

赵海超,黄智鸿,罗永华,等. 不同施肥处理对春玉米土壤溶解性有机质的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):228-233.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.059

# 不同施肥处理对春玉米土壤溶解性有机质的影响

赵海超,黄智鸿,罗永华,田再民

(河北北方学院,河北张家口 075000)

**摘要:**选取冀北旱作区春玉米(*Zea mays* ssp. *mays* L.)农田土壤为研究对象,通过连续4年进行不同施肥处理田间定位试验,采用三维荧光光谱法分析不同层次土壤溶解性有机质组分含量,研究施肥对农田土壤溶解性有机质组分[溶解性有机质(DOM)、溶解性有机碳(DOC)、溶解性有机氮(DON)、溶解性有机磷(DOP)]的影响,以揭示土壤DOM及其组分对玉米产量及土壤肥力效应。结果表明,各处理0~40 cm土壤DOM的 $\Sigma F_{ex/cm}$ 在46.04~78.24之间,DOC含量在101.24~253.48 mg/kg之间,DON含量在26.81~54.87 mg/kg之间,DOP含量在26.81~54.87 mg/kg之间。施用有机肥能够增加土壤DOM、DOC含量,有机肥和无机肥配施能够增加土壤DOC、DOP含量,降低DOM的 $\Sigma F_{ex/cm}$ 值,配施氮肥和磷肥分别增加土壤DON和DOP含量,无机肥配施有利于增加土壤DOM的 $\Sigma F_{ex/cm}$ 值,施肥降低了土壤DON和DOP含量。土壤中DOM和DOC主要来自外源,DON和DOP主要来自内源,土壤微生物和玉米生长对土壤DOM和DOP的影响具有多重性,影响较小,随着土壤微生物活性的增加和玉米产量的提高,土壤DOC含量增加、DON含量降低,DOC具有土壤肥力和玉米产量的指示效应。

**关键词:**施肥;土壤;溶解性有机质;产量;玉米

**中图分类号:** S513.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)01-0228-05

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是陆地生态系统生物地球化学循环的重要组分<sup>[1]</sup>。DOM是广泛存在于土壤中的一类结构复杂、性质稳定的有机高分子混合物<sup>[2]</sup>,是土壤样品在室温及天然pH值条件下,用水提取能通过0.45 μm微孔滤膜的土壤有机物质<sup>[3-4]</sup>。DOM中含有大量的溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)和溶解性有机磷(dissolved organic phosphorus, DOP)等生物潜在可利用碳、氮、磷。然而,与可溶解无机氮磷相比,溶解性有机氮磷很少受到人们的关注,但近年来,关于土壤中DOM的功能和动态研究取得了较大的进展<sup>[5]</sup>。随着酶学、微生物学及光谱技术的发展,溶解性有机质成为国内外研究的热点问题,三维荧光光谱法(three dimensional excitation emission matrix fluorescence spectrum, 3DEEM)分析技术具有灵敏度高、选择性高、信息量高、所需样品量少且不破坏样品结构的优点,逐渐成为研究自然界DOM的普遍方法<sup>[6-7]</sup>。荧光光谱图中 $E_x/E_m$ 特征峰值是描述DOM来源和组成的重要参数<sup>[8]</sup>。特征荧光强度综合指标( $\Sigma F_{ex/cm}$ )表示溶解性有机物的综合含量<sup>[8-9]</sup>,荧光峰的强度越强,所代表的组分含量越高。荧光参数 $r(A/C)$ 是一个与有机质结构和成熟度有关的指标<sup>[10]</sup>。荧光指数(fluorescence intensity ratio, FI)是表征DOM中腐殖质来源的参数<sup>[11]</sup>。自生源指数(autochthonous index, BIX)表征DOM自生源相对贡献<sup>[12]</sup>。

土壤中溶解性有机质主要来源于土壤微生物对土壤有机

质的降解和施肥、植物枯枝落叶残体等外源输入<sup>[5-13]</sup>。因此,施肥等农艺活动是影响土壤DOM含量及结构的主要因素。Ge等研究表明,有机农业与常规耕作相比,不施用化肥能够增加土壤DON含量<sup>[14]</sup>。笔者前期研究表明,施肥对DOM具有双重作用,施肥不仅是土壤DOM的重要来源,还可通过影响微生物及作物根系活力促进土壤DOM的耗损,DOM荧光强度与产量呈显著正相关关系<sup>[15]</sup>。有机肥可以向土壤输入DOM,而化肥等肥料可以通过影响土壤微生物活性及作物生长而影响土壤DOM含量及其结构。DOM是土壤肥力及土壤养分流失的重要组分,探讨施肥配比对土壤DOM的影响,能够深入揭示施肥处理对土壤有机养分影响的重要机制。本研究通过连续4年的田间定位试验,分析不同肥料配比对春玉米(*Zea mays* ssp. *mays* L.)农田土壤DOM、DOC、DON、DOP含量的影响,为该区域建立农田土壤培肥技术体系提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于我国北部河北省张家口市宣化县沙岭子镇南兴渠村(40°36'11.56" N, 115°08'05.74"E),该区春玉米种植面积近70万hm<sup>2</sup>,占全河北省春玉米种植面积的近1/3。试验地点的无霜期为100~150 d,年降水量为350~450 mm,主要集中在7~8月。试验区土壤主要为褐土,土壤质地为壤质土,2014年土壤理化性状如表1所示。

### 1.2 试验处理

试验处理设单施氮(N)、单施磷(P)、氮磷配施(NP)、氮磷钾配施(NPK)、单施有机肥(O)、有机肥+N(ON)、有机肥+P(OP)、有机肥+NP(ONP)、有机肥+NPK(ONPK)9个处理,以不施肥为对照(CK),以上9个处理与对照分别用

收稿日期:2016-07-27

基金项目:河北省科学技术厅项目(编号:15226423、13226402D)。

作者简介:赵海超(1974—),男,内蒙古赤峰人,博士,副教授,主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail:haichaozhao19@163.com。

1~10 表示;其中施 N 180 kg/hm<sup>2</sup>, 施 P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 150 kg/hm<sup>2</sup>, 施 K(K<sub>2</sub>O) 120 kg/hm<sup>2</sup>, 施有机肥 7 500 kg/hm<sup>2</sup>。N 肥用尿素(含 46% 氮)、P 肥用过磷酸钙(含 12% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、K 肥用硫酸钾(含 50% K<sub>2</sub>O)、有机肥用牛粪(含 14.7% 有机质、0.42% 氮、0.22% 磷), 牛粪用量 7 500 kg/hm<sup>2</sup>(用量略高于当地习惯用

量)。为减少土壤扰动等引起的差异,肥料均以基肥一次性施入土壤。重复 3 次,共 30 个小区,小区面积为 6 m × 10 m = 60 m<sup>2</sup>。田间管理、种植密度同当地传统种植。2010—2014 年连续 4 年采用田间定位施肥,种植玉米品种为郑丹 958,种植密度为 75 000 株/hm<sup>2</sup>,田间管理同当地传统种植。

表 1 土壤 0~40 cm 土层理化性质

土层深度 (cm)	土壤理化性质指标						
	有机质含量 (g/kg)	总氮含量 (g/kg)	总磷含量 (g/kg)	总钾含量 (g/kg)	pH 值	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度 (%)
0~10	20.51	1.15	0.137	32.40	7.76	1.35	44
10~20	21.64	1.22	0.142	32.18	7.98	1.22	46
20~40	22.21	1.13	0.145	32.54	7.84	1.40	40
0~40	21.45	1.17	0.141	32.37	7.86	1.32	43

### 1.3 土壤样品采集

2014 年于玉米成熟期(9 月 20 日),在田间试验小区内按“S”形采样法随机采集 5 点,3 个土层采样深度分别为 0~10、10~20、20~40 cm,现场混匀,去除土壤中植物残体和根系,置于塑封袋中带回实验室,4℃保存。进行土壤有机质组分和土壤微生物生物量的测定,产量指标采用 4 年的平均值。

### 1.4 分析方法

土壤 DOM 浸提液制备:土壤冷冻干燥后,过 100 目筛,利用超纯水浸提[水土质量比为 10:1,200 r/min、(20±1)℃下振荡 16 h,在 10 000 r/min、20℃下离心 30 min,使固液分离,上清液过 0.45 μm 滤膜]获得土壤 DOM 浸提液。DOM 采用三维荧光光谱法测定<sup>[6-8]</sup>,利用 Hitachi F-7000 型荧光光谱分析仪测定其三维荧光光谱(3DEEM)。激发和发射波长狭缝宽度为 5 nm,扫描速度为 2 400 nm/min,激发波长( $E_x$ )为 200~450 nm,发射波长( $E_m$ )为 250~600 nm。DOC 含量采用 TOC-5000A 测定;土壤中溶解性有机氮含量采用溶解性总氮(DTN)含量与氨态氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量的差减法测定<sup>[16]</sup>,DTN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量采用紫外分光光度法测定,NH<sub>3</sub>-N 含量采用纳氏试剂分光光度法测定,计算公式为 DON = DTN - NH<sub>3</sub>-N - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N;土壤溶解性有机磷含量采用溶解性总磷(DTP)与活性磷(SRP)的差减法测定,DTP、SRP 含量采用紫外分光光度法测定,计算公式为 DOP = DTP - SRP。土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、微生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)含量采用三氯甲烷熏蒸培养法测定<sup>[17-18]</sup>,MBC 采用 multi N/C 3100 分析仪测定,MBN 采用 Kjeltec 8400 全自动凯氏定氮仪(FOSS)测定。土壤微生物量碳含量采用熏蒸提取-容量分析法测定;土壤微生物量氮含量采用熏蒸提取-茚三酮比色法测定。土壤基本理化性状采用常规分析法测定。0~40 cm 土层各指标值为分层土壤指标的平均值。

### 1.5 数据处理

试验数据统计与作图采用 Excel 2003 软件,数据差异显著性分析、相关分析和回归分析采用 SPSS 17.0 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对春玉米农田土壤 DOM 的影响

DOM 是土壤主要的活性有机质组分,不同施肥措施对春玉米农田土壤 DOM 影响如图 1 所示。通过土壤 DOM 的

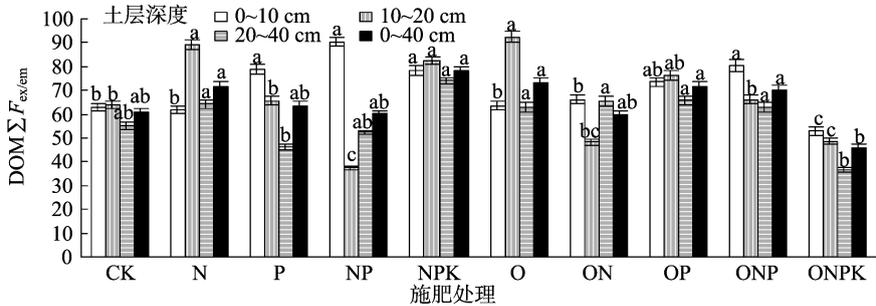
3DEEM 可见,与前人研究结果对比,各处理不同层次土壤 3DEEM 均出现 Peak-A(紫外区类腐殖质荧光峰)、Peak-C(可见区类腐殖质荧光峰)和 Peak-E(类蛋白荧光峰)3 个荧光峰<sup>[6-9]</sup>。不同处理 0~40 cm 土壤 DOM 的  $\Sigma F_{ex/em}$  在 46.04~78.24 之间,大小顺序为 NPK > O > OP > N > ONP > P > CK > NP > ON > ONPK,而且 NPK 和 O 处理显著高于 ONPK 处理,可见有机肥和无机肥配施可降低土壤中 DOM 含量,但不同处理对各土层 DOM 影响不同,玉米根系主要活动层在 10~20 cm,该层 DOM 的  $\Sigma F_{ex/em}$  大小顺序为 O > N > NPK > OP > ONP > P > CK > ONPK > ON > NP,而且 O 和 N 处理明显高于其他处理,0~10 cm 土层  $\Sigma F_{ex/em}$  以 NP 处理最高,20~40 cm 土层  $\Sigma F_{ex/em}$  以 NPK 处理最高。可见单施有机肥和氮肥能够增加土壤 10~20 cm 土层 DOM,氮磷肥配施有利于增加 0~10 cm 土层 DOM,氮磷钾肥配施有利于增加 20~40 cm 土层 DOM 含量,不同施肥措施能够显著影响土壤 DOM 含量。

### 2.2 施肥对春玉米农田土壤 DOC 的影响

DOC 是指在一定的时空条件下,受植物和微生物影响强烈、具有一定溶解性的土壤碳素<sup>[15]</sup>,它能够反映土壤 DOM 的含量。不同处理 0~40 cm 土壤 DOC 含量在 101.24~253.48 mg/kg 之间,大小顺序为 ONPK > N > ON > ONP > P > NP > O > OP > NPK > CK,而且 ONPK 和 N 处理明显高于其他处理,施肥处理均显著高于 CK,可见施肥能够增加土壤 DOC 含量,施用有机肥和氮肥有利于增加土壤 DOC 含量。10~20 cm 土层 DOC 含量大小顺序为 ONPK > N > NP > P > O > OP > ONP > NPK > ON > CK,而且 ONPK 和 N 处理明显高于其他处理,施肥处理均显著高于 CK。0~10 cm 土层 DOC 含量以 ONP 处理最高,且各施肥处理均显著高于 CK。20~40 cm 土层 DOC 含量以 ONPK 处理最高,且 ONPK 和 O 处理均明显高于其他处理(图 2)。由此可见,有机无机肥配施、单施氮肥和有机肥能够显著提高土壤 DOC 含量。

### 2.3 施肥对春玉米农田土壤 DON 的影响

DON 是土壤氮素生物地球化学循环的关键组成部分<sup>[19]</sup>,是限制陆地生态系统生产力的重要元素<sup>[20]</sup>。不同处理 0~40 cm 土壤 DON 含量在 26.81~54.87 mg/kg 之间,大小顺序为 CK > ON > NP > ONPK > ONP > P > O > OP > NPK > N,而且 NPK 和 N 处理明显低于其他处理,施肥处理均明显低于 CK,总体来看,施肥能够降低 0~40 cm 土层土壤 DON 含量,因为施肥增加土壤微生物活性<sup>[21]</sup>,加速 DON 的降解而



不同小写字母表示施肥处理与对照之间在5%水平上的差异显著。图2至图5同

图1 不同施肥处理春玉米农田土壤 DOM 的  $\Sigma F_{ex/em}$  变化

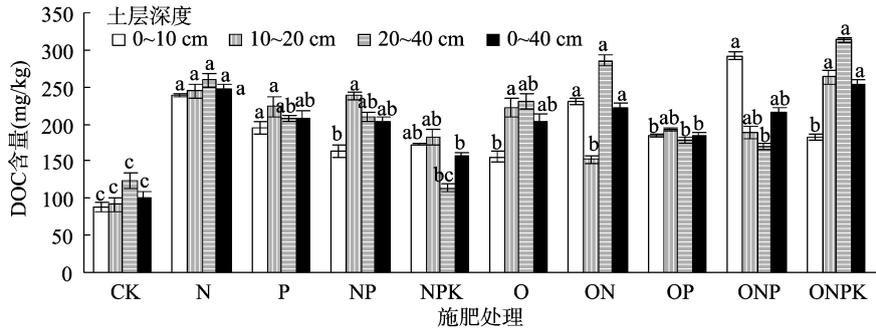


图2 不同施肥处理春玉米农田土壤 DOC 变化

使 DON 含量下降。10 ~ 20 cm 土层 DON 含量大小顺序为 ON > NP > ONPK > CK > N > NPK > OP > ONP > P > O, 而且 ON 处理显著高于其他处理。0 ~ 10 cm 土层 DON 含量以 O 处理最高, 且与 CK 显著高于其他处理, 20 ~ 40 cm 土层 DON 含量以 CK 最高, 且明显高于施肥处理(图 3)。可见施肥能够降低 0 ~ 40 cm 土层土壤 DON 含量, 但氮肥和有机肥配施

比其他施肥处理有利于增加耕层(10 ~ 20 cm) 土壤 DON 含量, 主要是由于氮肥的施入抑制微生物对 DON 的降解, 同时施用有机肥有利于防止 DON 的流失<sup>[22]</sup>, 而增施有机肥有利于增加 0 ~ 10 cm 土层土壤 DON 含量, 主要是由于有机肥撒施于表层, 耕翻后进入土壤, 表层留存较多。而配合施肥有利于促进微生物活性, 加速 DON 的降解而使 DON 含量下降。

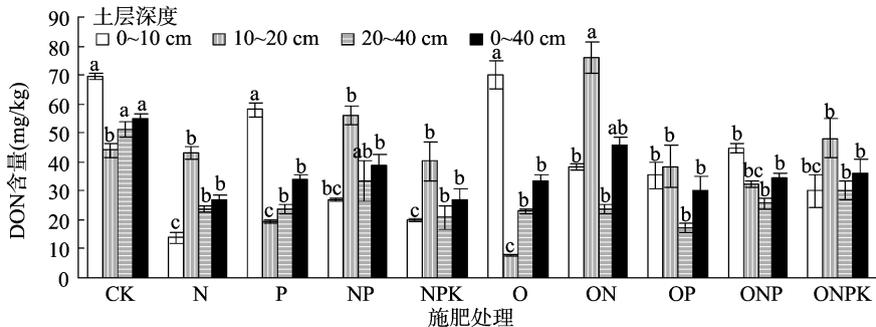


图3 不同施肥处理春玉米农田土壤 DON 变化

#### 2.4 施肥对春玉米农田土壤 DOP 的影响

土壤有机磷(organic phosphorus)对土壤磷的矿化及磷循环具有重要的作用<sup>[23]</sup>, DOP 是土壤浸提液中容易被生物利用的有机磷<sup>[24]</sup>。不同处理 0 ~ 40 cm 土壤 DOP 含量在 26.81 ~ 54.87 mg/kg 之间, 大小顺序为 NPK > CK > ONPK > P > ONP > ON > OP > N > O > NP, 总体来看, 平衡施肥有利于增加土壤 DOP 含量, 不施肥使土壤微生物活性降低, 减少了 DOP 的降解量, 缺施磷肥促进土壤中 DOP 向无机磷转化以被玉米吸收利用, 使土壤中 DOP 含量降低。10 ~ 20 cm 土层 DOP 含量大小顺序为 ONPK > NPK > ONP > CK > ON > OP > NP > P > N > O, 而且 ONPK 处理显著高于其他处理。0 ~ 10 cm 土层 DOP 含量以 CK 最高, 且明显高于其他处理, 20 ~ 40 cm 土层

DOP 含量以 P 处理最高, 且显著高于其他处理(图 4)。可见配合施肥有利于增加土壤 DOP 含量, 且主要增加肥料施入层土壤 DOP 含量, 单施磷肥有利于增加底层土壤 DOP 含量, 缺施磷肥会降低土壤中 DOP 含量, 但不施肥能够使土壤保有较高的 DOP 含量。

### 3 讨论

#### 3.1 施肥对土壤 DOM 来源的影响

土壤中 DOM 主要来源于有机质降解和生物分泌物以及外源有机肥输入, 同时 DOM 是土壤微生物及作物根系利用的主要有机质形态, 因此土壤中 DOM 既受生物的影响, 同时又受有机肥和植物残体输入的影响。DOM 荧光参数能够表

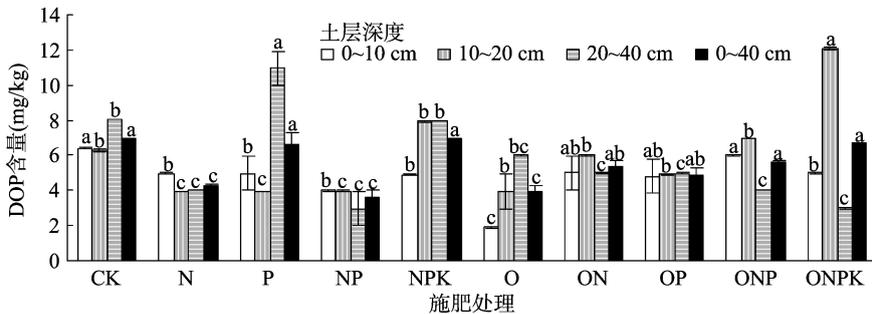


图4 不同施肥处理春玉米农田土壤 DOP 变化

征土壤 DOM 的来源,  $r(A/C)$  值可以用来反映 DOM 中类腐殖组分发育程度<sup>[10]</sup>, 如图 5 所示, 不同施肥处理土壤 DOM 的  $r(A/C)$  变化范围在 1.10 ~ 2.07 之间, O、OP 和 ONP 处理明显高于其他处理, 表明其腐殖化程度较高, 而 NP 和 ONPK 处理显著低于其他处理, 表明其腐殖化程度较低。荧光指数 ( $FI$ ) 可表征 DOM 来源,  $FI > 1.9$  表示 DOM 主要来源于微生物活动,  $FI < 1.4$  则表示以陆源输入为主<sup>[25]</sup>, 不同处理土壤 DOM 的  $FI$  在 1.53 ~ 1.71 之间, CK 最高且显著高于施肥处理, 可见不施肥土壤中微生物活动对 DOM 的贡献率较大。BIX 反映 DOM 自生源相对贡献, BIX 值越大, 自生源特征越明显, 类蛋白组分贡献越大, 生物可利用性越高<sup>[12]</sup>, 不同处理相比 CK 的 BIX 最高, 且显著高于施肥处理, 施肥处理中单施氮肥处理最高, 可见不施肥或单施氮肥土壤 DOM 自生源特征明显。根据不同处理土壤中 DOM、DOC、DON 和 DOP 含量变化可见, CK 土壤中 DON 和 DOP 含量较高, 表明土壤中 DON 和 DOP 主要来源于土壤微生物活动, 具有较强的土壤自生性, 而土壤中 DOM 和 DOC 主要来源于外源输入, 陆源性较强。当单施氮肥和磷肥时, 在微生物活动的作用下 DON 和 DOP 含量增加; 当单施有机肥时, 虽然外源有机质增加, 在土壤微生物作用下转化成 DOM, 降解产生的 N、P 容易被作物吸收利用, 因此 DON 和 DOP 含量不高, 而 DOC 含量较高; 增施有机肥, 能够增强土壤中 DOM 的腐殖化程度和陆源性; 在均衡施肥特别是氮磷钾有机肥配合施用, 微生物及玉米主要利用施入的无机养分, 对有机质的降解作用减弱, 使 DOM 含量降低, 腐殖化程度较低, 陆源性增加; 在氮磷钾无机肥配合施用, 由于微生物活动增加, 土壤中原有的有机质降解增多, 虽然使 DOM、DOP 增加, 因无外源碳输入, DOC、DON 降低, DOM 的自生性增加, 腐殖化程度下降。

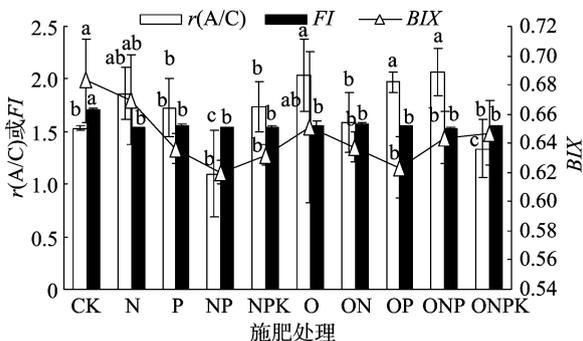


图5 不同施肥处理春玉米农田土壤荧光参数的变化

### 3.2 生物对土壤 DOM 的影响

微生物和农作物的活动不仅是土壤中 DOM 的重要来

源, 同时也分解消耗土壤中的 DOM<sup>[26-27]</sup>。不同施肥措施土壤中微生物碳氮含量及玉米产量和千粒质量如图 6-a 所示。总体来看施用有机肥和有机无机肥配合施用能够增加土壤微生物活性及玉米产量。进行相关性分析可知, DOM 和 DOP 与微生物和产量指标相关性较小, DON 和 DOC 与微生物和产量指标的相关性如表 2 所示, 0 ~ 10 cm 土层 DON 与产量、MBN 呈显著负相关, DOC 与产量、MBN 呈显著正相关, 10 ~ 20 cm 土层 DOC 与产量、MBC 和 MBN 呈显著正相关, 20 ~ 40 cm 土层 DON 与产量、千粒质量呈显著负相关, 0 ~ 40 cm 土层 DON 与产量呈显著负相关, DOC 与产量、MBN 呈显著正相关。可见微生物和玉米根系主要降解土壤中的 DON, 且随着玉米产量的增加, 土壤 DON 含量下降, 而随着微生物活动的增加和玉米产量的增加, 有利于提高土壤中 DOC 的含量。DOM 是土壤中复杂的溶解性有机质, 肥料及生物对其影响是多方面的, 因此本试验中 DOM 与产量和微生物指标相关性较小。土壤中磷的转化能力比氮、碳小, 因此施肥对 DON 的影响主要是表现在 0 ~ 10 cm 土层, 而 DOP 表现在 20 ~ 40 cm 土层, 在外源磷输入的条件下, DOP 在土壤受微生物和根系对有机质降解作用和吸收作用的多重影响, 因此本试验中 DOP 与产量和微生物指标相关性较小。微生物能够降解土壤中 DON, 使其转化为无机氮被微生物及玉米吸收利用, 同时微生物活动能够降解有机质, 根系分泌物能产生 DON, 因此在微生物活动剧烈的 0 ~ 10 cm 土层, DON 以降解为主, 在根系主要活动层 10 ~ 20 cm 土层, DON 与微生物及产量指标相关性较小, 而受根系吸收作用为主的 20 ~ 40 cm 土层, DON 与产量指标呈显著负相关。卢萍等研究表明, 土壤溶液中 DON 浓度与施肥量呈负相关关系<sup>[26]</sup>。DOC 同样受微生物及玉米生长的多重影响, 但总体来看微生物活动和玉米生长对土壤中 DOC 含量主要起增加作用, 可见 DOC 能够作为土壤肥力指标, 指示土壤肥力及玉米产量。

## 4 结论

(1) 关于各处理 DOM 的  $\Sigma F_{ex/cm}$ , 0 ~ 40 cm 土壤 46.04 ~ 78.24 之间, 大小顺序为 NPK > O > OP > N > ONP > P > CK > NP > ON > ONPK, 0 ~ 10 cm 土层以 NP 处理最高, 10 ~ 20 cm 土层以 O 处理最高, 20 ~ 40 cm 土层以 NPK 处理最高。

(2) 关于各处理 DOC 含量, 0 ~ 40 cm 土壤 101.24 ~ 253.48 mg/kg 之间, 大小顺序为 ONPK > N > ON > ONP > P > NP > O > OP > NPK > CK, 0 ~ 10 cm 土层以 ONP 处理最高, 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层以 ONPK 处理最高。

(3) 关于各处理 DON 含量, 0 ~ 40 cm 土壤 26.81 ~

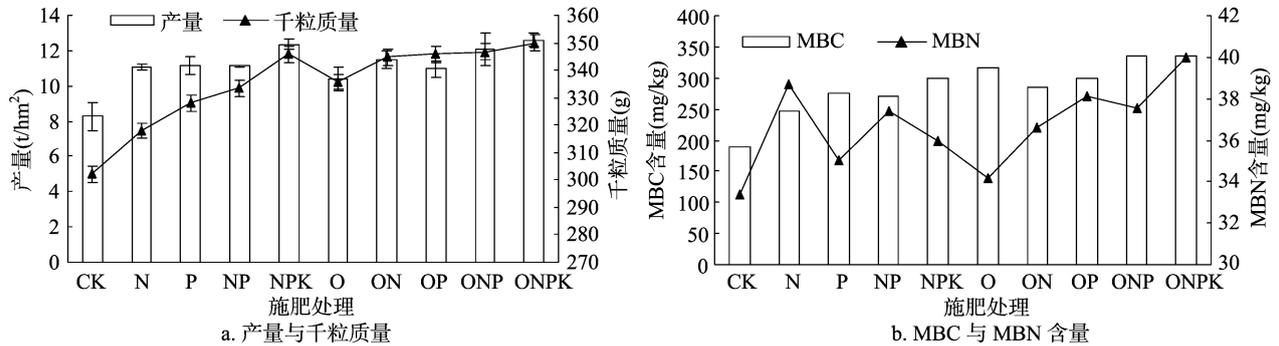


图6 不同施肥处理春玉米农田土壤微生物及玉米产量的变化

表2 不同土层土壤中 DON 和 DOC 与微生物和产量指标的相关性

指标	相关系数							
	0 ~ 10 cm		10 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm		0 ~ 40 cm	
	DON	DOC	DON	DOC	DON	DOC	DON	DOC
产量	-0.639 4 *	0.647 9 *	0.140 7	0.608 2 *	-0.667 9 *	0.360 9	-0.629 5 *	0.672 7 *
千粒质量	-0.361 6	0.491 8	0.108 7	0.382 9	-0.686 5 *	0.274 1	-0.448 6	0.480 8
MBC	-0.328 6	0.578 8	-0.293 9	0.618 5 *	-0.350 4	0.169 9	-0.542 2	0.585 2
MBN	-0.685 2 *	0.715 3 *	0.258 7	0.718 2 *	0.281 1	0.295 3	-0.446 5	0.726 4 *

注:  $n=10$ , “\*”为显著相关; “\*\*”为极显著相关。

54.87 mg/kg 之间,大小顺序为 CK > ON > NP > ONPK > ONP > P > O > OP > NPK > N, 0 ~ 10 cm 土层 DON 含量以 O 处理最高, 10 ~ 20 cm 土层 DON 含量以 ON 处理最高, 20 ~ 40 cm 土层 DON 含量以 CK 最高。

(4)关于各处理 DOP 含量, 0 ~ 40 cm 土壤在 26.81 ~ 54.87 mg/kg 之间,大小顺序为 NPK > CK > ONPK > P > ONP > ON > OP > N > O > NP, 0 ~ 10 cm 土层以 CK 最高, 10 ~ 20 cm 土层以 ONPK 处理最高, 20 ~ 40 cm 土层以 DOP 处理最高。

(5)土壤中 DOM 和 DOC 主要来自外源, DON 和 DOP 主要来自内源, 土壤微生物和玉米生长对土壤 DOM 和 DOP 影响具有多重性相关性较小, 土壤微生物活性的增加和玉米产量的提高, 有利于增加土壤 DOC 含量, 降低土壤 DON 含量。

#### 参考文献:

[1] Perakis S S, Hedin L O. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds [J]. *Nature*, 2002, 415(6870): 416-419.

[2] Amon R W, Benner R. Rapid-cycling of high-molecular-weight dissolved organic matter in the ocean [J]. *Nature*, 1994, 369(6481): 549-552.

[3] 蒋疆, 王果, 方玲. 土壤水溶解态有机物质与重金属的络合作用[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(1): 67-71.

[4] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 422-429.

[5] Zsolnay A. Dissolved humus in soil waters[M]//Piccolo A. Humic substances in terrestrial ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 1996: 171-223.

[6] Liu L, Song C, Yan Z, et al. Characterizing the release of different composition of dissolved organic matter in soil under acid rain leaching using three-dimensional excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(1): 15-21.

[7] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers [J]. *Environmental Science &*

*Technology*, 2001, 35(5): 948-953.

[8] Wu F C, Tanoue E. Isolation and partial characterization of dissolved copper-complexing ligands in stream waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(18): 3646-3652.

[9] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24): 5701-5710.

[10] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706-719.

[11] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate associated by carbon-13 natural abundance [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1996, 60: 801-807.

[12] Wilson H F, Xenopoulos M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(1): 37-41.

[13] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils; a review [J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.

[14] Ge T D, Nie S A, Hong Y, et al. Soluble organic nitrogen pools in greenhouse and open field horticultural soils under organic and conventional management: A case study [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(6): 371-374.

[15] 赵海超, 刘景辉, 赵宝平, 等. 施肥对不同肥力春玉米土壤溶解性有机质的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(8): 1286-1291.

[16] Ros G H, Temminghoff E J, van Groenigen J W. Isotopic analysis of dissolved organic nitrogen in soils [J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(18): 7814-7820.

[17] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.

[18] Calbrix R, Barray S, Chabrierie O, et al. Impact of organic amendments on the dynamics of soil microbial biomass and bacterial communities in cultivated land [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35

温泉,刘森,宋俊德,等. 巨大芽孢杆菌对羽叶鬼针草富集土壤铅的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):233-235.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.060

# 巨大芽孢杆菌对羽叶鬼针草富集土壤铅的影响

温泉,刘森,宋俊德,贾威,冯璐,戴秉红  
(辽宁石化职业技术学院,辽宁锦州 121001)

**摘要:**以巨大芽孢杆菌为强化微生物,研究不同微生物浓度对羽叶鬼针草吸收重金属铅的增效。结果表明,相对于未添加微生物的对照组,添加微生物的  $S_1$  处理(20 mL 菌液)、 $S_2$  处理(40 mL 菌液)、 $S_3$  处理(60 mL 菌液)地上部分生物富集系数分别提高了 15.3%、53.8%、61.5%,地下部分生物富集系数分别提高了 25.0%、62.5%、75.0%,说明巨大芽孢杆菌可强化羽叶鬼针草对于铅的吸收,主要可能是微生物的添加可以提高土壤中苹果酸、酒石酸的浓度,从而活化土壤中铅的有效态,并刺激植物根系微生物的活性。研究结果为微生物-植物联合修复重金属土壤提供了一定的理论依据。

**关键词:**巨大芽孢杆菌;羽叶鬼针草;富集;土壤;铅;重金属土壤污染修复

**中图分类号:** X53;S182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)01-0233-03

土壤是人类获取食物和其他再生资源的物质基础<sup>[1]</sup>,是人类赖以生存的重要自然环境,无论在中国还是在世界范围内,人们面临的粮食、资源和环境问题与土壤密切相关<sup>[2]</sup>。截至 2010 年,在我国有超过 2 000 万  $\text{hm}^2$  的农田被锡(Sn)、铬(Cr)、铅(Pb)、锌(Zn)等重金属污染,大约占耕地总面积的 1/5,导致每年由于重金属污染所损失的粮食量达到了 1 000 万  $\text{t}$ <sup>[3]</sup>。2016 年 5 月 28 日,《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”)出台,表明土壤污染治理与修复是今后环境保护和综合治理的重点任务之一<sup>[4]</sup>。

植物修复技术是以忍耐和超量积累某种或某些污染物的理论为基础,利用植物及其共存微生物体系清除环境中污染物的一类环境污染治理技术<sup>[5-7]</sup>,主要是通过超富集植物将土壤中的重金属提取出来,并搬运到植物根部可收割部分和

植物地上的枝条部位。目前已经筛选到一些超富集的植物,如蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)<sup>[8]</sup>、东南景天(*Sedum alfredii*)<sup>[9]</sup>、印度芥菜(*Brassica juncea*)<sup>[10]</sup>等,在超富集植物中,羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*)<sup>[11]</sup>能大量富集 Pb,并且生物量较大,在植物修复中具有一定的潜力,但是目前很少有关于用微生物来提高羽叶鬼针草吸附 Pb 的报道。因此,本研究以 1 种重要的功能菌——巨大芽孢杆菌作为研究对象,研究不同添加量的巨大芽孢杆菌对羽叶鬼针草吸附土壤重金属 Pb 的影响,以期微生物促进植物修复重金属污染土壤提供一种新的研究思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

羽叶鬼针草种子,采自铅锌尾矿废弃地上的自然物种,经采集后获得种子。试验土壤,采自辽宁石化职业技术学院校园,试验用土经风干后过筛,重金属以硝酸铅的形式施入土壤中,使土壤中的铅含量为 400  $\text{mg}/\text{kg}$ ,于室温下平衡 1 个月后备用。

(3):511-522.

[19] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5):991-999.

[20] Qualls R G, Richardson C J. Factors controlling concentration, export, and decomposition of dissolved organic nutrients in the Everglades of Florida[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 62(2):197-229.

[21] 林诚,王飞,李清华,等. 不同施肥制度对黄泥土壤酶活性及养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(6):24-27.

[22] 高忠霞,杨学云,周建斌,等. 小麦-玉米轮作期间不同施肥处理氮素的淋溶形态及数量[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8):1624-1632.

[23] Achat D L, Bakker M R, Zeller B, et al. Long-term organic

phosphorus mineralization in Spodosols under forests and its relation to carbon and nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(9):1479-1490.

[24] McDowell R W, Koopmans G F. Assessing the bioavailability of dissolved organic phosphorus in pasture and cultivated soils treated with different rates of nitrogen fertiliser[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(1):61-70.

[25] Wickland K P, Neff J C, Aiken G R. Dissolved organic carbon in Alaskan boreal forest: sources, chemical characteristics, and biodegradability[J]. *Ecosystems*, 2007, 10(8):1323-1340.

[26] 卢萍,单玉华,杨林章,等. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5):736-741.

[27] 马晓霞,王莲莲,黎青慧,等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(17):5502-5511.

收稿日期:2017-03-27

基金项目:辽宁省锦州市科学技术计划(编号:16A2G33)。

作者简介:温泉(1967—),男,辽宁锦州人,硕士,副教授,主要从事环境工程方面的研究。E-mail:270289560@qq.com。