

免耕对土壤理化性质及作物产量的影响

黄达¹, 姜玉琴², 谢先进^{1*}

(1. 河南省土壤肥料站, 河南郑州 450000; 2. 浚县土壤肥料工作站, 河南鹤壁 458000)

摘要 免耕是一项重要的农田耕作措施, 为保护性耕作体系的核心内容, 已在全球范围内得到大面积推广应用。在前人研究的基础上, 就免耕对土壤的物理、化学、生物学性质以及作物产量的影响作用进行了归纳总结, 以期对免耕的发展提供支持。

关键词 土壤; 免耕; 理化性质; 作物产量

中图分类号 S345 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)02-0009-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.02.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Influence of No-tillage on Soil Physicochemical Properties and Crop Yield

HUANG Da¹, JIANG Yu-qin², XIE Xian-jin¹ (1. Soil and Fertilizer Station of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450000; 2. Soil and Fertilizer Station of Xun County, Hebi, Henan 458000)

Abstract No-tillage is an important farmland management practice. It is the core content of conservation tillage system and has been widely applied all over the world. Based on previous studies, the effects of no-tillage on soil physical, chemical, biological properties as well as crop yield were summarized in order to provide support for the development of no-tillage.

Key words Soil; No-tillage; Physical and chemical properties; Crop yield

20世纪30年代, 由于连年翻耕造成土壤风蚀和水蚀严重, 表层土壤大量流失, 美国发生了大规模的“黑风暴”, 迫使人们开始寻找新的耕作方式^[1-2]。保护性耕作应运而生, 其核心就是最大限度地减少土壤扰动, 维持土壤结构。保护性耕作一开始称为免耕法, 随着研究的不断发展, 其内容得到补充完善, 并于1995年被正式命名^[2]。联合国粮食及农业组织(FAO)对保护性耕作给出的定义是: 一种旨在保持永久性土壤覆盖、最低程度的土壤耕作以及植物物种多样化的耕作体系; 其加强了地表上下的生物多样性和自然生物过程, 有助于提高水分和养分的利用效率, 提高并维持作物产量。保护性耕作具有3项原则: 一是持续最低限度的土壤机械扰动, 即土壤扰动仅限于播种和施肥, 扰动区域范围小于15 cm宽或小于栽培区域面积的25%; 二是永久性的土壤有机质覆盖, 覆盖区域≥30%; 三是生物多样化, 轮作至少涉及3种作物种类。美国最早开始研究保护性耕作, 于20世纪60年代大面积推广应用, 20世纪80年代将其发展为主流耕作技术^[2]。目前保护性耕作已在全世界范围内得到研究与推广, 但总体上集中于美国、澳大利亚、加拿大等农业发达国家。

我国于20世纪60~80年代开始引入保护性耕作^[3-4], 此后进行了大量的试验研究并于北方干旱、半干旱地区开展推广应用^[5]。我国保护性耕作体系大致分为免耕与少耕两个方向, 免耕为核心内容, 应用最为广泛。免耕是不经过整地, 而直接进行播种的耕作方式, 与传统翻耕相比, 免耕对土壤物理、化学、生物学性质以及作物产量均产生了不同的影响作用, 笔者对其进行了归纳总结。

1 免耕对土壤物理性质的影响

1.1 土壤容重 土壤容重反映土壤紧实状况, 是表征土壤物

理性质的一项重要指标。在免耕体系中, 土壤扰动幅度降至最低, 能够保持土壤原状结构。目前关于免耕对土壤容重的影响效应存有较大分歧。有研究认为, 免耕条件下长期机械碾压而不疏松土壤会产生强烈的压实效应, 从而导致土壤变硬、容重增大^[6-8]; 但土壤容重不会无限增加, 将随着时间的推移达到一种稳定状态, 或者在连续免耕12年后^[9], 或者在连续免耕2~3年后^[10], 即关于土壤容重趋于稳定所需年限的研究结论不一致。也有研究表明, 免耕对土壤容重不产生影响, 即使在较长时间尺度上, 免耕与翻耕之间也无差异^[11-12]。还有研究指出, 免耕具有降低土壤表层容重的效应^[13]。张锡洲等^[14]通过对比不同免耕年限土壤发现, 0~15 cm土壤容重随着免耕年限增加而呈现降低趋势, 并在免耕7~8年后趋于稳定, 而15~30 cm土壤容重无显著变化。陈强等^[15]认为, 免耕对土壤容重的影响作用不能一概而论, 需结合当地土壤质地、农田管理措施、气候环境因子及作物类型等多种因素进行判定。Li等^[9]利用Meta分析法研究了全球尺度上免耕条件下土壤物理性质对农艺措施和环境条件的反应, 结果显示, 免耕对土壤容重及其他土壤性质的影响效应主要取决于气候条件(年均降水量和年均气温)、试验持续时间、土壤质地, 而其中前两者最具有决定性。

1.2 土壤团聚体 土壤团聚体是土壤结构形成的基本单元, 其大小、数量与分布直接关系土壤理化性质, 是反映土壤肥力大小、耕层构造好坏的重要指标^[16]。已有大量研究指出, 与传统翻耕相比, 免耕能够显著提高土壤团聚体的稳定性, 增强土壤团聚作用^[17-19]。但对不同学者土壤团聚体不同分级的影响研究结果存在一定差异。王峻等^[20]研究发现, 免耕条件下0~20 cm土层大团聚体(> 2.000 mm)含量增加35.79%, 中团聚体(0.250~2.000 mm)增加30.81%, 微团聚体(0.106~0.250 mm)增加25.80%。Wu等^[21]得出了相同的结论, 即免耕相较于传统翻耕增加了各级团聚体含量。然而Six等^[22]的研究结果却表明, 免耕显著增加了大团聚体的含

基金项目 国家重点研发计划(2018YFD0300705); 国家重点研发计划(2018YFD0200606)。

作者简介 黄达(1985—), 女, 河南睢县人, 农艺师, 博士, 从事土壤肥料研究与推广工作。* 通信作者, 农艺师, 硕士, 从事土壤肥料研究与推广工作。

收稿日期 2021-04-14

量但减少了微团聚体含量。

1.3 土壤水分 免耕能够显著增加土壤含水量和贮水量,有利于提高土壤水分利用效率。余海英等^[23]测定得出免耕地块0~100 cm土壤贮水量与含水量均明显高于翻耕地,增幅分别为2.7%~30.3%、3.4%~12.8%。丁晋利等^[24]通过研究免耕对冬小麦不同生育时期土壤剖面水分的影响指出,较传统翻耕,免耕不同程度地增加了冬小麦各个生育期0~100 cm土层土壤平均含水量,冬小麦拔节期和扬花期0~40 cm土层平均含水量分别增加了14.0%和10.3%。在西北旱区,实施保护性耕作7年后,与翻耕相比,免耕和免耕+秸秆还田处理土壤饱和含水量分别提高了5.69%、6.85%,饱和导水率分别提高了9.11%和24.47%^[19]。在晋南旱地,免耕较翻耕显著增加了0~100 cm土层土壤贮水量,且主要显著提高50~100 cm土层土壤贮水量^[25]。

2 免耕对土壤养分的影响

2.1 土壤有机碳 土壤有机碳库对维持土壤肥力、土壤蓄水力以及作物生产力具有重要作用^[26-27]。与传统翻耕相比,免耕有助于土壤有机碳固定与贮存^[28-29]。免耕能够增加表层尤其0~5 cm土层土壤有机碳含量^[22],有效控制土壤碳损失,减少农田CO₂释放量,降低温室效应^[30]。West等^[31]通过分析全球67个长期定位试验得出,除了小麦一休闲系统土壤碳积累不明显,由传统翻耕转变为免耕后平均每年固定有机碳为(57±14) g/m²,且在转变的5~10年达到峰值,15~20年达到新的平衡。田慎重等^[32]研究指出,连续免耕12年后0~30 cm土层土壤有机碳储量比试验初期提高38%,12年总固碳量达16.69 t/hm²。王旭东等^[33]对我国东北、华北地区4个长期定位试验点进行了联网研究,结果表明,与传统耕作相比,免耕能够显著提高0~10 cm表层土壤有机碳储量,但对0~80 cm土层总有机碳储量的影响具有区域性差异,某些地区呈现增加趋势,但另一些地区呈现减少趋势。

2.2 土壤氮、磷、钾 土壤养分含量直接决定耕地质量以及作物生长状态。有研究表明,在淮北平原潮土区,与翻耕秸秆还田相比,免耕秸秆还田处理提高了0~20 cm土层有机质、全氮含量,增幅分别为8.98%、4.63%,但降低了土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量;而在20~60 cm土层,免耕秸秆还田处理土壤有机质、全氮、全磷含量显著降低,但有利于土壤速效养分增加^[34]。王改玲等^[35]研究表明,免耕可显著增加0~10 cm土层土壤氮素和钾素的累积,全氮、碱解氮和速效钾含量随着免耕年限的增加而增加,但是有效磷含量减少,11年免耕覆盖和15年免耕覆盖,表层0~10 cm土壤有效磷含量比传统耕作分别降低了56.1%和51.9%。王昌全等^[36]研究指出,连续8年免耕后,土壤全氮含量高达3.1 g/kg,有效磷和速效钾含量分别提高了95.8%、61.0%。然而贾凤梅等^[37]却研究发现,免耕处理土壤有机碳、全氮、有效磷、铵态氮和硝态氮含量低于翻耕处理,土壤全磷含量差异不显著。也有研究指出,不同土壤质地和时间年限下,免耕对土壤有效磷和速效钾的影响程度会出现差异;就黏土而言,连续免耕增加了各土层有效磷含量,免耕1年后速效钾含量增加

12%,免耕2年后速效钾含量则下降16%~33%;中壤土免耕后,各土层有效磷含量逐年下降,而速效钾含量呈现上升趋势,免耕1年后增幅0.6%~33%,免耕2年后增幅3%~18%^[38]。由以上结果可看出,免耕对土壤养分的影响效应不同研究之间存在差异,可能受到了多种环境条件的制约。

3 免耕对土壤生物性状的影响

土壤微生物是土壤的重要组成部分,参与土壤养分循环,对维持土壤生产力具有重要作用。免耕具有显著增加土壤微生物量的作用^[39]。潘孝晨等^[40]研究指出,相较于翻耕和旋耕,免耕处理增加了土壤微生物生物量碳、氮含量以及土壤微生物多样性。免耕对土壤微生物的影响会因为环境条件变化以及免耕年限不同而有所差异。肖美佳等^[39]通过Meta分析指出,我国农业区免耕对土壤微生物量碳的影响作用具有区域性差异,原因在于不同区域温度与降水量不同;免耕对土壤微生物量碳的增加效应随着年降水量和年均温度的增加而增加,且以年降水量>800 mm,年均温度>15℃时最为显著;同时还指出,免耕年限显著影响土壤微生物碳含量,且以免耕年限≥8年效果最佳。此外,免耕对土壤微生物的影响作用因土层深度不同而不同。孔凡磊等^[41]研究指出,华北平原小麦—玉米轮作区,免耕处理微生物量碳随土壤层次减少而显著降低,同时指出,在小麦生育期间,0~20 cm土层微生物量碳稳定性表现为翻耕>旋耕>免耕,20~30 cm土层微生物量碳稳定性表现为免耕>翻耕>旋耕。张明园等^[42]研究结果与之类似,0~5 cm土层微生物量碳以免耕最高,翻耕最低;5~10 cm土层翻耕与旋耕之间无差异,免耕最低;10~20 cm土层以翻耕最高,免耕最低;20~30 cm各耕作处理下微生物量碳均比较低,其中以免耕最低。

4 免耕对作物产量的影响

关于免耕对作物产量的影响在不同研究中存在争议^[43]。有研究认为,免耕能提高作物干物质积累量,加快籽粒灌浆速率,改善产量构成因素,从而增加作物产量^[44-45]。金亚征等^[46]通过连续5年定位试验指出,在华北平原小麦—玉米轮作区,小麦季免耕较旋耕与翻耕增加了玉米吐丝前后干物质积累,提高了玉米吐丝后光合势和净同化率,从而增加了夏玉米产量。类似的长期定位试验(14年)结果显示,该地区免耕覆盖条件下,小麦产量平均增加12.43%,玉米产量平均增加24.02%,而小麦—玉米周年产量平均增加18.50%^[45]。在黄土高原区,与传统翻耕相比,免耕处理提高了小麦叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度、花后光合物质同化量对籽粒产量贡献率,增幅分别为12%、4.7%、2.7%、41.7%,从而增加了小麦产量。也有研究指出,与传统翻耕相比,免耕对产量无明显影响^[43,47]。同时有研究认为免耕降低了作物产量^[43,48]。吕秋爽等^[7]通过整合分析指出,免耕条件下,玉米根系生物量、生物量密度和比根长无显著变化,然而玉米根长、根长密度和根表面积显著降低,降幅分别为13.8%、15.7%和22.8%,且玉米产量显著降低,降幅为8.4%。在西北旱作区,与传统耕作相比,免耕处理春小麦产量降低了9.62%,但免耕+秸秆覆盖处理增加了春小麦产量,增幅为

9.33%, 原因在于免耕配合秸秆覆盖能够改善土壤水分状况和养分空间分布, 从而促进植株的生长发育。刘世举等^[49]的研究结果与之类似, 在西北旱作区 9 年田间定位试验的结果显示, 免耕较翻耕降低冬小麦产量的幅度为 7.6%。为明确免耕对产量的影响效应, 张雄智等^[50]基于 1995—2019 年公开发表的文献, 收集并综合分析了 1 162 对研究数据, 结果显示, 在我国免耕较翻耕表现出增产的试验占比 42.70%, 且免耕对产量的影响与平均气温呈极显著正相关。免耕对作物产量的影响效应之所以呈现非常大的差异性, 可能是因为受到了环境条件和实施年限的影响。研究表明, 干燥指数是影响产量对免耕响应程度的最重要因素^[43, 51]。在干燥指数较低时(半干旱环境), 免耕条件下产量一般高于传统翻耕^[43, 52-53], 但在湿润气候条件下, 传统翻耕方式产量则高于免耕^[43, 54]。同时产量对免耕的响应程度也取决于作物种类^[43]。研究中还存在这样的观点: 免耕的影响作用会随着时间变化, 即实施免耕产生的负面影响是一种短期反应, 会随着时间的推移而衰弱或消失^[55], 其优越性的体现一般需要 5 年时间^[56]。

5 结论与展望

免耕对土壤理化生物性状以及作物产量具有明显的影 响。相对于传统翻耕, 免耕能够增加土壤团聚体含量、土壤含水量和贮水量, 表层土壤有机碳含量以及微生物含量。但免耕对土壤容重、土壤氮磷钾养分含量以及作物产量的影响效应在不同的研究条件下, 如不同地区、不同作物种类, 存在很大差异, 需要更加综合系统的研究进一步明确免耕的影响效应。在未来研究中, 应建立长期定位田间试验, 综合考虑各项影响因素, 评价免耕的效用, 以确定免耕最适合的推广应用区域。此外, 免耕还应与其他耕作方式, 以及相关的农业管理措施有机结合起来, 扬长避短, 最大限度地发挥免耕的正效应。

参考文献

[1] 韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. 土壤与作物, 2015, 4(4): 145-150.

[2] 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 43-48.

[3] 常春丽, 刘丽平, 张立峰, 等. 保护性耕作的发展研究现状及评述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(2): 167-172.

[4] 张海林, 高旺盛, 陈阜, 等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 16-20.

[5] 齐华, 李以锋, 赵明, 等. 我国北方旱作农田保护性耕作发展与展望[J]. 作物杂志, 2020(2): 16-19.

[6] BOGUNOVIC I, PEREIRA P, KISIC I, et al. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia) [J]. Catena, 2018, 160: 376-384.

[7] 吕秋爽, 周斌, 王朋. 免耕对玉米根系属性和产量以及土壤物理性质的影响: 整合分析[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3492-3499.

[8] 张统帅, 闫丽娟, 李广, 等. 免耕和秸秆覆盖对旱作区土壤氮素、水分和春小麦产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(8): 1329-1341.

[9] LI Y, LI Z, CUI S, et al. Trade-off between soil pH, bulk density and other soil physical properties under global no-tillage agriculture [J/OL]. Geoderma, 2020, 361 [2020-11-17]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114099>.

[10] 罗珠珠, 黄高宝, 张国盛. 保护性耕作对黄土高原旱地地表土容重和水分入渗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 7-11.

[11] FERRERAS L A, COSTA J L, GARCIA F O, et al. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleud-

oll of the southern "Pampa" of Argentina [J]. Soil & tillage research, 2000, 54(1/2): 31-39.

[12] MONDAL S, CHAKRABORTY D, BANDYOPADHYAY K, et al. A global analysis of the impact of zero-tillage on soil physical condition, organic carbon content, and plant root response [J]. Land degradation & development, 2020, 31(5): 557-567.

[13] LÓPEZ-VÁZQUEZ A, CADENA-ZAPATA M, CAMPOS-MAGAÑA S, et al. Comparison of energy used and effects on bulk density and yield by tillage systems in a semiarid condition of Mexico [J]. Agronomy, 2019, 9(4): 1-18.

[14] 张锡洲, 李廷轩, 余海英, 等. 水旱轮作条件下长期自然免耕对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 145-147.

[15] 陈强, 孙涛, 宋春雨. 免耕对土壤物理性状及作物产量影响[J]. 草业科学, 2014, 31(4): 650-658.

[16] 闫雷, 董天浩, 喇乐鹏, 等. 免耕和秸秆还田对东北黑土区土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 181-188.

[17] SOMASUNDARAM J, REEVES S, WANG W J, et al. Impact of 47 years of no tillage and stubble retention on soil aggregation and carbon distribution in a Vertisol [J]. Land degradation & development, 2017, 28(5): 1589-1602.

[18] OLIVEIRA F C C, FERREIRA G W D, SOUZA J L S, et al. Soil physical properties and soil organic carbon content in northeast Brazil: long-term tillage systems effects [J]. Scientia agricola, 2020, 77(4): 1-6.

[19] 张仁陟, 罗珠珠, 蔡立群, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1-10.

[20] 王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 121-127.

[21] WU J, STEPHEN Y, CAI L Q, et al. Effects of different tillage and straw retention practices on soil aggregates and carbon and nitrogen sequestration in soils of the northwestern China [J]. Journal of arid land, 2019, 11(4): 567-578.

[22] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. Soil science society of America journal, 2000, 64(2): 681-689.

[23] 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 99-104.

[24] 丁晋利, 魏红义, 武继承, 等. 免耕对冬小麦农田土壤水分及可溶性碳和硝态氮动态变化的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(2): 326-331.

[25] 杨娜, 王珂, 席吉龙, 等. 长期定位免耕和施有机肥对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2020(10): 61-65, 70.

[26] MACHADO S. Soil organic carbon dynamics in the Pendleton long-term experiments: Implications for biofuel production in Pacific Northwest [J]. Agronomy journal, 2011, 103(1): 253-260.

[27] 李倩, 李晓秀, 吴会军, 等. 不同气候和施肥条件下保护性耕作对农田土壤碳氮储量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1539-1549.

[28] SONG K, YANG J, XUE Y, et al. Influence of tillage practices and straw incorporation on soil aggregates, organic carbon, and crop yields in a rice-wheat rotation system [J]. Scientific reports, 2016, 6: 1-12.

[29] AWALE R, EMESON M A, MACHADO S. Soil organic carbon pools as early indicators for soil organic matter stock changes under different tillage practices in Inland Pacific Northwest [J]. Frontiers in ecology and evolution, 2017, 5: 1-13.

[30] 张国, 王效科. 我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 872-881.

[31] WEST T O, POST W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis [J]. Soil science society of America journal, 2002, 66(6): 1930-1946.

[32] 田慎重, 王瑜, 宁堂原, 等. 转变耕作方式对长期旋免耕农田土壤有机碳库的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 98-105.

[33] 王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 等. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 12-24.

[34] 伍震威, 阮仁杰, 黄界颖, 等. 耕作方式与秸秆还田对潮土养分剖面分布的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(15): 48-52.

[35] 王改玲, 郝明德, 许继光, 等. 保护性耕作对黄土高原南部地区小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 539-544.

[36] 王昌全, 魏成明, 李廷强, 等. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(2): 152-154, 187.

- immune, antioxidant response and resistance to *Aeromonas hydrophila* [J]. *Fish and shellfish immunology*, 2016, 58: 572–583.
- [19] 曾福源, 伍艳清, 邱明生, 等. 溶藻弧菌Ⅲ型分泌系统 C-环组分 VscQ 的原核表达及免疫原性[J]. *安徽农业通报*, 2020, 26(18): 101–105.
- [20] 程海燕, 庞欢瑛, 鲁义善, 等. 溶藻弧菌 acfA 基因克隆与生物信息学分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2014, 34(1): 9–14.
- [21] 刘克春. 6 种中草药对 2 株致病菌的抑菌效果比较[J]. *水产养殖*, 2013, 34(10): 49–54.
- [22] 冯锐基, 庞欢瑛, 黄郁葱, 等. 五倍子和石榴皮对溶藻弧菌及其生物膜的体外抑制作用[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(11): 1–3, 11.
- [23] 刘明珠, 肖贺贺, 余庆, 等. 黄连水提物对卵形鲳鲹源溶藻弧菌的抑菌作用[J]. *广西科学院学报*, 2019, 35(2): 119–123.
- [24] 王凯, 于永翔, 张正, 等. 黄连素对海水病原菌的杀灭效果及药效稳定性[J]. *水产科学*, 2019, 38(1): 67–72.
- [25] NG'AMBI J W, LI R H, MU C K, et al. Dietary administration of saponin stimulates growth of the swimming crab *Portunus trituberculatus* and enhances its resistance against *Vibrio alginolyticus* infection [J]. *Fish and shellfish immunology*, 2016, 59: 305–311.
- [26] 朱宇嘉, 辛年香, 朱志东, 等. 中草药复方对虾体内外抑弧菌效果研究[J]. *科学养鱼*, 2019(7): 44–45, 29.
- [27] HOSSAIN M M, UDDIN M I, ISLAM H, et al. Diagnosis, genetic variations, virulence, and toxicity of AHPND-positive *Vibrio parahaemolyticus* in *Penaeus monodon* [J]. *Aquaculture international*, 2020, 28(6): 2531–2546.
- [28] 余达勇, 陈碧秀, 钟永军, 等. 对虾急性肝胰腺坏死致病菌 HY3 鉴定及耐药分析[J]. *水产科学*, 2020, 39(6): 844–851.
- [29] 谢丽玲, 赵水灵, 余飞, 等. 黄连素对 3 种水产动物致病菌的抑制作用研究[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(4): 45–49.
- [30] 任海, 华智杰, 魏云卓, 等. 38 种中草药对大菱鲆源副溶血弧菌的抑杀效果[J]. *河北科技师范学院学报*, 2020, 34(1): 24–29.
- [31] 戴碧鑫, 董碧莲, 蔡延渠, 等. 黄芩原药材、药渣的黄芩苷含量测定及体外抗菌活性研究[J]. *广州中医药大学学报*, 2020, 37(4): 722–725.
- [32] 张政, 马更勤, 王宏勋, 等. 生姜提取物对副溶血弧菌抑制作用研究[J]. *武汉轻工大学学报*, 2020, 39(2): 1–6, 21.
- [33] ZHANG Z, YANG Z Y, WANG Y G, et al. Effectiveness of garden burnet, *Sanguisorba officinalis* L., in controlling acute hepatopancreatic necrosis disease caused by infection of *Vibrio parahaemolyticus* in shrimp farming [J/OL]. *Aquaculture*, 2021, 531 [2020–11–17]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735875>.
- [34] ZHAI Q Q, LI J. Effectiveness of traditional Chinese herbal medicine, San-Huang-San, in combination with enrofloxacin to treat AHPND-causing strain of *Vibrio parahaemolyticus* infection in *Litopenaeus vannamei* [J]. *Fish and shellfish immunology*, 2019, 87: 360–370.
- [35] 程世亮, 刘新风, 郑文, 等. 鱼类无乳链球菌病[J]. *动物医学进展*, 2016, 37(2): 105–109.
- [36] 崔淼, 刘茹, 张辉杰, 等. 100 种中草药对无乳链球菌和海豚链球菌体外抑杀研究[J]. *生态科学*, 2019, 38(4): 71–76.
- [37] 丁月霞, 叶梓茵, 岑雪萍, 等. 中草药水提物对罗非鱼无乳链球菌的体外抑菌效果[J]. *中兽医医药杂志*, 2019, 38(4): 15–17.
- [38] 姚丽, 董春燕, 陈江凤, 等. 30 种中草药对鲟鱼源海豚链球菌的体外抑菌作用[J]. *水产科学*, 2020, 39(1): 111–116.
- [39] 袁国尚, 张安青, 姚丽, 等. 10 种复方中草药对鲟源海豚链球菌的体外抑菌效果研究[J]. *饲料工业*, 2020, 41(18): 13–16.
- [40] ABARIKE E D, JIAN J C, TANG J F, et al. Traditional Chinese medicine enhances growth, immune response, and resistance to *Streptococcus agalactiae* in Nile tilapia [J]. *Journal of aquatic animal health*, 2019, 31(1): 46–55.
- [41] 李飞翔. 迟缓爱德华氏菌及鱼类迟缓爱德华氏菌研究进展[J]. *江西水产科技*, 2019(2): 28–29.
- [42] 陈言峰, 邹记兴. 20 种中草药对迟缓爱德华氏菌的体外抑菌试验[J]. *水生生态学杂志*, 2011, 32(5): 110–113.
- [43] HARIKRISHNAN R, KIM M C, KIM J S, et al. Protective effect of herbal and probiotics enriched diet on haematological and immunity status of *Oplegnathus fasciatus* (Temminck & Schlegel) against *Edwardsiella tarda* [J]. *Fish and shellfish immunology*, 2011, 30(3): 886–893.
- [44] NHU T Q, BICH HANG B T, BACH L T, et al. Plant extract-based diets differently modulate immune responses and resistance to bacterial infection in striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*) [J]. *Fish and shellfish immunology*, 2019, 92: 913–924.

(上接第 11 页)

- [37] 贾凤梅, 梅淑花, 魏雅冬. 不同耕作方式下玉米农田土壤养分及土壤微生物活性变化[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 112–117.
- [38] 刘怀珍, 黄庆, 李康活, 等. 水稻连续免耕抛秧对土壤理化性状的影响初报[J]. *广东农业科学*, 2000, 27(5): 8–11.
- [39] 肖美佳, 张晴雯, 董月群, 等. 免耕对土壤微生物量碳影响的 Meta 分析[J]. *核农学报*, 2019, 33(4): 833–839.
- [40] 潘孝晨, 唐海明, 肖小平, 等. 不同土壤耕作方式下稻田土壤微生物多样性研究进展[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(23): 51–57.
- [41] 孔凡磊, 张明园, 范士超, 等. 耕作方式对长期免耕农田土壤微生物量碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 240–245.
- [42] 张明园, 黄光辉, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北冬小麦田土壤微生物量碳分布特征的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 409–414.
- [43] PITTELKOW C M, LINQUIST B A, LUNDY M E, et al. When does no-till yield more? A global meta-analysis [J]. *Field crops research*, 2015, 183: 156–168.
- [44] 李玲玲, 黄高宝, 秦舒浩, 等. 保护性耕作对绿洲灌区冬小麦产量形成的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(3): 514–520.
- [45] 邵运辉, 吕军杰, 李俊红, 等. 长期免耕覆盖对旱地小麦-玉米周年产量及水分利用的影响[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(12): 17–23.
- [46] 金亚征, 谢瑞芝, 冯聚凯, 等. 保护性耕作方式下华北平原夏玉米产量效应的研究[J]. *玉米科学*, 2008, 16(4): 143–146.
- [47] BÜCHI L, WENDLING M, AMOSSÉ C, et al. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland [J]. *Soil and tillage research*, 2017, 174: 120–129.
- [48] ALVAREZ R, STEINBACH H S A. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas [J]. *Soil and tillage research*, 2009, 104(1): 1–15.
- [49] 刘世举, 张候平, 李彤, 等. 耕作方式对西北旱作农田土壤特性及冬小麦产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(9): 1411–1418.
- [50] 张雄智, 李帅帅, 刘冰洋, 等. 免耕与秸秆还田对中国农田固碳和作物产量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(5): 1–12.
- [51] RUISE P, GIAMBALVO D, SAIÀ S, et al. Conservation tillage in a semiarid Mediterranean environment: Results of 20 years of research [J]. *Italian journal of agronomy*, 2014, 9(1): 1–7.
- [52] GRISTINA L, KEESSTRA S, NOVARA A. No-till durum wheat yield success probability in semi arid climate: A methodological framework [J]. *Soil & tillage research*, 2018, 181: 29–36.
- [53] TANER A, ARISOY R Z, KAYA Y, et al. The effects of various tillage systems on grain yield, quality parameters and energy indices in winter wheat production under the rainfed conditions [J]. *Fresenius environmental bulletin*, 2015, 24(4): 1463–1473.
- [54] MARTÍNEZ E, FUENTES J P, SILVA P, et al. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile [J]. *Soil and tillage research*, 2008, 99(2): 232–244.
- [55] BROUDER S M, GOMEZ-MACPHERSON H. The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence [J]. *Agriculture, ecosystems and environment*, 2014, 187: 11–32.
- [56] 吴红丹, 李洪文, 李问盈, 等. 中美两国保护性耕作的管理与应用对比分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2): 40–44.