

# 施用腐植酸对小麦生长和塬土理化性质的影响

翟文晰<sup>1</sup>, 刘增照<sup>1</sup>, 郝明德<sup>2,3</sup>, 牛育华<sup>4</sup>

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.陕西科技大学 陕西农产品加工技术研究院, 西安 710021)

**摘 要:**为解决陕西塬土地区自然侵蚀严重、土壤肥力有限、水分短缺等问题。以“开麦 18”为研究对象,设置 5 个腐植酸固体肥不同施用水平,对不同施肥水平对土壤物、化性状和小麦生长指标的影响进行研究。结果表明:1 200 kg/hm<sup>2</sup>, 1 600 kg/hm<sup>2</sup> 水平下,腐植酸固体肥可以显著提高土壤中有机质的含量,800 kg/hm<sup>2</sup>, 1 200 kg/hm<sup>2</sup>, 1 600 kg/hm<sup>2</sup> 对土壤速效磷、速效钾均有显著提高,对土壤 pH 有着显著的降低效果。施用腐植酸肥料对小麦生长指标均有显著提高,通过对腐植酸施用浓度与生长指标的回归方程求解,得出在 667~1 122 kg/hm<sup>2</sup> 施肥区间使用腐植酸肥料可获得最佳产量。

**关键词:**腐植酸; 小麦; 生长指标; 塬土

中图分类号:S156.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0025-05

## Effects of Humic Acid Application on Wheat Growth and Physical and Chemical Properties of Lou Soil

ZHAI Wenxi<sup>1</sup>, LIU Zengzhao<sup>1</sup>, HAO Mingde<sup>2,3</sup>, NIU Yuhua<sup>4</sup>

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi, 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi, 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Shaanxi Institute of Agricultural Technology Extension Station, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of severe natural erosion, limited soil fertility and water shortage in the Lou soil area of Shaanxi Province, we took ‘Kaimai 18’ as the research object, set five different application levels of humic acid solid fertilizer to study the effects of different application levels on soil physical and chemical properties and wheat growth index. The results show that, at the levels of 1 200 kg/hm<sup>2</sup> and 1 600 kg/hm<sup>2</sup>, the humic acid solid fertilizer can significantly increase the content of soil organic matter. Treatments of 800 kg/hm<sup>2</sup>, 1 200 kg/hm<sup>2</sup>, and 1 600 kg/hm<sup>2</sup> significantly increase soil available phosphorus and available potassium, and have the significant effect on reducing the soil pH; the application of humic acid fertilizers significantly improves the wheat growth index. It is concluded that the best yield can be obtained by using humic acid fertilizer in the range of 667 kg/hm<sup>2</sup>~1 122 kg/hm<sup>2</sup> by solving the regression equation of the concentration of humic acid and the growth index.

**Keywords:** humic acid; wheat; growth index; Lou soil

腐植酸是动植物残体和微生物细胞经过微生物的分解和转化,在一系列地球化学过程形成和累积的一类大分子天然有机混合物<sup>[1]</sup>。大量研究证实,腐植酸有促进植物生长、提高作物产量的作用<sup>[2-3]</sup>。在水

稻中施用腐植酸可显著提高株高、分蘖数、千粒重、籽粒产量等指标<sup>[4-5]</sup>;在小麦中施用腐植酸可以促进根系的发育和生物量的增加<sup>[6-7]</sup>。同时腐植酸对土壤物理性质也有显著的改良效果,如在土壤中加入腐植酸

收稿日期:2020-07-18

修回日期:2020-07-27

资助项目:西安市农业科技创新工程项目“多功能腐殖酸速溶多元微肥在智慧农业中关键技术应用研究”(201806116YF04NC12(6));西安市未央农业科技创新计划项目“超临界撞击制备多功能腐殖酸微胶囊关键技术机器产业化培育示范研究”(201829)

第一作者:翟文晰(1995—),男,山东省菏泽人,硕士研究生在读,研究方向:土壤改良及养分评价。E-mail:wenxizhai@nwafu.edu.cn

通信作者:郝明德(1957—),男,陕西省华县人,博士生导师,研究员,主要从事长期轮作施肥系统土壤肥力研究。E-mail:mdhao@ms.iswc.ac.cn

可以提高土壤总有机碳、饱和导水率、团聚体稳定性等土壤物理性质<sup>[8-9]</sup>。此外,施用腐植酸还能增加土壤团聚体含量、土壤紧实度和土壤持水能力等性质<sup>[10]</sup>。腐植酸可以改善土壤理化性状,促进作物的生长发育<sup>[11-12]</sup>,归因于腐植酸含有的大量酸性功能基团和较高的阳离子交换量,可以提高土壤蓄养养分的能力<sup>[13-14]</sup>,腐植酸内部复杂的微孔结构,可以调节土壤结构改善养分释放。**塋**土具有肥力高、易耕作的优点,是关中地区的主要耕作土壤。陕北地区农业生产中存在着土壤自然侵蚀严重、土壤肥力有限、水分短缺等问题。加之长期高强度的耕作,产生土壤板结、盐碱化、肥力下降等一系列土壤质量问题,使得作物的产量和品质下降<sup>[15]</sup>。合理的改良措施是解决当前问题的途径,开展针对当地作物及土壤施用腐植酸的研究尤为重要。介于针对当地土壤和作物相关的腐植酸研究工作较少,试验以“开麦 18”为研究对象,设置 5 个腐植酸固体肥施用水平,研究不同施肥水平下腐植酸对土壤物、化性状和小麦生长的影响,拟为腐植酸肥料在**塋**土上的应用提供科学依据。

## 1 材料方法

### 1.1 供试材料

试验于 2017 年 9 月—2018 年 6 月在陕西省富平县施家村进行。试验地区属于暖温带半湿润季风气候。年均气温 12.0℃,无霜期 184 d。耕作制度为一年两熟玉米—小麦轮作。年均降水量 600 mm,主要集中在 7—9 月,常有冬旱和春旱发生。土壤类型为**塋**土,容重 1.35 g/m<sup>3</sup>,总孔隙度 49.6%,有机质含量 10.40 g/kg,全氮含量 1.09 g/kg,全磷含量 0.71 g/kg,碱解氮含量 80 mg/kg,速效磷 25 mg/kg,速效钾含量 17 mg/kg,pH 为 8.6。供试小麦品种为“开麦 18”。供试肥料为腐植酸固体肥,由陕西科技大学腐植酸生态工程中心提供,游离腐植酸含量 8.1%,N 8.1%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 8.1%,K<sub>2</sub>O 6.5%。

### 1.2 试验设计和方法

试验采用随机区组设计,设置 5 个腐植酸肥施用水平。处理 1(对照);处理 2(腐植酸肥 400 kg/hm<sup>2</sup>);处理 3(腐植酸肥 800 kg/hm<sup>2</sup>);处理 4(腐植酸肥 1 200 kg/hm<sup>2</sup>);处理 5(腐植酸肥 1 600 kg/hm<sup>2</sup>)。小区面积 10 m×5 m,每个处理重复 3 次,共 15 个小区。冬小麦于 2017 年 9 月 27 日,机械播种,播深 3~5 cm,播种量为 150 kg/hm<sup>2</sup>,行距 20 cm,于 2018 年 6 月 23 日收获。腐植酸肥在播种前施入耕层土壤,播种时一次性施入纯 N 180 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg/hm<sup>2</sup>,按当地习惯实行管理措施。

### 1.3 土壤、小麦指标测定方法

在冬小麦成熟时期,分小区收获、脱粒、风干测产。冬小麦收获期,每个小区中随机选取 10 株,测定株高与穗长。冬小麦收获后,用 S 形线路采集 0—20 cm 土壤,环刀法(V=100 cm<sup>3</sup>)测定土壤含水量和容重。有机质使用重铬酸钾容量法—外加热法,土壤全氮使用凯氏定氮法测定,速效磷使用硫酸—钼锑抗比色法测定,速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提—原子吸收法测定。

### 1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行数据分析,方差分析使用单因素方差分析法进行,运用事后多重比较进行显著性检验,Origin 2020 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 腐植酸对小麦生长指标的影响

由表 1 可知,与对照相比,400,800,1 200,1 600 kg/hm<sup>2</sup> 腐植酸肥处理的产量分别增加了 174.76,620.86,305.32,244.20,800 kg/hm<sup>2</sup> 施肥水平时产量最高,为 4 851.9 kg/hm<sup>2</sup>,相对于对照增产率达 14.7%,400,1 200,1 600 kg/hm<sup>2</sup> 施肥处理较对照产量分别增加了 7.2%,4.1%,5.8%。使用腐植酸肥料在各个浓度均能提高小麦的产量,且达到显著性差异。单位面积穗数、穗粒数和千粒重是冬小麦产量的构成要素。与对照相比,400,800,1 600 kg/hm<sup>2</sup> 施肥处理的冬小麦穗数分别增加了 2.26,7.27,21.91 个/m<sup>2</sup>,其中 800,1 600 kg/hm<sup>2</sup> 施肥处理达到显著性差异。与对照相比,施用腐植酸肥处理穗粒数均有增加,但仅有 800 kg/hm<sup>2</sup> 处理达到差异显著。400,800,1 600 kg/hm<sup>2</sup> 施肥水平小麦千粒重均有所增加,并在 800 kg/hm<sup>2</sup> 水平小麦千粒重最大,为 41.85 g,相较于对照增加了 1.56 g。值得注意的是,与对照相比,1 600 kg/hm<sup>2</sup> 施肥处理千粒重降低了 0.97 g。

表 1 中与对照相比,施用腐植酸肥后小麦穗长均表现为增加趋势,增幅在 0.21~0.93 cm,800 kg/hm<sup>2</sup> 处理穗长和增幅最大,与其他处理相比差异显著;与对照相比,施用腐植酸肥株高分别提高了 8.6%,14.4%,14.9%,12.7%,处理间达显著性差异。小麦株高在 800 kg/hm<sup>2</sup>,1 200 kg/hm<sup>2</sup> 浓度水平达到最大,分别为 66.84 cm 和 67.12 cm,与其他处理相比差异显著。施用较低浓度腐植酸肥料对小麦各项生长指标有增加作用,施用较高浓度腐植酸肥料后对小麦生长表现为抑制作用。基于高斯模型(Gauss Amp)分析腐植酸浓度对小麦生长指标的影响,得到相应的回归方程(表 2)。由表 2 可知,穗数和产量与腐植酸

的二元多项式回归校正决定系数较小,方程拟合效果较差,穗粒数、千粒重、穗长、株高和腐植酸浓度回归校正决定系数较大,拟合效果较好( $R^2\geqslant0.7$ )。各拟合曲线开始均随着腐植酸肥料施用浓度的增加表现为增加趋势,其后随着施用高浓度腐植酸肥料曲线随即降低。根据各回归方程计算出各指标对应的腐植酸肥料最佳用量,根据各极值确定土壤中小麦施用腐植酸肥料667~1 122 kg/hm<sup>2</sup>为宜。

表 1 不同处理的小麦生长指标

腐植酸用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0	400	800	1200	1600
穗数/(穗·m <sup>-2</sup> )	329.4±8.1c	331.7±7.9bc	336.7±11.7b	325.6±10.3d	351.3±14.7a
穗粒数/(粒·m <sup>-2</sup> )	32.2±0.1b	33.3±0.6ab	34.4±0.8a	32.9±0.5b	32.4±0.2b
千粒重/g	40.2±0.1b	41.0±0.2a	41.9±0.5a	40.6±0.1b	39.3±0.1c
产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	4231.1±113.8c	4536.4±213.0b	4851.9±151.5a	4405.8±108.5b	4475.3±137.3b
穗长/cm	6.1±0.3b	6.6±0.2b	7.1±0.2a	6.9±0.1ab	6.3±0.3b
株高/cm	58.4±0.9c	63.4±1.2b	66.8±1.1a	67.1±1.0a	65.8±1.4b
增产率/%	—	7.2	14.7	4.1	5.8

注:表中不同小写字母表示在  $p<0.05$  时,各指标显著性差异,下同。

表 2 小麦各生长指标与腐植酸浓度回归方程模型

生长指标	回归方程	校正决定系数 $R^2$	最佳用量 $x$	结果 $y$
穗数/(穗·m <sup>-2</sup> )	$y=327.396+0.00943x$	0.140	—	—
穗粒数/(粒·m <sup>-2</sup> )	$y=32.268+2.198\exp[-(x-746.167)^2]/163029.63$	0.977	743.143	34.5
千粒重/g	$y=38.051+3.607\exp[-(x-686.784)^2/838183.60]$	0.764	677.477	41.6
产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	$y=4252.33+\sum B_i\times x^i$ $B_1=0.970$ $B_2=0.001$	0.587	887.287	4679.9
穗长/cm	$y=5.047+1.154\exp[-(x-913.66)]^2/447352.05]$	0.998	904.905	7.1
株高/cm	$y=41.96+109.338\exp[-(x-1128.304)]^2/14846410.79]$	0.990	1122.723	67.3

2.2 腐植酸肥料对土壤化学性质的影响

施用腐植酸肥土壤有机质与对照相比均表现为增加趋势,增幅为 0.50~2.05 g/kg,其中 1 200,1 600 kg/hm<sup>2</sup>处理分别提高了 1.72 g/kg,2.05 g/kg,与对照相比达到显著性水平。施用腐植酸肥力土壤全氮整体表现出增加趋势。随着腐植酸肥料浓度的增加,土壤全氮含量先表现为增加,后表现为降低趋势。施用腐植酸肥能增加土壤速效磷含量,1 200 kg/hm<sup>2</sup>处理速效磷较对照增加 4.22 mg/kg;800 kg/hm<sup>2</sup>,1 600 kg/hm<sup>2</sup>处理速效磷含量与对照相比提高了 18.2%和 15.2%;除 1 600 kg/hm<sup>2</sup>处理,土壤速效磷随着施用腐植酸肥料浓度的增加而增加。800,1 200,1 600 kg/hm<sup>2</sup>处理速效钾含量与对照相比差异显著,各处理间差异显著。800,1 200,1 600 kg/hm<sup>2</sup>处理速效钾含量与对照相比分别增加了 4.55 mg/kg,8.51 mg/kg,12.55 mg/kg。各处理土壤 pH 随着腐植酸施用浓度的增加,表现为降低的趋势,与对照相比,施用腐植酸肥均降低了土壤 pH,降幅为 0.13~0.19,且达到显著水平(表 3)。

表 3 腐植酸施用量对土壤化学性质的影响

腐植酸施用量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH
0	1.28±0.12a	21.44±1.48b	114.70±0.73d	10.78±0.08b	8.30±0.033a
400	1.31±0.09a	23.57±0.70ab	115.77±0.54cd	11.28±0.13b	8.17±0.015b
800	1.36±0.41a	25.34±1.03a	117.21±0.10c	11.33±0.10b	8.14±0.026b
1200	1.28±0.18a	25.66±0.55a	123.21±0.29b	12.50±0.40a	8.12±0.044b
1600	1.17±0.37a	24.70±0.50a	127.25±0.65a	12.83±0.37a	8.11±0.041b

2.3 腐植酸对土壤物理特性的影响

施用腐植酸肥料能降低土壤容重,提高土壤总孔隙度和田间持水量(图 1—2)。施用腐植酸肥的处理土壤总孔隙度增幅为 2.78~6.28%,1 600 kg/hm<sup>2</sup>施肥处理的总孔隙度最高,为 59.07%,与其他处理相比差异显著,随着腐植酸肥料施用浓度的增加,土壤总孔隙度随之增加。与对照相比,施用腐植酸肥土壤田间持水量显著增加,1 600 kg/hm<sup>2</sup>施肥处理的土壤田间持水量最高,达 28.03%,较对照增加 5.65%。同样的,随着腐植酸肥料施用浓度的增加,田间持水量随



之增加。与对照相比,腐植酸肥处理的土壤容重均有所降低,降幅为  $0.08 \sim 0.17 \text{ g/cm}^3$ ,  $1\ 600 \text{ kg/hm}^2$  施肥处理的土壤容重最低,为  $1.18 \text{ g/cm}^3$ ,较对照降低了  $0.17 \text{ g/cm}^3$ 。土壤孔隙度、田间持水量和容重3个土壤物理指标,均表现为随着腐植酸肥料施用量的增加,呈现出单纯的增减趋势。

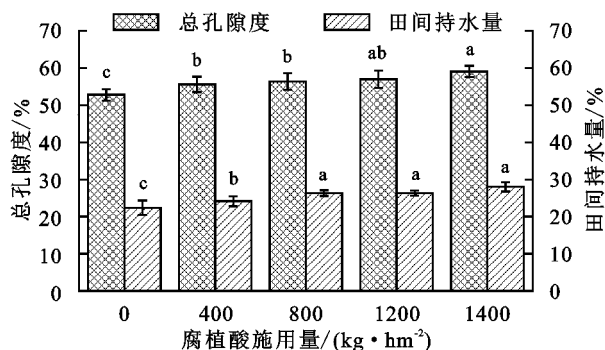


图1 腐植酸施用量对土壤孔隙度、田间持水量的影响

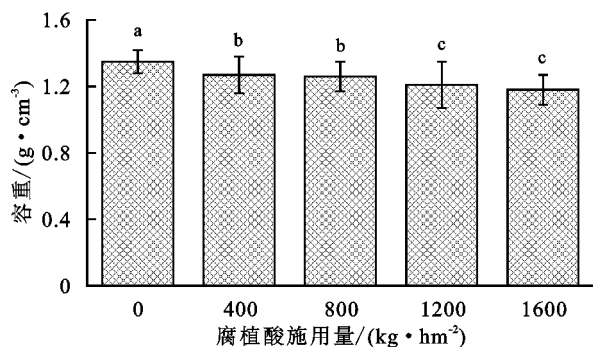


图2 腐植酸施用量对土壤容重的影响

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

施用腐植酸肥后冬小麦各生长指标均高于对照处理,达到显著性差异水平。有研究认为施用腐植酸可提高小麦分蘖和成穗率,显著提高产量<sup>[16]</sup>。毕军等<sup>[12]</sup>发现腐植酸可以促进冬小麦生长发育,增强抗逆性,提高小麦株高、穗长等农艺性状。薛志伟等<sup>[17]</sup>研究证实,施用腐植酸对小麦的千粒重和单穗籽粒数量有明显的提高。较多研究证实了腐植酸对作物生长的促进作用,腐植酸这种促生长作用与植物根系和对植物体内酶相关。有人在玉米中发现,腐植酸可以促进玉米根系质膜  $\text{H}^+ - \text{ATP}$  酶活性达到促进玉米根系生长的作用,并认为在施用低分子量的腐植酸效果更好<sup>[18-19]</sup>。施用腐植酸有利于植物体内基因的表达,从而促进氮素的吸收和氨基酸的代谢,进一步促进生物量的增加<sup>[20-21]</sup>。腐植酸类肥料能通过刺激作物生长、促进根系养分吸收、增强作物的抗逆性而提高作物产量。但当腐植酸肥料浓度达到某一阈值,过多的施用腐植酸肥料会抑制作物的生长,各生长指标

呈现出下降的趋势。Berbara 和 García<sup>[22]</sup>研究表明,施用高浓度的腐植酸会提高活性氧含量,导致脂质过氧化,对水稻根系生长产生不良影响。Maggioni 等<sup>[23]</sup>研究证实,中间浓度的腐植酸比过低或过高浓度的腐植酸更能促进燕麦根系对  $\text{K}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的吸收。García<sup>[24]</sup>研究腐植酸对水稻水分胁迫抗逆性增加的试验中认为,随着腐植酸施用浓度增加,植物的生长速度和含水量增速变快,但是水稻的抗氧化防御系统的酶活性并没有明显的变化。可见腐植酸的施用量超过某一阈值后,过量的腐植酸会抑制作物的生长。

施用腐植酸肥料对土壤中养分指标整体呈增加趋势,随着腐植酸肥料施用浓度的增加土壤速效磷、速效钾、有机质等指标均相应增加。土壤中全氮含量在腐植酸肥料较低施用水平随之升高,在高浓度施用水平全氮含量下降。Bama 等<sup>[25]</sup>认为,腐植酸的施用量与土壤中的 N、P 和 K 的释放呈线性相关关系,即在一定阈值范围内,腐植酸的加入可能会促进土壤中氮的硝化和挥发以及磷向易溶态解析。试验中土壤全氮随着腐植酸施用量的增加而增加,这个过程可能是因为腐植酸的加入提高土壤氮素含量,随着腐植酸施用量的增加,腐植酸对土壤中 N 释放的促进作用增加,以至于超过施用腐植酸对土壤养分的增加作用。对土壤磷和钾并没有表现出相同的现象,究其可能是因为腐植酸的添加量对养分的转化的影响存在差异,并且氮素在土壤中的释放方式更多,导致不同养分的表现不同<sup>[26]</sup>。

#### 3.2 结论

在<sup>垆</sup>土中施用腐植酸肥料,对土壤物理和化学特性具有明显的改善的作用,其中,对土壤速效磷、速效钾、土壤容重、田间持水量和孔隙度均达到显著性差异。施用较低浓度的腐植酸肥料,对小麦产量指标有明显的增加作用,当施用浓度超过某一阈值,较高浓度的腐植酸肥料会抑制小麦的生长。因此在施用腐植酸肥料时应明确作物和施肥用量标准。

土壤速效磷、速效钾、土壤容重、田间持水量和孔隙度等指标,均表现出随着腐植酸肥料施用量的增加而改善。利用小麦产量指标进行方程拟合,确定在<sup>垆</sup>土中腐植酸肥料的施用范围在  $667 \sim 1\ 122 \text{ kg/hm}^2$  为宜。

#### 参考文献:

- [1] Parsons J W. Humus Chemistry—Genesis, Composition, Reactions[J]. Soil Science, 1983,135(2):129-130.
- [2] Celik H, Katkat A V, Asik B B, et al. Effects of humus on

- growth and nutrient uptake of maize under saline and calcareous soil conditions[J]. *Žemdirbystė (Agriculture)*, 2010, 97(4):15-22.
- [3] El-Mekser H K A, Mohamed Z E M, Ali M A M. Influence of humic acid and some micronutrients on yellow corn yield and quality[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2014, 32(1):1-11.
- [4] Osman E A M, El-Masry A A, Khatab K A. Effect of nitrogen fertilizer sources and foliar spray of humic and/or fulvic acids on yield and quality of rice plants[J]. *Advances in Applied Science Research*, 2013, 4(4):174-183.
- [5] Suntari R, Retnowati R, Soemarno S, et al. Determination of urea-humic acid dosage of vertisols on the growth and production of rice[J]. *Agrivita, Journal of Agricultural Science*, 2015, 37(2):185-192.
- [6] 薛世川,刘秀芬,邓景华.施用腐植酸复合肥对小麦抗旱防衰能力的影响及其机理[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1):139-141.
- [7] 袁亮,赵秉强,林治安,等.增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3):620-628.
- [8] Trevisan S, Francioso O, Quaggiotti S, et al. Humic substances biological activity at the plant-soil interface: from environmental aspects to molecular factors[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2010, 5(6):635-643.
- [9] 何一通,孙志梅.煤炭腐植酸作为土壤改良剂对土壤物理性质和小麦产量的影响[J]. *腐植酸*, 2016(3):26-32.
- [10] Muscolo A, Sidari M, Attinà E, et al. Biological activity of humic substances is related to their chemical structure[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1):75-85.
- [11] 宗莉,杨效和,王爱勤.腐植酸复合材料对沙土理化性质和植物生长的影响[J]. *腐植酸*, 2015(2):15-19.
- [12] 毕军,夏光利,毕研文,等.腐植酸生物活性肥料对冬小麦生长及土壤微生物活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1):99-103.
- [13] Scheuerell S J, Mahaffee W F. Compost tea as a container medium drench for suppressing seedling damping-off caused by *Pythium ultimum*[J]. *Phytopathology*, 2004, 94(11):1156-1163.
- [14] Tan K H. Humic matter in soil and the environment: principles and controversies[M]. US: CRC Press, 2014.
- [15] 潘根兴,程琨,陆海飞,等.可持续土壤管理:土壤学服务社会发展的挑战[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4607-4620.
- [16] 庞庆阳,宣毓龙,蔡旭,等.棉粕腐植酸肥对小麦生长及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(2):231-235.
- [17] 薛志伟,薛鑫,宋志均,等.腐植酸与尿素配合施用对小麦产量及产量构成的影响[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(10):113-115.
- [18] Zandonadi D B, Canellas L P, Façanha A R. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast  $H^+$  pumps activation[J]. *Planta*, 2007, 225(6):1583-1595.
- [19] Canellas L P, Façanha A R. Chemical nature of soil humified fractions and their bioactivity[J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2004, 39(3):233-240.
- [20] Vaccaro S, Ertani A, Nebbioso A, et al. Humic substances stimulate maize nitrogen assimilation and amino acid metabolism at physiological and molecular level[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2015, 2(1):1-12.
- [21] Schiavon M, Pizzeghello D, Muscolo A, et al. High molecular size humic substances enhance phenylpropanoid metabolism in maize(*Zea mays* L.)[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2010, 36(6):662-669.
- [22] Berbara R L L, García A C. Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment[M]. New York:Springer, 2014.
- [23] Maggioni A, Varanini Z, Nardi S, et al. Action of soil humic matter on plant roots: stimulation of ion uptake and effects on  $(Mg^{2+} + K^+)$  ATPase activity[J]. *Science of the Total Environment*, 1987, 62:355-363.
- [24] García A C, Berbara R L L, Farias L P, et al. Humic acids of vermicompost as an ecological pathway to increase resistance of rice seedlings to water stress[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(13):3125-3134.
- [25] Sathiyabhama K, Selvakumari G, Santhi R, et al. Effect of humic acid on nutrient release pattern in an Alfisol (Typic Haplustalf) [J]. *Madras Agricultural Journal*, 2003, 90(10/12):665-670.
- [26] 王斌,马兴旺,许咏梅,等.腐植酸对灰漠土棉田土壤无机磷形态的影响[J]. *新疆农业科学*, 2007, 44(3):312-317.