◆ 药效与应用 ◆

施加生物炭对小麦菲利普孢囊线虫病的防治研究

许相奎[1],卢俊锋[2],李荣超[1],郑 潜[1],吕 岩[2],刘晓凯[1],王颢杰[1],周 扬[1],孟颢光[1],周 琳[1],崔江宽[1*]

(1. 河南农业大学植物保护学院,郑州 450046;2. 河南省许昌市植保植检站,河南许昌 461000)

摘要:为探究田间自然情况下施加生物炭对菲利普孢囊线虫病的防治效果,分别在小麦播种期、分蘖期、返青期和成熟期调查土壤线虫并测定小麦相关农艺性状指标。试验结果表明:施加生物炭,在小麦不同生长期均可抑制土壤线虫增长量,且生物炭施加量与多个小麦农艺性状指标呈正相关。在返青期和成熟期,不同施加量生物炭处理的小麦株高、根长、穗长、旗叶长、鲜重、叶表面积均显著增加。在施加量为1 200 kg/hm^{2}时,生物炭对分蘖期土壤线虫抑制率高达65.13%,减退率为38.99%,孢囊减退率为32.92%,且增产效果显著。施加生物炭不仅对菲利普孢囊线虫具有良好的防治效果,同时也可以显著改善小麦农艺性状,提高产量。

关键词:生物炭;小麦;菲利普孢囊线虫;防治效果;农艺性状

中图分类号:S435.12 **文献标志码**:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2025.01.013

Study on the control effects of biochar application aganist *Heterodera filipjevi* of wheat

XU Xiangkui[1], LU Junfeng[2], LI Rongchao[1], ZHENG Qian[1], LV Yan[2], LIU Xiaokai[1], WANG Haojie[1], ZHOU Yang[1], MENG Haoguang[1], ZHOU Lin[1], CUI Jiangkuan[1*]

(1. College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. Plant Protection and Quarantine Station of Xuchang, Henan Xuchang 461000, China)

Abstract: To investigate the control effect of biochar on *Heterodera filipjevi* under natural field conditions, soil nematodes were investigated at the period of wheat sowing, tillering, greening and maturity stages, and the several agronomic traits of wheat were measured. The results showed that the application of biochar could inhibit the growth of *Heterodera filipjevi* in the soil at the different growth stages of wheat, and the dosage of biochar was positively correlated with the multiple indices of wheat agronomic traits. The plant height, root length, ear length, flag leaf length, fresh weight and leaf surface area of wheat increased significantly at the wheat regreening period and maturation stage. At the dosage of 1 200 kg/hm^2, the inhibition rate of biochar on *Heterodera filipjevi* was 65.13%, the reduction rate was 38.99%, the reduction rate of sporocysts was 32.92%. The application of biochar not only had a good control effect on *Heterodera filipjevi*, but also could significantly improve wheat agronomic traits and increase yield.

Key words: biochar; wheat; *Heterodera filipjevi*; control effect; agronomic traits

小麦孢囊线虫作为一个复合种群共有12个有效种,其中禾谷孢囊线虫(*Heterodera avenae*)和菲利普孢囊线虫(*Heterodera filipjevi*)是危害最严重的病原线虫,严重威胁小麦生产安全[1]。据报道,在美国、巴基斯坦和沙特阿拉伯,线虫病害已造成小麦分别减产10%、15%~20%、40%~92%[2]。我国16个省市已有小麦孢囊线虫发生分布的报道,其中菲利普孢囊线虫自2010年首次在河南省许昌市发现以来,目前安徽、新疆、山东、河北等多个小麦主产区均有报道[3-4]。其对小麦的生产种植造成了极大危害,

收稿日期:2024-04-15

基金项目:河南省重大科技专项项目(221100110100);河南省自然科学基金(232300420194);河南农业大学作物学科合作研究基金(CCSR2022-1)

作者简介:许相奎,硕士研究生,主要从事植物病理学研究。E-mail:xuxiangkui2022@163.com

通信作者:崔江宽,博士,副教授,主要从事植物与线虫互作机制研究。E-mail:jk_cui@163.com

并且呈逐渐加重趋势。与禾谷孢囊线虫相比，菲利普孢囊线虫毒力强，侵染周期长，可诱发多种土传真菌病害[5]。现阶段线虫防治主要依赖化学药剂，结合小麦田间管理，以降低孢囊线虫以及由孢囊线虫诱发的一系列次生土传病害[6]。化学药剂能在一定程度上降低线虫危害，但成本高，残留大，不利于产业可持续发展。因此，寻找安全、高效、绿色的小麦孢囊线虫防控措施，对控制线虫危害，促进生产具有重要意义。

生物炭是生物质原料（如木屑、粪肥、作物秸秆等）在无氧或缺氧的条件下，通过高温热解产生的理化特性稳定，富含碳元素的固态物。其具有来源广泛，孔隙发达，吸附力强，稳定性好，富含多种养分等特征。随着研究的深入和技术的不断革新，涌现出污泥基生物炭、掺杂虾壳生物炭等多种生物炭类型[7]。国内外研究表明，施加适量的生物炭可以提高小麦、玉米、水稻等作物的光合速率、干物质积累量、转运效率等，从而提高产量[8]。Bista等[9]研究表明，施加生物炭可以改善土壤质量，提高开花期净光合速率，增加花后期营养器官光合物积累，提高穗部干物质分配比例，从而提高谷子产量。除此之外，生物炭作为一种稳定、富碳材料，农业生产中在促进作物生长的同时提高作物的产量和品质，改善土壤理化性质，提升土壤养分利用率，提高植物对包括土传病害在内的多种病害的抗性；通过竞争、重寄生、分泌抗生素等途径抑制病原菌的微生物生长，增加土壤有益微生物数量，提高植物抗逆性。常方娟等[10]研究发现，施用生物炭可改变西瓜连作成熟期根区土壤理化性质，促进土壤真菌群落结构和功能类群向健康有益方向发展。

因此，本研究通过大田试验，探究施加生物炭对菲利普孢囊线虫的防治效果，以期为菲利普孢囊线虫的防治提供支持。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于2022年10月至2023年6月在河南省许昌市魏都区一病田开展，田间菲利普孢囊线虫发生分布均匀。该地区位于河南省中部，东经113°46′35.43″，北纬33°07′34.24″，年平均气温在14.3～14.6℃。土壤类型为壤土，试验前茬作物为大豆。

1.2　试验材料

供试小麦品种：矮抗58，实验室保存。

供试产品类型：生物炭，总养分（N＋P_2O_5＋K_2O）质量分数≥5%、有机质质量分数≥45%、固定碳质量分数≥25%、容重≤0.4 g/cm^3、比表面积≥100 m^2/g，均以干基计。

1.3　试验方法

1.3.1　试验设计

试验共设1个对照组CK（不添加生物炭）和5个处理组，生物炭施加量分别为200、400、800、1 200、1 600 kg/hm^2。每小区面积为33 m^2（3.3 m×10 m）。试验设3个重复区组，各小区完全随机排列。播种前，将生物炭均匀施入，旋耕机将其均匀翻入土壤中。

1.3.2　土壤线虫与孢囊数量调查

小麦播种期、分蘖期、返青期、成熟期分别调查土壤中的线虫数量。小区调查采用5点取样法，每点由5个小样组成，每个小样200 mL土。将各点采集的土样混合均匀，自然风干后平均分成3份，各取100 mL，浅盘法分离土壤线虫，24 h后用100目和600目嵌套筛过滤，收集线虫并在体式解剖镜下调查统计。简易漂浮法分离土壤中的孢囊，取自然风干的土样100 mL置于桶中，用强水流冲击桶内土样，使其完全打散，适当搅动后静置、沉淀15 s。将土样悬浮液依次过80目和20目嵌套筛，每个样品重复3～4次，用水淋洗80目筛上残余物，确保所有孢囊均转入20目筛网内。在体式解剖镜下用挑针和毛笔将孢囊全部挑出，分别统计每个样品中的孢囊数量。

分别统计对照和各处理的线虫数，计算虫口减退率（ROC）。

$$\text{增长率}/\%=\frac{\text{不同生长期线虫数}-\text{播种期线虫数}}{\text{播种期线虫数}}\times 100$$

$$\text{抑制率}/\%=\frac{\text{对照区增长率}-\text{处理区增长率}}{\text{对照区增长率}}\times 100$$

$$\text{虫口减退率}/\%=\frac{\text{施药前线虫数}-\text{施药后线虫数}}{\text{施药前线虫数}}\times 100$$

1.3.3　小麦农艺性状的调查

返青期，在每个小区随机选取10株小麦统计分蘖；抽穗期，在每个小区采用5点取样法随机选取20株小麦测量株高；成熟期，在每个小区随机选取1 m^{2}小麦，收取全部麦穗，每小区3次重复，用塑料网袋装好，标记后带回实验室，分别统计每个小区单位面积（1 m^2）内的小麦植株数、穗数、穗粒数、千粒重，根据3个重复区组的平均值计算出1 m^{2}小麦的理论产量和理论增产率。

1.4　统计分析

采用Microsoft Excel 2016和SPSS 22.0进行试验数据计算和单因素方差分析。

2　结果分析

2.1　对孢囊线虫的抑制作用

试验前土壤线虫调查结果显示，所选试验田土壤线虫分布均匀。与不添加生物炭对照相比，不同用量生物炭处理后，返青期土壤中线虫数量均显著减少（见表1）。其中，生物炭施加量为1 200、1 600 kg/hm^{2}时抑制作用最强，抑制率分别为28.68%、31.79%，土壤线虫减退率为39.88%、31.37%。分蘖期，生物炭施加量为800 kg/hm^{2}和1 200 kg/hm^{2}的处理对土壤线虫数量抑制效果最明显，抑制率分别为53.94%、65.13%，土壤线虫减退率为22.44%、23.44%。收获期，生物炭施加量为800 kg/hm^{2}处理的孢囊抑制率最高，为42.57%，孢囊减退率为28.93%；生物炭施加量为1 200 kg/hm^{2}处理的抑制率为34.81%，孢囊减退率为32.92%，显著高于其他处理。

表 1　不同生物炭处理对土壤线虫和孢囊的抑制效果

处理/(kg/hm^2)	播种期		分蘖期			返青期			收获期		
	线虫数/条	孢囊数/个	线虫数/条	抑制率/%	减退率/%	线虫数/条	抑制率/%	减退率/%	孢囊数/个	抑制率/%	减退率/%
200	(114.07±2.71)a	(13.00±0.58)a	(234.56±10.10)b	36.63	4.07	(744.00±20.03)b	5.81	22.17	(67.00±2.21)b	19.85	14.46
400	(105.26±0.74)a	(12.67±0.70)a	(202.48±7.36)c	44.59	21.34	(610.00±5.29)c	18.21	32.81	(63.00±10.88)c	23.35	19.57
800	(112.03±2.70)a	(14.00±0)a	(198.31±6.18)cd	53.94	22.44	(601.50±14.57)d	25.48	34.28	(55.67±0.71)d	42.57	28.93
1 200	(114.59±0.58)a	(12.00±0.56)a	(181.91±14.63)d	65.13	23.44	(593.77±4.17)d	28.68	39.88	(52.54±7.19)e	34.81	32.92
1 600	(113.33±1.70)a	(13.33±0.88)a	(206.81±14.95)c	50.52	26.94	(566.57±12.78)e	31.79	31.37	(62.43±1.70)d	28.92	26.68
CK	(113.00±1.28)a	(12.67±0.67)a	(301.41±11.25)a			(775.53±1.69)a			(78.33±3.30)a		

注：线虫数、孢囊数为平均值±标准误；同一列数据后不同小写字母代表该数据在0.05水平差异显著；下同。

2.2　对小麦不同发育时期农艺性状的影响

分蘖期，施加不同量的生物炭处理对小麦株高、根长、鲜重、分蘖数均具有促进作用，结果见表2。处理组株高分别增加11.5%、12.6%、13.6%、18.9%、2.6%；根长分别增加12.0%、10.7%、14.0%、16.6%、10.5%；鲜重分别增加21.1%、40.3%、57.1%、63.1%、20.4%；分蘖数分别增加了5.3%、9.6%、21.7%、26.5%、2.6%。当生物炭的施加量为1 200 kg/hm^{2}时，对线虫的抑制率为65.13%，株高、根长、鲜重分别为22.47 cm、8.07 cm、6.80 g，分蘖数为7.93个。而当生物炭的施加量为1 600 kg/hm^{2}时，株高、根长、鲜重、分蘖数具有不同程度降低。

试验表明，适量施加生物炭，可以改善小麦株高、根长等农艺性状，提高小麦抗逆性；但超过一定用量，会降低对线虫的抑制作用，影响小麦相关农艺性状。

表 2　不同生物炭施加量对小麦分蘖期农艺性状的影响

处理/(kg/hm^2)	株高/cm	根长/cm	鲜重/g	分蘖数/个
200	(21.08±2.79)b	(7.75±0.71)ab	(5.05±0.31)c	(6.60±0.49)ab
400	(21.28±1.23)ab	(7.66±0.23)ab	(5.85±0.49)b	(6.87±0.20)ab
800	(21.47±2.53)a	(7.89±0.19)ab	(6.55±0.99)a	(7.63±0.28)ab
1 200	(22.47±3.22)a	(8.07±0.20)a	(6.80±0.36)a	(7.93±0.23)a
1 600	(19.40±1.42)c	(7.65±0.51)ab	(5.02±0.63)c	(6.43±0.75)ab
CK	(18.90±4.13)c	(6.92±0.13)b	(4.17±0.10)d	(6.27±0.27)b

返青期调查相关性状发现，与对照相比，施加不同量的生物炭对小麦株高、根长、根重和叶表面积均有一定影响（表3）。生物炭施加量为200、800、1 200、1 600 kg/hm^{2}时，小麦株高分别增加13.9%、8.8%、5.7%、12.1%；叶表面积分别增加14.0%、8.8%、3.1%、12.2%。施加量为400、1 200、1 600 kg/hm^{2}时，小麦根长分别增加6.6%、8.7%、5.4%。施加量为400、800、1 200、1 600 kg/hm^{2}时，鲜重分别增加14.5%、18.2%、38.2%、16.4%。

成熟期调查相关性状发现，与对照相比，施加不同量生物炭处理的小麦株高、根长、穗长、旗叶长、鲜重和千粒重均有不同程度增加（表4）。处理组小麦株高分别增加1.3%、2.6%、4.2%、6.0%、6.5%，根长分别增加6.2%、8.8%、6.4%、41.9%、4.8%，穗长分别增加0.1%、1.3%、3.2%、10.5%、6.1%，旗叶长分别增加2.0%、2.9%、3.3%、8.1%、9.9%，鲜重分别增加18.6%、

13.0%、30.4%、37.2%、39.6%，千粒重分别增加0.7%、4.5%、9.3%、8.1%、7.4%。生物炭施加量为1 200 kg/hm²处理的小麦产量为887.49 g/m²，增产率最高（44.65%）。结果表明，生物炭的施加可以作为营养物质被小麦根系利用，从而促进麦穗、旗叶的生长发育，促进营养物质在小麦穗部积累，提高小麦产量。

表 3　不同生物炭施加量对小麦返青期农艺性状的影响

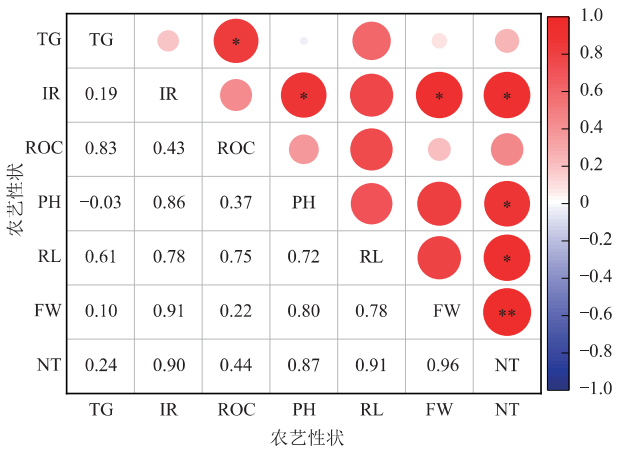
处理/(kg/hm²)	株高/cm	根长/cm	鲜重/g	根重/g	叶表面积 /cm²
200	(19.74 ± 1.11)a	(5.77 ± 0.03)c	(0.52 ± 0.03)a	(0.07 ± 0.003)c	(5.53 ± 0.31)a
400	(17.14 ± 0.25)a	(6.47 ± 0.06)a	(0.63 ± 0.07)a	(0.07 ± 0.003)c	(4.80 ± 0.07)a
800	(18.85 ± 1.37)a	(5.73 ± 0.03)c	(0.65 ± 0.09)a	(0.09 ± 0.003)a	(5.28 ± 0.38)a
1 200	(18.31 ± 0.37)a	(6.60 ± 0.10)a	(0.76 ± 0.01)a	(0.08 ± 0.002)b	(5.00 ± 0.10)a
1 600	(19.43 ± 0.85)a	(6.40 ± 0.06)a	(0.64 ± 0.06)a	(0.09 ± 0.003)a	(5.44 ± 0.24)a
CK	(17.33 ± 0.15)a	(6.07 ± 0.03)b	(0.55 ± 0.01)a	(0.06 ± 0.001)d	(4.85 ± 0.04)a

表 4　不同生物炭施加量对小麦成熟期农艺性状的影响

处理/(kg/hm²)	株高/cm	根长/cm	穗长/cm	旗叶长/cm	鲜重/g	千粒重/g
200	(69.42 ± 4.27)b	(7.15 ± 0.10)b	(10.00 ± 0.57)b	(12.07 ± 0.45)b	(6.76 ± 1.09)c	(42.2 ± 0.12)b
400	(70.31 ± 3.22)b	(7.32 ± 0.23)b	(10.12 ± 0.67)b	(12.17 ± 0.50)b	(6.44 ± 2.46)c	(43.8 ± 0.12)ab
800	(71.45 ± 2.72)ab	(7.16 ± 0.14)b	(10.31 ± 0.25)ab	(12.22 ± 0.30)b	(7.43 ± 0.36)ab	(45.8 ± 0.16)ab
1 200	(72.63 ± 1.67)a	(9.55 ± 0.03)a	(11.04 ± 0.57)a	(12.79 ± 0.94)a	(7.82 ± 0.14)a	(45.3 ± 0.09)ab
1 600	(73.01 ± 3.74)a	(7.05 ± 0.57)b	(10.60 ± 0.24)b	(13.00 ± 0.06)a	(7.96 ± 0.16)a	(45.0 ± 0.01)ab
CK	(68.54 ± 3.15)bc	(6.73 ± 0.02)b	(9.99 ± 0.13)b	(11.83 ± 0.20)bc	(5.70 ± 0.46)d	(41.9 ± 0.08)b

2.3　小麦不同发育时期、不同指标间相关性分析

分蘖期不同指标间Pearson相关性分析结果如图1所示。生物炭施加量（TG）与线虫抑制率（IR）、ROC以及小麦生长指标呈现正相关趋势，TG与ROC、株高（PH）、鲜重（FW）、分蘖数（NT）呈现正相关趋势，且IR与PH、FW、NT呈显著正相关。表明施加生物炭，可在一定程度上降低土壤中线虫种群密度，同时促进小麦部分农艺性状的生长发育。



注：*表示在0.05水平上显著相关，**表示在0.01水平上显著相关；下同。

图 1　小麦分蘖期不同农艺性状指标间 Pearson 相关性分析

返青期不同指标间Pearson相关性分析结果如图2所示。TG与IR、PH、根长（RL）、FW、叶表面积（LSA）、根重（RDW）具有正相关趋势；但IR与RDW具有负相关趋势。表明施加生物炭一段时间后，对线虫抑制率逐渐升高。生物炭施加量为1 200 kg/hm²处理对土壤中线虫抑制率最高，为65.13%，土壤中线虫数量降低。

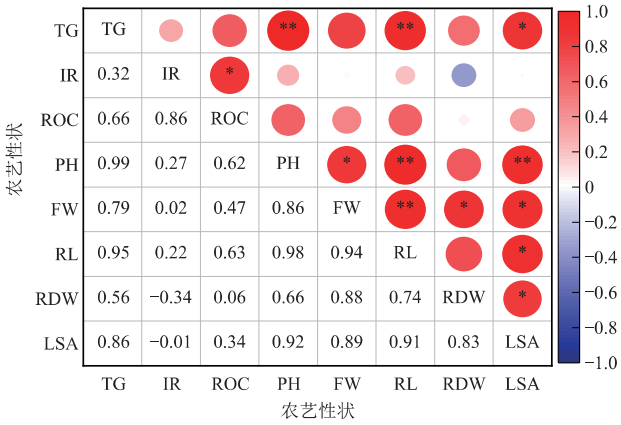


图 2　小麦返青期不同农艺性状指标间 Pearson 相关性分析

成熟期不同指标间Pearson相关性分析结果如图3所示。TG与生长指标呈现正相关趋势，与线虫ROC呈负相关。TG与IR、PH、RL、FW、穗长（SL）、旗叶长（FLL）、籽粒数（GN）和千粒重（TSW）呈现正相

关趋势，且与PH、FLL极显著正相关。表明施加生物炭可抑制土壤中线虫数量，促进小麦相关农艺性状的生长发育。

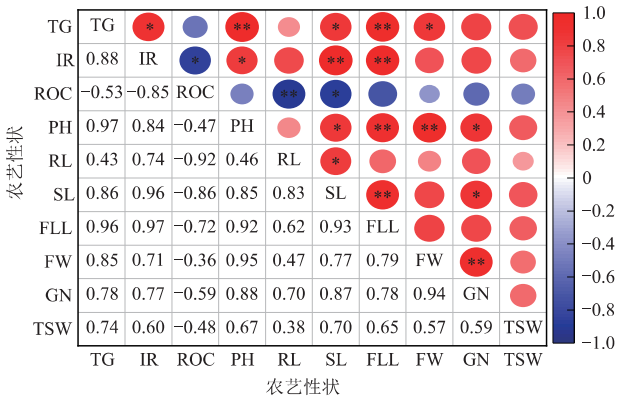


图 3　小麦成熟期不同农艺性状指标间 Pearson 相关性分析

2.4　小麦相关农艺性状与生物炭施加量的关系

为分析小麦相关农艺性状随生物炭施加量的变化规律，将小麦株高、理论产量、鲜重、旗叶长、籽粒数、千粒重随不同生物炭施加量的变化及其回归方程作图（见图4）。

株高、鲜重、旗叶长基本随生物炭施加量的增加而平缓增加。结合不同生长期的变化规律可知，生物炭施加量为1 200 kg/hm²时，株高、鲜重、旗叶长趋于最大值，而理论产量、穗粒数均最高；生物炭施用量再增加时，小麦产量随之下降。此结果表明，生物炭施用量最佳为1 200 kg/hm²，施用量过高，则可能降低小麦实际产量，影响经济效益。

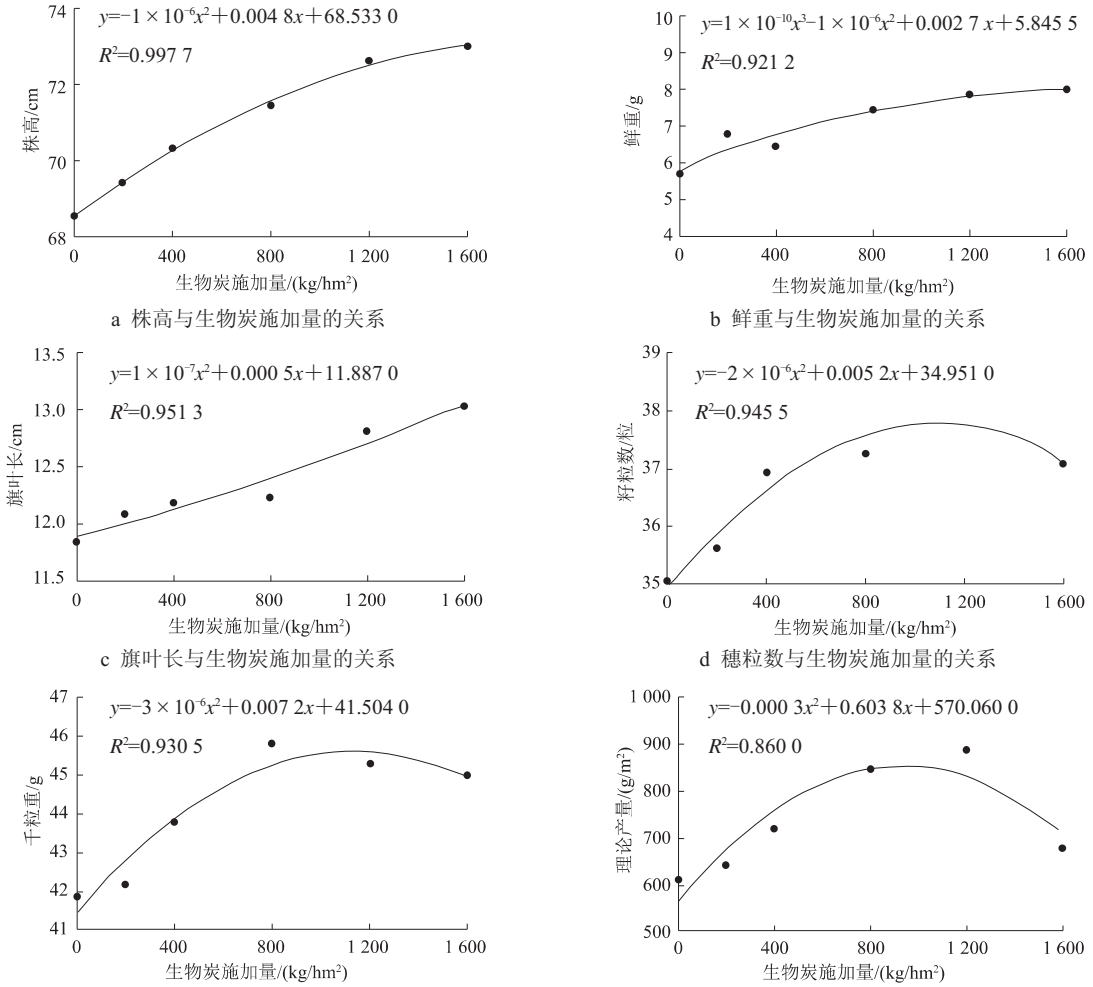


图 4　小麦农艺性状随不同生物炭施加量的变化规律

3　讨论

线虫病害作为一种土传病害，通过土壤传播且不易在田间发现。虽然小麦与非寄主作物轮作能有效减少土壤中的线虫数量，但线虫的虫卵可在土壤中存活多年。即使在非寄主作物种植数次后，土壤

中线虫种群密度仍处于较高水平，从而对作物产量产生影响。现阶段，化学防治是防控植物寄生线虫的主要手段之一，目前效果较好的化学杀线虫剂包括有机磷类和氨基甲酸盐类杀虫产品，常用的有噻唑膦、苯线磷、灭线磷和杀线威[11]。施用噻唑膦可使大豆根部孢囊的数量减少43.64%～97.94%，显著提高大豆孢囊线虫J2的死亡率，降低卵的孵化率和繁殖率[12]。崔江宽等[13-14]采用不同种衣剂联合使用考察对小麦孢囊线虫的防治效果，研究发现，甘农Ⅲ号种衣剂＋灭菌唑、阿维菌素＋吡虫啉或亚甲基硫氰酸盐＋噻虫嗪包衣小麦种子，不仅处理小区的单孢囊卵量显著降低，同时小麦产量也提高了9%～27%。化学药剂防治虽然效果明显，但易产生药物残留，威胁人畜健康。

近几年，生物炭作为一种新兴的集肥料、吸附剂、改良剂于一体的新型材料，富含多种有机化合物，在土传病害的防控上应用逐渐增加，具有广阔的发展前景。研究发现，在土壤中加入生物炭可以提高土壤中碳素和腐殖质含量，改善土壤肥力，增加有益微生物繁殖，提高植物对矿物质元素的吸收，减少病害发生[15-17]。生物炭含有丰富的外源有机质，可以通过对土壤内源物质的调整从而实现对土壤线虫群落的调控。陈威等[18]探究了施加生物炭对番茄线虫病与土壤线虫群落变化影响。结果表明，有机炭的施加有效促进了番茄根系生长，增强了食微线虫与植食线虫的拮抗作用，造成土壤线虫结构的改变，致使植物寄生线虫数量下降，进而降低了植食线虫对作物的危害。陈义轩[19]研究表明，大量添加生物炭可显著抑制真菌生长，抑制线虫的生长和繁殖。生物炭的加入导致土壤食物网结构更趋向真菌主导的能量通道，抑制了植食线虫主导的植物能量通道，从而导致食真菌线虫比例增加，植物寄生线虫比例下降。赵娅红等[20]开展不同量生物炭对烟草线虫病株根际土壤影响的田间试验。结果表明，生物炭能够显著降低烟草线虫病的病情指数，防治效果为23.98%。本试验对小麦不同生长期的菲利普孢囊线虫数量进行调查发现，随着生物炭的施加量增加，土壤中线虫、孢囊数量减少。在小麦分蘖期、返青期，生物炭施加量1 200 kg/hm^{2}对线虫抑制率分别为65.13%、28.68%，虫口减退率分别为23.44%、39.88%；收获期，其对孢囊的抑制率为34.81%，孢囊减退率为32.92%。说明小麦播种前施加有机炭可有效防控菲利普孢囊线虫，抑制线虫数量的增长，使线虫基数降低。河南省小麦孢囊线虫在冬前出苗2周和次年3月出现2次侵染高峰，6至7月孢囊线虫会以孢囊形态存在于土壤中[13]。生物炭的施加可使土壤中线虫种群密度降低，使线虫基数降低。此外，刘欢欢等[21]在麦田土壤中增施生态炭，发现生态炭能有效降低小麦根腐病的发病率和病情指数，相对防效可达77.00%。

土壤理化性质、保水保肥能力直接影响作物根系发育以及对养分的吸收利用。生物炭本身就含有植物生长所需的多种营养元素，土壤中合理施加生物炭除了可以补充养分外，还可以吸附养分，缓慢持续地释放养分[22]。姚奇等[17]对冬小麦土壤养分和作物产量的研究发现，施用少量生物炭可以提高冬小麦籽粒产量17.02%，并且可以使土壤养分均衡供应，小麦产量增加且稳定性良好，农田生态系统质量优。张晨欣等[23]研究表明，施加生物炭可以有效提高土壤中养分含量，能够有效缓解冬小麦干旱胁迫，显著促进小麦总根长、总表面积、平均根系直径和总根体积增加，从而有利于小麦分蘖成穗和成穗结实率的提高。侯钰晨等[24]研究表明，利用生物炭可在不同程度上促进藜麦地上部和根系生长。姜慧敏等[25]经过3年试验研究发现，添加适宜比例生物炭，可以实现东北春玉米持续稳定高产。王志丹等[26-27]研究发现，施用生物炭增加了玉米穗长、穗行数、穗质量和穗粒质量，从而提高了玉米产量。钟宏科等[28]研究发现，生物炭促进了白菜生长，白菜增产27.56%。本试验相关性分析表明，小麦株高、根长、鲜重、籽粒数、分蘖数等农艺性状与生物炭施加量密切相关，呈正相关趋势。与空白对照相比，当生物炭施加量为1 200 kg/hm^{2}时，小麦各生长期的相关农艺性状均最好。虽然生物炭施加量为1 600 kg/hm^{2}时，存在促进小麦农艺性状生长的作用，但与施加量1 200 kg/hm^{2}相比出现小幅度下降。研究结果与张凯迪等[29]对糯玉米各生育时期株高，茎粗，叶面积，地上、地下生物量及产量的研究结果一致。推测随着生物炭施加量不断增加，土壤中碳元素含量增加导致C/N失衡，从而影响作物对有益元素的吸收而导致作用降低。同时，土壤中碳氮比（＞30）达到某个较高的临界点时，农作物氮肥利用率降低，总硝化过低，从而导致农作物积累量下降，产量降低。

参考文献

[1] 徐年龙, 周娜娜, 徐梦彬, 等. 江苏射阳地区红皮小麦品种不同播期筛选试验[J]. 大麦与谷类科学, 2021, 38(1): 17-21.

[2] THURAU T, YE W Z, MENKHAUS J, et al. Plant nematode

control[J]. Sugar Tech, 2010, 12(3): 229-237.
[3] RIVOAL R, NICOL J M. Past research on the cyst nematode complex and future needs[C]// RILEY I T, NICOL J M, DABABAT A A. Cereal cyst nematodes: status, research and outlook. Ankara, Turkey: CIMMYT, 2009: 3-10.
[4] SMILEY R W. Root-lesion nematodes reduce yield of intolerant wheat and barley[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(6):1322-1335.
[5] 韩坤. 植物源抗病代谢物用于小麦病害防治的实践应用[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2023.
[6] 吕岩, 陈昆圆, 卢俊锋, 等. 河南许昌小麦孢囊线虫冬前侵染为害调查[J]. 中国植保导刊, 2022, 42(12): 38-42; 54.
[7] 陈奇, 王彦斌, 庞少峰, 等. 生物质碳基催化材料的研究进展[J]. 功能材料, 2024, 55(2): 2052-2062.
[8] 何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 等. 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 161-171.
[9] BISTA P, GHIMIRE R, MACHADO S, et al. Biochar effects on soil properties and wheat biomass vary with fertility management [J]. Agronomy, 2019, 9(10): 623-633.
[10] 常芳娟, 张贵云, 张丽萍, 等. 生物炭对西瓜连作土壤真菌群落结构和功能类群的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3553-3561.
[11] RICH J R, DUNN R A, NOLING J W. Nematicides: past and present uses[J]. Nematology: Advances and Perspectives, 2004, 2: 1179-1200.
[12] WU H Y, LUO M, ZHANG L Y, et al. Nematicidal activity of fosthiazate against soybean cyst nematode *Heterodera glycines*[J]. Journal of Nematology, 2019, 51: 1-9.
[13] 崔江宽, 黄文坤, 彭焕, 等. 二硫氰基甲烷与灭菌唑和吡虫啉的联合使用对小麦孢囊线虫的防治[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36 (3): 44-50.
[14] CUI J K, JIAO Y Q, ZHOU B, et al. Pathotype, resistance classification and seed-coating control of *Heterodera avenae* and *H. filipjevi* in the North China Plain[J]. Plant Disease, 2020, 104 (12): 3230-3238.
[15] ELMER W H, PIGNATELLO J J. Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and *Fusarium* crown and root rot of asparagus in replant soils[J]. Plant Disease, 2011, 95(8): 960-966.
[16] 陈娜, 李晓鹏, 刘进法, 等. 不同种类有机炭肥对上海青产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(3): 151-153.
[17] 姚奇, 俞若涵, 张洪宇, 等. 生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 68-74.
[18] 陈威, 胡学玉, 张阳阳, 等. 番茄根区土壤线虫群落变化对生物炭输入的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 998-1003.
[19] 陈义轩. 土壤菌群、秀丽线虫、番茄立枯病对生物炭输入的响应特征[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
[20] 赵娅红, 胡赛予, 夏融, 等. 生物炭肥对易感根结线虫病烤烟根际菌群和理化性质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(4): 206-214.
[21] 刘欢欢, 董宁禹, 柴升, 等. 生态炭肥防控小麦根腐病效果及对土壤健康修复机理分析[J]. 植物保护学报, 2015, 42(4): 504-509.
[22] SCHNITZER M I, MONREAL C M, JANDL G. The conversion of chicken manure to bio-oil by fast pyrolysis. III. analyses of chicken manure, bio-oils and char by Py-FIMS and Py-FDMS[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2008, 43(1): 81-95.
[23] 张晨欣, 孟祥占, 刘芳妮, 等. 干旱胁迫下生物炭对冬小麦生理特性和土壤化学性质的影响[J]. 生态科学, 2023, 42(6): 240-246.
[24] 侯钰晨, 庞春花, 张永清, 等. 施用生物炭与氮肥对盐碱胁迫下藜麦幼苗生理生长特性的影响[J]. 作物杂志, 2024(4): 240-246.
[25] 姜慧敏, 郭俊姆, 刘晓, 等. 不同来源氮素配合施用提高东北春玉米氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 933-941.
[26] 王志丹, 代晓华, 刘吉利, 等. 生物炭对宁夏干旱地区玉米生长及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(1): 74-82.
[27] 崔月峰, 曾雅琴, 陈温福. 颗粒炭及新型缓释肥对玉米的应用效应研究[J]. 辽宁农业科学, 2008(3): 5-8.
[28] 钟宏科, 沈丽英, 施刘砚. 生物有机炭肥在大白菜上的施用效果[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(1): 47-48.
[29] 张凯迪, 李宇欣, 蒋志慧, 等. 生物炭施用量对鲜食糯玉米生长、产量的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(17): 5870-5877.

（编辑：顾林玲）

（上接第 56 页）

[2] 匡墨南. 2,4-二甲基苯胺和2,6-二甲基苯胺废水的处理[J]. 化工环保, 1991, 11(4): 239-242.
[3] 姜瑞霞, 谢在库, 张成芳, 等. 2,6-二甲基苯胺的合成研究进展[J]. 精细石油化工, 2001(4): 60-64.
[4] 轩涛. HPLC法测定甲磺酸罗哌卡因中2,6-二甲基苯胺的含量[J]. 福建分析测试, 2013, 22(5): 36-38.
[5] 王伟, 洪华, 孙长恩. 气相色谱法在测定精甲霜灵中杂质二甲基苯胺的应用研究[J]. 江苏科技信息, 2021, 38(25): 44-46.
[6] 黄胜广, 王玉方, 赵卉, 等. QuEChERS/UPLC-MS/MS法测定梅花鹿鹿茸中噻拉嗪及其代谢物[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 274-278.
[7] 张铎文, 任苏瑜, 翟明燕, 等. QuEChERS/液相色谱-串联质谱测定猪肉中赛拉嗪及其代谢物2,6-二甲基苯胺[J]. 分析测试学报, 2021, 40(9): 1386-1390.
[8] 高雪, 盖薇, 顾朝康. 超高效液相色谱-四级杆飞行时间质谱法测定血液与尿液中赛拉嗪及其代谢物2,6-二甲基苯胺[J]. 分析测试学报, 2015, 34(6): 646-651.
[9] 刘文文, 李婧, 许江萍, 等. SPE-HPLC/MS/MS检验体液中赛拉嗪及DMA[J]. 中国法医学杂志, 2017, 32(2): 182-185.
[10] 翁文婷, 邢莹祯, 徐玉. 离子液体修饰膨胀石墨电极测定利多卡因注射剂中的2,6-二甲基苯胺[J]. 化学传感器, 2015, 35(4): 55-59.
[11] 张楠, 潘忠诚, 杨宏勃, 等. 检测中生菌素的高效液相色谱法[J]. 农业与技术, 2021, 41(21): 18-21.

（编辑：顾林玲）