant and Soil*, 2007, 292(1/2): 193-203
- [9] Peck G M, Merwin I A, Thies J E, Schindelbeck R R, Brown M G. Soil properties change during the transition to integrated and organic apple production in a New York orchard [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 48(1): 18-30
- [10] Neilsen G, Forge T, Angers D, Neilsen D, Hogue E. Suitable orchard floor management strategies in organic apple orchards that augment soil organic matter and maintain tree performance[J]. *Plant and Soil*, 2014, 378(1/2): 325-335
- [11] Liu Y, Gao M S, Wu W, Tanveer S K, Wen X X, Liao Y C. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 7-12
- [12] Du S N, Bai G S, Yu J. Soil properties and apricot growth under intercropping and mulching with erect milk vetch in the loess hilly-gully region [J]. *Plant and Soil*, 2015, 390(1/2): 431-442
- [13] 赵政阳, 李会科. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤水分的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(3): 481-484
Zhao Z Y, Li H K. The effects of interplant different herbage on soil water in apple orchards in the area of Weibei plateau [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(3): 481-484 (in Chinese)
- [14] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 黄金辉. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2080-2087
Gao M S, Liao Y C, Li X, Huang J H. Effects of different mulching patterns on soil water-holding capacity of non-irrigated apple orchard in the Weibei plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10): 2080-2087 (in Chinese)
- [15] 李会科, 张广军, 赵政阳, 李凯荣. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(2): 32-39
Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y, Li K R. Effects of interplanted herbage on soil properties of non-irrigated apple orchards in the Loess Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(2): 32-39 (in Chinese)
- [16] 白岗栓, 郑锁林, 邹超煜, 杜社妮. 陇东旱塬果园生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 173-183
Bai G S, Zheng S L, Zou C Y, Du S N. Influence of interplant herbage on soil moisture and apple tree growth in dry plateau of eastern Gansu [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 173-183 (in Chinese)
- [17] 付学琴, 刘琚珥, 黄文新. 南丰蜜橘园自然生草对土壤微生物和养分及果实品质的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(8): 1551-1558
Fu X Q, Liu J E, Huang W X. Effects of natural grass on soil microbiology, nutrient and fruit quality of Nanfeng tangerine yard [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(8): 1551-1558 (in Chinese)
- [18] 吴玉森, 张艳敏, 冀晓昊, 张芮, 刘大亮, 张宗营, 李文燕, 陈

- 学森. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤养分、酶活性及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 99-108
- Wu Y S, Zhang Y M, Ji X H, Zhang R, Liu D L, Zhang Z Y, Li W Y, Chen X S. Effects of natural grass on soil nutrient, enzyme activity and fruit quality of pear orchard in Yellow River Delta[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(1): 99-108 (in Chinese)
- [19] 陈学森, 张瑞洁, 王艳廷, 王楠, 姜生辉, 许海峰, 刘静轩, 王得云, 曲常志, 张艳敏, 姜远茂, 毛志泉. 苹果园种植长柔毛野豌豆结合自然生草对土壤综合肥力的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(12): 2325-2334
- Chen X S, Zhang R J, Wang Y T, Wang N, Jiang S H, Xu H F, Liu J X, Wang D Y, Qu C Z, Zhang Y M, Jiang Y M, Mao Z Q. Effects of growing hairy vetch(*Vicia villosa*) on the soil nutrient, enzyme activities and microorganisms in apple orchard[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(12): 2325-2334 (in Chinese)
- [20] 魏树伟, 王少敏, 张勇, 冉昆, 王宏伟. 不同土壤管理方式对梨园土壤养分、酶活性及果实风味品质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 46-55
- Wei S W, Wang S M, Zhang Y, Ran K, Wang H W. Effects of different soil management methods on the soil nutrients, enzyme activity and fruit quality of pear orchards[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(12): 46-55 (in Chinese)
- [21] 刘富庭, 张林森, 李雪薇, 李丙智, 韩明玉, 谷洁, 王晓琳. 生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 355-363
- Liu F T, Zhang L S, Li X W, Li B Z, Han M Y, Gu J, Wang X L. Effects of inter-row planting grasses on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in Weibei dryland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 355-363 (in Chinese)
- [22] 潘学军, 张文娥, 樊卫国, 蓬桂华, 罗国华. 自然生草和间种绿肥对盆栽柑橘土壤养分、酶活性和微生物的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(8): 1235-1240
- Pan X J, Zhang W E, Fan W G, Peng G H, Luo G H. Effects of sod culture and intercropping green manure on the soil nutrient, enzyme activities and microorganisms in bonsai *Citrus*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(8): 1235-1240 (in Chinese)
- [23] 谷艳蓉, 张海伶, 胡艳红. 果园自然生草覆盖对土壤理化性状及大桃产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(12): 103-107
- Gu Y R, Zhang H L, Hu Y H. Effect of natural grasses cover on soil properties and yield and quality of peach [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(12): 103-107 (in Chinese)
- [24] 王艳廷, 冀晓昊, 张艳敏, 吴玉森, 安萌萌, 张芮, 王立霞, 张晶, 刘文, 李敏, 李文燕, 陈学森. 自然生草对黄河三角洲梨园土壤物理性状及微生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5374-5384
- Wang Y T, Ji X H, Zhang Y M, Wu Y S, An M M, Zhang R, Wang L X, Zhang J, Liu W, Li M, Li W Y, Chen X S. Effects of self-sown grass on soil physical properties and microbial diversity of pear orchards in Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5374-5384 (in Chinese)
- [25] 曹铨, 沈禹颖, 王自奎, 张小明, 杨轩. 生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J]. 草业学报, 2016, 25(8): 180-188
- Cao Q, Shen Y Y, Wang Z K, Zhang X M, Yang X. Effects of living mulch on soil physical and chemical properties in orchards: A review[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(8): 180-188 (in Chinese)
- [26] 白岗栓, 邹超煜, 杜社妮. 渭北旱塬果园自然生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 151-158
- Bai G S, Zou C Y, Du S N. Effects of self-sown grass on soil moisture and tree growth in apple orchard on Weibei dry plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(3): 151-158 (in Chinese)
- [27] 袁新田, 焦加国, 朱玲, 刘满强, 李辉信, 胡锋. 不同秸秆施用方式下接种蚯蚓对土壤团聚体及其中碳分布的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 968-974
- Yuan X T, Jiao J G, Zhu L, Liu M Q, Li H X, Hu F. Effects of earthworm activity on soil aggregates' stability and organic carbon distribution under different manipulations of corn straw [J]. *Soils*, 2011, 43(6): 968-974 (in Chinese)
- [28] 乔玉辉, 曹志平, 王宝清, 徐芹. 不同培肥措施对低肥力土壤生态系统蚯蚓种群数量的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 700-705
- Qiao Y H, Cao Z P, Wang B Q, Xu Q. Impact of soil fertility maintaining practice on earthworm population in low production agro-ecosystem in North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 700-705 (in Chinese)
- [29] 吴迪, 刘满强, 焦加国, 薛利红, 李辉信, 胡锋, 杨林章. 不同有机物料接种蚯蚓对设施菜地土壤培肥及作物生长的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 470-476
- Wu D, Liu M Q, Jiao J G, Xue L H, Li H X, Hu F, Yang L Z. Effects of inoculating earthworm to vegetable field on soil fertility and plant growth following different organic amendments[J]. *Soils*, 2019, 51(3): 470-476 (in Chinese)
- [30] 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 (in Chinese)
- [31] 于建光, 常志州, 沈磊, 张建英, 杜静, 徐跃定. 稻秸蚯蚓堆制后的物理、化学及微生物特性变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1503-1508
- Yu J G, Chang Z Z, Shen L, Zhang J Y, Du J, Xu Y D. Changes in physical-chemical and microbial properties of rice

- straw through vermicomposting [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1503-1508 (in Chinese)
- [32] 于建光, 李辉信, 陈小云, 胡锋. 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, Hu F. Effects of straw application and earthworm inoculation on soil labile organic carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 818-824 (in Chinese)
- [33] 于建光, 陈小云, 刘满强, 陶军, 李辉信, 胡锋, 王霞. 秸秆施用下接种蚯蚓对农田土壤微生物特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 99-103
Yu J G, Chen X Y, Liu M Q, Tao J, Li H X, Hu F, Wang X. Effects of earthworm activities on soil microbial characteristics under different straw amendment method in cropland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 99-103 (in Chinese)
- [34] 常大丽, 余碧霞, 陈运动, 张旭辉, 焦加国, 王东升, 李辉信, 高继明, 徐莉. 蚯蚓堆肥用作苹果育苗基质的应用研究[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 917-923
Chang D L, Yu B X, Chen Y D, Zhang X H, Jiao J G, Wang D S, Li H X, Gao J M, Xu L. Vermicompost compost replacing peat in apple seedlings[J]. *Soils*, 2018, 50(5): 917-923 (in Chinese)
- [35] 申为宝, 杨洪强, 乔海涛, 申洁. 蚯蚓对苹果园土壤生物学特性及幼树生长的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36(10): 1405-1410
Shen W B, Yang H Q, Qiao H T, Shen J. Effects of earthworm on biological characteristics of soil and the growth of apple trees[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36(10): 1405-1410 (in Chinese)
- [36] 金亚波, 薛进军, 覃其云, 崔美香, 赵志军, 刘贵巧, 刘子英. 蚯蚓对铁的富集转移及对苹果根铁营养影响研究[J]. *华北农学报*, 2009, 24(6): 145-148
Jin Y B, Xue J J, Qin Q Y, Cui M X, Zhao Z J, Liu G Q, Liu Z Y. Effect of earthworm to iron enriched and translocate and iron nutrient of roots of apple[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(6): 145-148 (in Chinese)
- [37] 崔美香, 台社珍, 赵志军, 刘贵巧, 刘子英, 薛进军. 蚯蚓和铁处理对苹果根铁营养影响[J]. *广西植物*, 2010, 30(4): 513-516, 439
Cui M X, Tai S Z, Zhao Z J, Liu G Q, Liu Z Y, Xue J J. Effect of treating with earthworm and iron on iron nutrition of apple roots[J]. *Guihaia*, 2010, 30(4): 513-516, 439 (in Chinese)
- [38] 申为宝, 杨洪强, 申洁, 乔海涛. 蚯蚓和有效微生物群对果园土壤镉吸附-解吸及苹果镉含量的影响[J]. *园艺学报*, 2008, 35(11): 1561-1566
Shen W B, Yang H Q, Shen J, Qiao H T. The effects of earthworms and effective microorganisms on the adsorption-desorption of cadmium in orchard soils and cadmium accumulation in apple[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35(11): 1561-1566 (in Chinese)
- [39] 潘凤兵, 王海燕, 王晓芳, 陈学森, 沈向, 尹承苗, 毛志泉. 蚓粪减轻苹果砷木平邑甜茶幼苗连作障碍的土壤生物学机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(6): 925-932
Pan F B, Wang H Y, Wang X F, Chen X S, Shen X, Yin C M, Mao Z Q. Biological mechanism of vermicompost reducing the replant disease of *Malus hupehensis* Rehd seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(6): 925-932 (in Chinese)
- [40] 董鸣. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法—陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997
Dong M. *Standard Methods for Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Research Network-survey, Observation and Analysis of Terrestrial Bio-communities* [M]. Beijing: Standards Press of China, 1997 (in Chinese)
- [41] 白岗栓, 郭江平, 杜建会. 自然生草对渭北旱塬苹果园小气候及果实灼伤和早期落叶病的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(2): 324-332
Bai G S, Guo J P, Du J H. Effects of natural grass on microclimate of apple orchard, fruit sunburn and leaf early deciduous disease in Weibei dry plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 324-332 (in Chinese)
- [42] 陈文媛, 张少妮, 华瑞, 徐学选. 黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 62-69
Chen W Y, Zhang S N, Hua R, Xu X X. Effects of forestland and grassland restoration process on soil infiltration characteristics in loess hilly region[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 62-69 (in Chinese)
- [43] 李彦霈, 邵明安, 王娇. 蚯蚓粪施用方式及用量对土壤入渗的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 331-339
Li Y P, Shao M A, Wang J. Effects of pattern and amount of earthworm cast application on water infiltration in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 331-339 (in Chinese)
- [44] 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 (in Chinese)
- [45] 郭海艳, 李雪琴, 王章鸿, 沈飞. 蚯蚓粪生物炭对Cu(II)的吸附性能[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(7): 3811-3818
Guo H Y, Li X Q, Wang Z H, Shen F. Performances of Cu(II) adsorption by biochar derived from earthworm manure[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(7): 3811-3818 (in Chinese)
- [46] 卢明珠, 吕宪国, 管强, 武海涛. 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1209-1225
Lu M Z, Lv X G, Guan Q, Wu H T. Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1209-1225 (in Chinese)

- [47] Yao S R, Merwin I A, Bird G W, Abawi G S, Thies J E. Orchard floor management practices that maintain vegetative or biomass groundcover stimulate soil microbial activity and alter soil microbial community composition [J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1/2): 377-389
- [48] 郑伟尉, 徐凯, 刘兴泉, 陈梅生, 刘辉, 邵果园. 自然生草对梨园小气候生态因子和果实品质的影响研究[J]. 中国南方果树, 2013, 42(5): 28-32
- Zheng W W, Xu K, Liu X Q, Chen M S, Liu H, Shao G Y. Effect of sod culture on ecological factors to orchard microclimate and fruit quality of pear[J]. *South China Fruits*, 2013, 42(5): 28-32 (in Chinese)
- [49] 彭晚霞, 宋同清, 肖润林, 杨知建, 王久荣, 李盛华, 夏艳珺. 覆盖与间作对亚热带丘陵茶园地温时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 778-782
- Peng W X, Song T Q, Xiao R L, Yang Z J, Wang J R, Li S H, Xia Y J. Effects of mulching and intercropping on temporal-spatial variation of soil temperature in tea plantation in subtropical hilly region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 778-782 (in Chinese)
- [50] 黄金辉, 廖允成, 高茂盛, 殷瑞敬. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2652-2658
- Huang J H, Liao Y C, Gao M S, Yin R J. Effects of tillage and mulching on orchard soil moisture content and temperature in Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2652-2658 (in Chinese)
- [51] 白岗栓, 周楠, 邵发琦, 杜建会, 郭江平. 自然生草对渭北旱塬苹果园土壤氮及果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 100-109
- Bai G S, Zhou N, Shao F Q, Du J H, Guo J P. Effects of self-sown grass on soil nitrogen and apple fruit quality in the Weibei dry plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (10): 100-109 (in Chinese)
- [52] 胡艳霞, 孙振钧, 周法永, 刘小秧, 曹焯程. 蚯蚓粪对黄瓜苗期土传病害的抑制作用[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1106-1115
- Hu Y X, Sun Z J, Zhou F Y, Liu X Y, Cao A C. Study on suppressness effect of vermicompost to soil-borne disease of cucumber seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1106-1115 (in Chinese)
- [53] 胡艳霞, 孙振钧, 孙永明, 王车辉. 蚯蚓粪对黄瓜炭疽病的系统诱导抗性作用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1358-1362
- Hu Y X, Sun Z J, Sun Y M, Wang C H. Earthworm feces-induced systemic resistance of cucumber against anthracnose [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (8): 1358-1362 (in Chinese)
- [54] 刘大伟, 韩文昊, 张艳菊, 吴凤芝, 刘霆. 蚯蚓粪及浸提液对番茄根结线虫的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(5): 686-691
- Liu D W, Han W H, Zhang Y J, Wu F Z, Liu T. Evaluation of control effect of vermicompost and its extracts on tomato root-knot nematode [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2017, 33(5): 686-691 (in Chinese)
- [55] 王明友, 井大炜, 张红, 李士平, 郑芳. 蚯蚓粪对豇豆土壤活性有机碳及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1404-1410
- Wang M Y, Jing D W, Zhang H, Li S P, Zheng F. Effects of vermicompost on active organic carbon and microbial activity in cowpea soil [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(7): 1404-1410 (in Chinese)
- [56] 田给林, 张潞生. 蚯蚓粪缓解草莓连作土壤障碍的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 759-767
- Tian G L, Zhang L S. Alleviation of vermicompost to obstacle in sterilized continuous cropping soil in strawberry production [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 759-767 (in Chinese)
- [57] 李明霞, 白岗栓, 闫亚丹, 耿桂俊, 杜社妮. 山地苹果树更新修剪对树体营养及生长的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(1): 139-144
- Li M X, Bai G S, Yan Y D, Geng G J, Du S N. Effects of renewal pruning on mountain apple tree's nutrition and growth [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(1): 139-144 (in Chinese)

责任编辑: 董金波