

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.020

# 土壤低含量铅时冬小麦幼苗根际微生物群落的变化\*

贾夏 董岁明 周春娟

(长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054)

**摘要:** 采用土壤盆栽试验法研究了土壤低含量铅(Pb)(质量比小于300 mg/kg干土)对冬小麦幼苗根际微生物的影响特征。与对照相比,幼苗生长3周和7周时,低含量Pb对细菌数量的平均抑制率分别为16.25%和8.62% ( $p < 0.01$ );幼苗生长3周、7周和12周时,低含量Pb对真菌数量的平均抑制率分别为34.08%、39.89%和17.49% ( $p < 0.01$ );7周和12周时,与对照相比,低含量Pb极显著( $p < 0.01$ )抑制放线菌数量增殖。幼苗生长3周时,真菌数量与Pb含量极显著( $p < 0.01$ )相关;7周时,真菌、放线菌和微生物总数与Pb含量显著( $p < 0.05$ )相关。低含量Pb处理下,根际真菌/细菌比值较对照显著降低,微生物代谢功能多样性变化显著。研究结果表明:土壤低含量Pb对冬小麦幼苗根际土壤微生物数量及微生物群落结构特征影响显著。

**关键词:** 冬小麦 低含量铅 根际土壤 微生物 微生物代谢功能多样性

**中图分类号:** S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0103-06

## Changes of Microbial Communities in Rhizosphere of Winter Wheat Seedlings under Low Lead Content

Jia Xia Dong Suiming Zhou Chunjuan

(College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Pot experiments were conducted to investigate the effect of low lead content ( $< 300$  mg/kg dry soil) on winter wheat seedlings rhizosphere microorganisms. Compared to the control, the number of bacterial decreased significantly ( $p < 0.01$ ) by 16.25% at the third week and by 8.62% at the seventh week, and the number of fungi in low lead content decreased significantly ( $p < 0.01$ ) by an average of 34.08%, 39.89% and 17.49% at the third week, seventh week, and twelfth weeks, respectively. The actinomyces amount in low lead content decreased significantly ( $p < 0.01$ ) at the seventh and twelfth weeks. The correlation between the number of fungi and lead content was significant ( $p < 0.01$ ) at the third week and the number of actinomyces, the fungi and the total microbial had significant ( $p < 0.05$ ) correlation to the lead content at the seventh week. In the three growth stages, fungal/bacterial population ratio decreased evidently and the microbial functional diversity changed evidently in low lead content. In conclusion, soil microbial population and community in the rhizosphere of winter wheat seedlings were affected significantly by low lead content.

**Key words:** Winter wheat Low lead content Rhizosphere soil Microorganism Microbial functional diversity

### 引言

根际是土壤-根系-微生物三者紧密结合相互影响的场所,而根际土壤微生物可以迅速、活跃地参与

养分循环和转化<sup>[1]</sup>,其类群、数量、分布是评价根际微生态环境的重要指标<sup>[2]</sup>,对根际土壤污染物的自净、重金属的迁移转化等发挥重要作用,直接关系植物根际微生态系统的营养功能、安全性和稳定性。

收稿日期:2012-08-21 修回日期:2012-09-29

\* 国家自然科学基金资助项目(31000222,31270665)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2012JC041)

作者简介:贾夏,副教授,博士,主要从事农业环境污染研究,E-mail:jjxianavy@163.com

国家标准 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》规定, II 类土壤主要适用于一般农田、蔬菜地、茶园、果园、牧场等, 其中 Pb 质量比的基准值为 300 mg/kg 干土, 然而当土壤 Pb 含量低于基准值时是否会影响到植物根际土壤微生态系统, 目前知之甚少, 且从已有研究结果看, 即使土壤低含量 Pb 对植物生长发育无显著影响, 但却促进镉在小麦植株体内的积累<sup>[3]</sup>, 同时也发现土壤低含量 Pb 对小麦根的生长、根系 SOD 酶等具有明显影响<sup>[4~5]</sup>; 此外, 微量重金属亦可能会通过干扰微生物群落结构而长期影响土壤生态功能的安全性和稳定性。本研究探讨低于国家 GB 15618—1995 II 级质量标准关于 Pb 限量值(300 mg/kg 干土, pH 值 > 7.5) 条件下, 土壤低含量 Pb 对冬小麦幼苗根际微生物群落的影响特

征, 旨在为土壤低含量 Pb 背景下冬小麦幼苗根际微生态系统功能是否存在安全威胁提供一定科学依据, 以期正确评价土壤重金属污染对冬小麦根际土壤微生态系统的安全性和稳定性及小麦生产中重金属安全控制技术体系 and 安全性评价技术体系的建立提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种为小偃 22 号, 幼苗半匍匐, 分蘖力较强, 叶色浅, 叶片较长, 株高 88 cm, 株型较紧凑。供试土壤类型为塋土, 其基本理化性质采用常规方法进行测定<sup>[6]</sup>, 测定结果如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本理化性质

Tab. 1 Basic physical and chemistry properties of soil

土壤类型	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>	总 N /g·kg <sup>-1</sup>	有效 P /mg·kg <sup>-1</sup>	可交换 K /mg·kg <sup>-1</sup>	可溶性盐 /mg·kg <sup>-1</sup>	pH 值	Pb /mg·kg <sup>-1</sup>
塋土	17.20	1.12	71.17	575.00	0.74	8.45	7.32

### 1.2 盆栽试验设计

依据 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》, 土壤低含量 Pb 处理为 0、50、120、180、230 mg/kg 干土, 依次编号 CK、T1、T2、T3、T4。采用盆栽(盆高 46 cm, 直径 36 cm) 试验培育冬小麦幼苗。以多点混合法于陕西关中冬小麦产区采集盆栽土壤样品, 分别于 8 处采集 0~20 cm 层土壤, 去掉大的根系等杂物后风干, 过 1 mm 筛并充分混匀后备用。土壤 Pb 处理采取向供试土壤中添加醋酸铅的方式进行, 土壤添加醋酸铅后充分混匀并平衡半个月后装盆, 每盆装土 15 kg, 浇水使土壤含水量为田间最大持水量的 60%, 于 2010 年 10 月 1 日种植冬小麦, 为了保证足够的取样量, 每盆定植 200 棵冬小麦幼苗。整个幼苗生长期间用自来水浇灌, 使土壤水分含量达到田间最大持水量的 60%, 每处理均设置 3 个重复。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 土壤样品采集

于冬小麦幼苗生长 3 周、7 周和 12 周采用多点混合法挖取冬小麦植株, 抖掉根系外围土, 剩余的即为根际土<sup>[2]</sup>, 用毛刷刷下根际土并充分混匀后拣去细根等杂物, 过 1 mm 筛并分成 2 份, 一份用于根际土壤微生物数量分析, 另一份用于 Biolog Eco 微平板法进行微生物分析。

#### 1.3.2 测定项目与方法

土壤细菌、真菌和放线菌数量采用 CFU(活细胞计数法) 法分析<sup>[7]</sup>。根际土壤微生物功能多样性

采用 Biolog Eco 微平板法分析: 称取相当于 10 g 干燥质量的新鲜土样置无菌三角瓶, 加无菌的 0.85% NaCl 水溶液 90 mL, 封口, 200 r/min 振荡 30 min 后于冰浴中静置 2 min, 取上清液 5 mL 置 100 mL 灭菌三角瓶中加入 45 mL 无菌水, 重复稀释 3 次, 制得 1:1 000 的提取液, 立即用于 ELISA 反应。将 Biolog Eco 平板预热到 25℃, 用微量移液器取 150 μL 提取液于各孔中, 28℃ 恒温培养, 连续培养 240 h, 每隔 12 h 用 ELISA 反应平板读数器读取波长 590 nm 处吸光值 1 次。

### 1.4 数据分析

#### 1.4.1 Biolog Eco 微平板平均吸光值

Biolog Eco 微平板极孔平均吸光值计算式为

$$T_{AWCD} = \sum (C - R) / N$$

式中 C——各反应孔的吸光值

R——对照孔吸光值

N——碳源数, 取 31

6 类碳源利用率的平均吸光值的计算式为<sup>[8]</sup>

$$T_{AWCD} = \sum (C_i - R) / n$$

式中 C<sub>i</sub>——某类碳源第 i 反应孔的吸光值

n——某类碳源所含的碳源个数

#### 1.4.2 多样性指数分析及聚类分析

采用香农系数 H' 和丰富度指数 S 来表征微生物群落代谢多样性。丰富度指数 S 为被利用的碳源总数, 为每孔中 (C - R) 的值大于 0.25 的孔数<sup>[9]</sup>;

$$H' = - \sum (P_i \ln P_i), P_i \text{ 为有培养基的反应孔与对照孔的吸光值差与整板总差的比值, 即 } P_i = (C - R) / \sum (C - R)^{[10]}$$

将每孔的吸光值除以相应的  $R_{A_{WCD}}$  后进行聚类分析。采用 Excel 结合 SPSS 15.0 处理所有的数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 低含量 Pb 对冬小麦幼苗根际土壤微生物区系的影响

由表 2 可知, 与对照相比, 幼苗生长 3 周和 7 周时, 不同含量 Pb 极显著 ( $p < 0.01$ ) 抑制根际细菌增殖, 平均抑制率分别为 16.25% 和 8.62%, 但幼苗生长 12 周时, 除 Pb 含量 50 mg/kg 干土外, 其他 Pb 处理下细菌数量均较对照极显著 ( $p < 0.01$ ) 增加, 平

均增加率为 57.09%; 幼苗生长 3 周、7 周和 12 周时, 与对照相比, 低含量 Pb 极显著 ( $p < 0.01$ ) 抑制真菌增殖, 且平均抑制率分别为 34.08%、39.89% 和 17.49%; 幼苗生长 3 周时, 与对照相比, 低含量 Pb 极显著 ( $p < 0.01$ ) 促进放线菌增值, 且平均促进率为 265.07%, 幼苗生长 7 周和 12 周时, 与对照相比, 低含量 Pb 极显著 ( $p < 0.01$ ) 抑制放线菌增殖, 平均抑制率分别为 27.64% 和 20.49%; 幼苗生长 3 周和 12 周时, 低含量 Pb 处理下微生物总数均较对照极显著 ( $p < 0.01$ ) 增加, 而 7 周时较对照极显著 ( $p < 0.01$ ) 降低, 这可能与幼苗在不同生长阶段其根系分泌物种类和含量等的不同有关。冬小麦幼苗生长的 3 个时期, 低含量 Pb 处理下细菌和放线菌均是根际主要微生物种群; 此外, 在幼苗生长 3 个时间段, 低含量 Pb 处理下真菌/细菌比值均较对照明显降低。

表 2 不同含量 Pb 处理时冬小麦根际土壤微生物数量

Tab. 2 Number of rhizosphere microbial under different Pb treatments

处理时间	微生物种类	处理				
		CK	T1	T2	T3	T4
3 周	细菌/g	$(3.80 \pm 0.01) \times 10^{7A}$	$(3.52 \pm 0.91) \times 10^{7B}$	$(3.42 \pm 0.91) \times 10^{7C}$	$(3.03 \pm 1.00) \times 10^{7D}$	$(2.76 \pm 0.22) \times 10^{7E}$
	真菌/g	$(1.79 \pm 0.10) \times 10^{5A}$	$(1.59 \pm 0.11) \times 10^{5B}$	$(1.00 \pm 0.02) \times 10^{5C}$	$(1.25 \pm 0.10) \times 10^{5D}$	$(0.88 \pm 0.03) \times 10^{5E}$
	放线菌/g	$(0.73 \pm 0.02) \times 10^{7A}$	$(3.16 \pm 1.00) \times 10^{7B}$	$(2.70 \pm 0.82) \times 10^{7C}$	$(2.63 \pm 0.19) \times 10^{7D}$	$(2.17 \pm 0.96) \times 10^{7E}$
	总数/g	$(4.54 \pm 0.14) \times 10^{7A}$	$(6.70 \pm 2.02) \times 10^{7B}$	$(6.12 \pm 1.75) \times 10^{7C}$	$(5.67 \pm 1.29) \times 10^{7D}$	$(4.94 \pm 1.21) \times 10^{7E}$
	真菌、细菌比/%	0.47	0.45	0.29	0.41	0.32
7 周	细菌/g	$(2.56 \pm 0.17) \times 10^{7A}$	$(2.24 \pm 0.57) \times 10^{7B}$	$(2.46 \pm 0.52) \times 10^{7C}$	$(2.14 \pm 0.20) \times 10^{7D}$	$(2.51 \pm 0.22) \times 10^{7E}$
	真菌/g	$(4.55 \pm 0.53) \times 10^{5A}$	$(2.90 \pm 0.22) \times 10^{5B}$	$(2.95 \pm 0.86) \times 10^{5C}$	$(2.62 \pm 0.22) \times 10^{5D}$	$(2.47 \pm 0.82) \times 10^{5E}$
	放线菌/g	$(2.94 \pm 0.43) \times 10^{7A}$	$(2.01 \pm 0.35) \times 10^{7B}$	$(2.57 \pm 0.42) \times 10^{7C}$	$(1.98 \pm 0.31) \times 10^{7D}$	$(1.95 \pm 0.43) \times 10^{7E}$
	总数/g	$(5.51 \pm 1.13) \times 10^{7A}$	$(4.26 \pm 1.14) \times 10^{7B}$	$(5.03 \pm 1.80) \times 10^{7C}$	$(4.13 \pm 0.73) \times 10^{7D}$	$(4.46 \pm 1.27) \times 10^{7E}$
	真菌、细菌比/%	0.18	0.13	0.12	0.12	0.01
12 周	细菌/g	$(0.74 \pm 0.02) \times 10^{7A}$	$(0.75 \pm 0.02) \times 10^{7A}$	$(0.95 \pm 0.09) \times 10^{7B}$	$(1.03 \pm 0.02) \times 10^{7B}$	$(1.92 \pm 0.87) \times 10^{7C}$
	真菌/g	$(1.55 \pm 0.09) \times 10^{5A}$	$(1.44 \pm 0.05) \times 10^{5AB}$	$(1.32 \pm 0.09) \times 10^{5B}$	$(1.35 \pm 0.09) \times 10^{5B}$	$(1.01 \pm 0.10) \times 10^{5C}$
	放线菌/g	$(1.31 \pm 0.21) \times 10^{7A}$	$(1.32 \pm 0.11) \times 10^{7B}$	$(0.62 \pm 1.22) \times 10^{7C}$	$(1.02 \pm 0.12) \times 10^{7D}$	$(1.20 \pm 0.43) \times 10^{7E}$
	总数/g	$(8.74 \pm 0.41) \times 10^{7A}$	$(8.79 \pm 0.23) \times 10^{7B}$	$(10.14 \pm 1.40) \times 10^{7C}$	$(11.37 \pm 0.22) \times 10^{7C}$	$(20.45 \pm 1.83) \times 10^{7D}$
	真菌、细菌比/%	0.21	0.19	0.14	0.13	0.05

注: 同行不同大写字母表示 0.01 水平差异显著。

由表 3 可知, 幼苗生长 3 周时, 根际细菌和真菌数量与 Pb 含量表现为极显著 ( $p < 0.01$ ) 负相关; 幼苗生长 7 周时, 真菌、放线菌和微生物总数与 Pb 含量亦表现为显著负相关。

上述结果表明, 土壤低含量 Pb ( $< 300$  mg/kg 干土) 显著影响冬小麦幼苗根际微生物数量特征, 而 Pb 含量与微生物数量的相关性特征也证明了这点; 此外, 真菌、细菌比的降低表明低含量 Pb 会影响冬小麦幼苗根际微生物生态系统的稳定性。

表 3 Pb 含量与根际微生物数量的相关性

Tab. 3 Pearson correlation coefficient between Pb content and rhizosphere microorganisms number

微生物种类	3 周	7 周	12 周
细菌	-0.98 **	-0.18	0.36
真菌	-0.89 **	-0.83 **	-0.79
放线菌	0.38	-0.69 **	-0.31
微生物	-0.06	-0.59 *	0.36

注: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ 。

## 2.2 低含量 Pb 处理对冬小麦幼苗根际土壤微生物功能多样性的影响

### 2.2.1 对微生物碳源利用率 AWCD 的影响

AWCD 表征微生物群落对碳源的利用率,反映了微生物活性及群落生理功能多样性,由图 1 可知,与对照相比,冬小麦幼苗生长 3 周和 7 周时,除 Pb

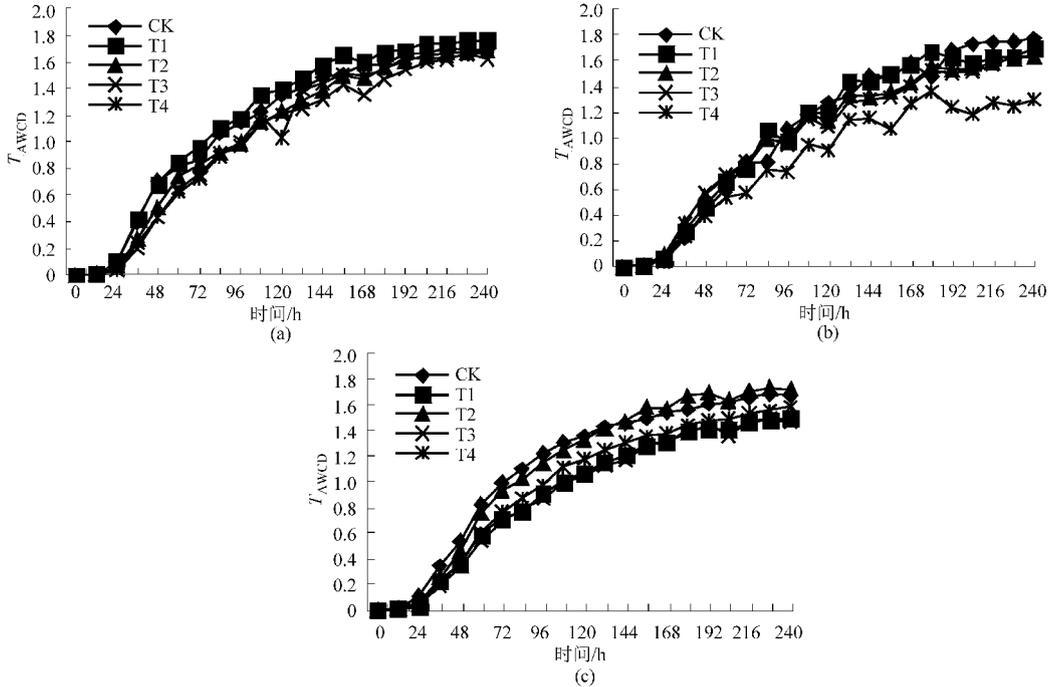


图 1 不同 Pb 处理下冬小麦幼苗根际土壤微生物群落 AWCD 值随培养时间的变化

Fig. 1 AWCD values of rhizosphere microorganism under low Pb content

(a) 3 周 (b) 7 周 (c) 12 周

### 2.2.2 微生物对 6 类碳源的利用率

由表 4 可知,冬小麦幼苗生长 3 周和 7 周时,低含量 Pb 处理下根际微生物对 6 类碳源的利用顺序与对照明显不同,且对同一碳源的利用率差异显著,且与对照相比,低含量 Pb 还增强了根际微生物对酚类的利用率,降低了对氨基酸、聚合物和胺类的利用率;幼苗生长 12 周时,低含量 Pb 处理下根际微生物对羧酸、氨基酸、聚合物、酚类和胺类的利用率均较对照显著降低。表明土壤低含量 Pb 会影响冬小麦幼苗根际微生物群落结构特征,而微生物群落结构的变化会进一步影响幼苗根系对养分的吸收利用。

### 2.2.3 根际微生物多样性指数及聚类分析

香农系数基于物种数量反映群落多样性,群落中生物种类增多代表了群落的复杂程度增高,即香农系数愈大,群落所含的信息量愈大,而丰富度指数可反映出群落或环境中物种数目的多少,由表 5 可知,在幼苗生长各时期,低含量 Pb 处理下香农系数和丰富度指数均显著降低,表明低含量 Pb 条件下,冬小麦幼苗根际微生物群落多样性会减少。

对不同处理进行吸光度聚类分析,结果(图 2)

含量 50 mg/kg 干土外,其他 Pb 处理抑制根际土壤微生物对碳源的利用能力;幼苗生长 12 周时,所有低含量 Pb 均表现为显著抑制微生物利用碳源的能力,表明随着冬小麦幼苗生长时间的延长,Pb 含量 50 mg/kg 的干土也表现出抑制其根际微生物对碳源的利用能力。

表明:幼苗生长 3 周时,T1 和 CK 聚为一类,表明 Pb 含量 50 mg/kg 对根际微生物群落影响较小,而 T2 和 T3 聚为一类,T4 单独聚为一类,表明随着 Pb 含量升高,根际微生物群落受影响显著;幼苗生长 7 周时,对照单独聚为一类,不同含量 Pb 聚为一类,表明随着幼苗生长时间的延长,其根际微生物群落受低含量 Pb 的影响增强;幼苗生长 12 周时,T1 和 CK 又聚为一类,而其他 Pb 处理聚为一类,表明随着生长时间延长,高于 50 mg/kg 而又低于 300 mg/kg 的 Pb 对根际微生物群落影响显著。

## 3 讨论

根际微生物是根际土壤养分循环的动力,能灵敏反映环境因子和生态功能等的变化<sup>[11]</sup>,低含量 Pb 对冬小麦幼苗根际微生物群落影响显著,而各类群微生物数量与 Pb 含量的显著相关性、微生物群落 AWCD 值的变化、对碳源的利用特征以及聚类分析结果等进一步证明了这点。低含量 Pb 对冬小麦根际微生物群落的影响特征可能与幼苗根系分泌物的定性和定量变化有关,如有研究发现,镉胁迫下小麦

表4 根际微生物对6类碳源的利用率(吸光值)

Tab.4 Utilization ratio of six carbon sources by rhizosphere microorganism (absorbance)

生长时间	处理	碳水化合物	羧酸	氨基酸	聚合物	酚类	胺类
3周	CK	1.29 ± 0.07 <sup>A</sup>	1.45 ± 0.05 <sup>A</sup>	1.00 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.93 ± 0.04 <sup>A</sup>	0.80 ± 0.03 <sup>A</sup>	1.21 ± 0.03 <sup>Aa</sup>
	T1	1.40 ± 0.01 <sup>B</sup>	1.53 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	0.98 ± 0.04	0.97 ± 0.04 <sup>A</sup>	0.97 ± 0.05 <sup>B</sup>	0.97 ± 0.05 <sup>B</sup>
	T2	1.14 ± 0.02 <sup>C</sup>	1.45 ± 0.04 <sup>Ab</sup>	0.95 ± 0.07	0.73 ± 0.06 <sup>B</sup>	0.85 ± 0.03 <sup>Aa</sup>	1.35 ± 0.03 <sup>C</sup>
	T3	1.19 ± 0.03 <sup>C</sup>	1.20 ± 0.05 <sup>B</sup>	0.90 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.87 ± 0.02 <sup>AC</sup>	0.83 ± 0.03 <sup>A</sup>	1.16 ± 0.03 <sup>Ab</sup>
	T4	1.18 ± 0.01 <sup>C</sup>	1.39 ± 0.06 <sup>A</sup>	0.94 ± 0.03	0.80 ± 0.02 <sup>C</sup>	0.91 ± 0.02 <sup>Bb</sup>	1.24 ± 0.01 <sup>AD</sup>
7周	CK	1.28 ± 0.14 <sup>a</sup>	1.34 ± 0.13 <sup>A</sup>	0.84 ± 0.09 <sup>Aa</sup>	0.79 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.84 ± 0.04 <sup>a</sup>	1.30 ± 0.16 <sup>A</sup>
	T1	1.03 ± 0.17 <sup>b</sup>	1.13 ± 0.03 <sup>Aa</sup>	0.58 ± 0.09 <sup>Bb</sup>	0.63 ± 0.07 <sup>Ab</sup>	0.63 ± 0.08 <sup>Ab</sup>	0.58 ± 0.05 <sup>B</sup>
	T2	1.20 ± 0.12	1.88 ± 0.18 <sup>B</sup>	0.82 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	0.81 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.80 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.89 ± 0.09 <sup>Ca</sup>
	T3	1.18 ± 0.12	1.36 ± 0.15 <sup>Aa</sup>	0.69 ± 0.05 <sup>c</sup>	0.91 ± 0.08 <sup>B</sup>	0.83 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.12 ± 0.09 <sup>Cb</sup>
	T4	1.30 ± 0.14 <sup>a</sup>	1.40 ± 0.16 <sup>Ab</sup>	0.77 ± 0.11 <sup>Bc</sup>	0.86 ± 0.09 <sup>B</sup>	0.91 ± 0.11 <sup>B</sup>	0.95 ± 0.10 <sup>C</sup>
12周	CK	1.16 ± 0.02 <sup>Aa</sup>	1.46 ± 0.01 <sup>Aa</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>Aa</sup>	1.04 ± 0.02 <sup>A</sup>	0.87 ± 0.02 <sup>A</sup>	1.20 ± 0.03 <sup>A</sup>
	T1	1.09 ± 0.01 <sup>Ab</sup>	1.08 ± 0.04 <sup>B</sup>	0.78 ± 0.05 <sup>Ab</sup>	0.78 ± 0.02 <sup>B</sup>	0.87 ± 0.01 <sup>B</sup>	0.92 ± 0.034 <sup>B</sup>
	T2	1.51 ± 0.01 <sup>B</sup>	1.25 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.71 ± 0.03 <sup>B</sup>	1.20 ± 0.06 <sup>B</sup>	0.90 ± 0.03 <sup>A</sup>	1.08 ± 0.03 <sup>B</sup>
	T3	1.17 ± 0.05 <sup>Aa</sup>	1.06 ± 0.05 <sup>C</sup>	0.59 ± 0.02 <sup>C</sup>	0.82 ± 0.05 <sup>C</sup>	0.86 ± 0.05 <sup>A</sup>	0.85 ± 0.04 <sup>C</sup>
	T4	1.19 ± 0.06 <sup>A</sup>	1.16 ± 0.04 <sup>D</sup>	0.82 ± 0.05 <sup>Ac</sup>	0.96 ± 0.04 <sup>D</sup>	0.77 ± 0.03 <sup>C</sup>	0.84 ± 0.06 <sup>C</sup>

注:同一生长时间下同列不同大写字母表示0.01水平显著,不同小写字母表示0.05水平显著。

表5 根际微生物多样性指数

Tab.5 Diversity index of rhizosphere microorganisms

多样性指数	处理	生长时间/周			多样性指数	处理	生长时间/周		
		3	7	12			3	7	12
香农系数	CK	3.32 ± 0.03 <sup>A</sup>	3.29 ± 0.01 <sup>A</sup>	3.31 ± 0.02 <sup>A</sup>	丰富度指数	CK	21.67 ± 0.33 <sup>A</sup>	29.67 ± 0.33 <sup>Aa</sup>	26.67 ± 0.33 <sup>Aa</sup>
	T1	3.23 ± 0.02 <sup>B</sup>	3.19 ± 0.02 <sup>Ba</sup>	3.29 ± 0.03 <sup>A</sup>		T1	21.33 ± 0.67 <sup>a</sup>	27.33 ± 0.67 <sup>Bb</sup>	22.67 ± 0.33 <sup>B</sup>
	T2	3.21 ± 0.03 <sup>B</sup>	3.26 ± 0.01 <sup>A</sup>	3.30 ± 0.04 <sup>A</sup>		T2	20.33 ± 0.67 <sup>Bb</sup>	28.33 ± 0.67 <sup>Bc</sup>	24.33 ± 0.67 <sup>C</sup>
	T3	3.20 ± 0.03 <sup>B</sup>	3.25 ± 0.05 <sup>b</sup>	3.29 ± 0.03 <sup>A</sup>		T3	19.67 ± 0.33 <sup>Bb</sup>	26.67 ± 0.33 <sup>C</sup>	25.67 ± 0.33 <sup>Ab</sup>
	T4	3.22 ± 0.02 <sup>B</sup>	3.28 ± 0.03 <sup>A</sup>	3.11 ± 0.03 <sup>B</sup>		T4	18.67 ± 0.33 <sup>Cc</sup>	28.67 ± 0.33 <sup>BD</sup>	21.00 ± 0.00 <sup>D</sup>

注:同列不同大写字母表示0.01水平显著,不同小写字母表示0.05水平显著。

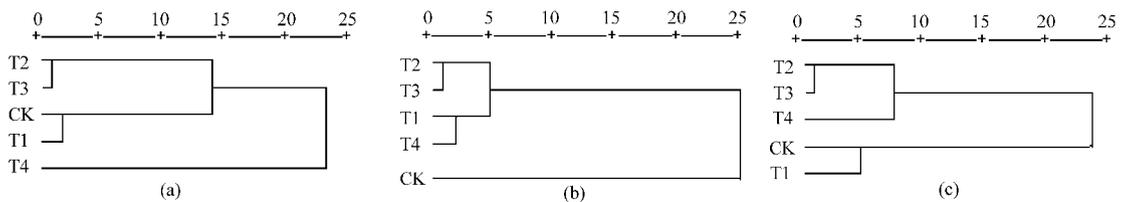


图2 不同处理下31种碳源吸光值聚类分析

Fig.2 Cluster diagram of absorbance under different treatments

(a) 3周 (b) 7周 (c) 12周

根系分泌物会发生相应的改变<sup>[12]</sup>,而根系分泌物是影响根际微生物活性和群落结构的主要因素<sup>[13-14]</sup>,其中碳水化合物及氨基酸类会以碳源和氮源的形式刺激微生物增殖,酚类化合物可能以化感作用的方式抑制其增殖,而小麦生长不同阶段,根系分泌物可能会发生定性和定量变化,因此,在幼苗生长各时期,低含量Pb对根际微生物各类群数量表现出显著抑制或增加效应,进一步引起微生物代谢功能多样性的改变;此外,有研究发现Pb会刺激欧丁香(*Syringa vulgaris*)根系伸长、根系生物量增加及须根形成等作用<sup>[15]</sup>,这种现象可能冬小麦也会发生,

这也是其根际微生物数量及群落结构发生变化的可能原因;此外,低含量Pb对微生物群落的直接影响亦不可避免。真菌、细菌比可反映真菌和细菌相对含量的变化<sup>[16]</sup>和两个种群的相对丰富程度,比值越高表明农田土壤生态系统越稳定<sup>[17]</sup>,而低含量Pb条件下,真菌、细菌之比对照下降表明低含量Pb可能会影响冬小麦幼苗根际土壤生态系统的稳定性,从而会引起苗期根系生长受到营养不良的危险,最终可影响到小麦的生产量和品质状况。

土壤低含量Pb (<300 mg/kg 干土)会显著影

响冬小麦幼苗根际土壤微生物数量及群落结构特征,尽管大量研究表明土壤低含量 Pb 对大多数植物无毒<sup>[2, 18~19]</sup>,但本研究表明低含量 Pb 对冬小麦幼苗根际土壤微生物群落影响显著,可能会进一步影响其根际土壤生态系统功能,从而会影响幼苗根系生长发育。因此,制定土壤环境质量关于重金属限量值时应该考虑土壤生态功能所能承载的最大污染量和最小污染量,这对于土壤环境质量保护及维持良好的农田土壤生态系统和土壤可持续生产力具有重要意义。

## 4 结论

(1) 土壤低含量 Pb (<300 mg/kg 干土)对冬小麦幼苗根际土壤微生物数量影响显著,且真菌/细菌比值显著降低,细菌、真菌、放线菌和微生物总数与土壤 Pb 含量相关性显著。

(2) 土壤 Pb 含量低于 300 mg/kg 干土时,显著影响冬小麦幼苗根际微生物群落功能多样性,表现为微生物碳源利用率降低及碳源利用多样性减少,明显影响幼苗根际土壤微生物群落结构特征。

## 参 考 文 献

- 1 罗虹,刘鹏,徐根娣,等. 铝对荞麦和金荞麦根际土壤微生物及酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2381~2386.  
Luo Hong, Liu Peng, Xu Gendi, et al. Effects of Al stress on the microflora and enzyme activities of buckwheat and gold buckwheat rhizosphere soil[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2381~2386. (in Chinese)
- 2 张新慧,王霞霞,张恩和. 2,4-二叔丁基苯酚对啤酒花根际土壤微生物数量的化感效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1606~1608.  
Zhang Xinhui, Wang Xiaxia, Zhang En'he. Allelopathic effect of phenol 2,4-bis (1,1-dimethylethyl) on microorganism of *Hamulus lupulus* L. (hops) rhizospheric soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1606~1608. (in Chinese)
- 3 赵菲佚,翟禄新,陈荃,等. Cd、Pb 复合处理下 2 种离子在植物体内的分布及其对植物生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 595~601.  
Zhao Feiyi, Zhai Luxin, Chen Quan, et al. Effect under combied treatment of cadmium and lead on their distribution of plants and physiological indications[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2002, 22(3): 595~601. (in Chinese)
- 4 杜天庆,杨锦忠,郝建平,等. 小麦不同生育时期 Cd、Cr、Pb 污染监测指标体系[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1845~1852.  
Du Tianqing, Yang Jingzhong, Hao Jianping, et al. The pollution montitoring index system of wheat at different growth stages under the stress of Cd, Cr and Pb[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1845~1852. (in Chinese)
- 5 庞欣,王东红,彭安. 铅胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(5): 108~111.  
Pang Xin, Wang Donghong, Peng An. Effect of lead stress on the activity of antioxidant enzymes in wheat seedling[J]. Environmental Science, 2001, 22(5): 108~111. (in Chinese)
- 6 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 7 Yang Q X, Zhang J, Zhu K F, et al. Influence of oxytetracycline on the structure and activity of microbial community in wheat rhizosphere soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(7): 954~959.
- 8 孙凤霞,张伟华,徐明岗,等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2792~2798.
- 9 Rogers B F, Tate III R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(10): 1389~1401.
- 10 邵元元,王志英,邹莉,等. 百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 819~829.  
Shao Yuanyuan, Wang Zhiying, Zou Li, et al. Effects of chlorothalonil on soil microbial communities of *Larix* artificial shelter-forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 819~829. (in Chinese)
- 11 李鹏,李占斌,薛蕙,等. 干热河谷地区不同土地利用方式土壤微生物量及其活性分异特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(增刊1): 130~138.  
Li Peng, Li Zhanbin, Xue Sha, et al. Soil microbial biomass and its differentiation characteristic under different land use in dry-hot valley [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(Supp.1): 130~138. (in Chinese)
- 12 张玲,王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物的变化[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 496~502.
- 13 Baudoin E, Benizri E, Guckert A. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(9): 1183~1192.
- 14 Kumpiene J, Guerri G, Landi L, et al. Microbial biomass, respiration and enzyme activities after in situ aided phytostabilization of a Pb-and Cu-contaminated soil [J]. Ecotoxicology and Environment Safe, 2009, 72(1): 115~119.
- 15 Wierzbicka M, Panufnik D. The adaptation of *Silene vulgaris* to growth on a calamine waste heap (S. Poland)[J]. Environmental Pollution, 1998, 101(1): 415~426.
- 16 Veries F T, Hoffland E, Eekeren N V, et al. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(2): 209~210.

软件中的自动组网图标,就可实现自动组网并装载相应的配置,实现数据通信功能。

(2)无线信号覆盖范围广。由于采用了适于冷链环境的通信频率,并选择了业界最低功耗的无线收发芯片,系统可以在极低功耗下,实现较远的无线传输,保障了车厢内充满货物状态下的无线收发。

(3)防冲突能力强。冷链运输中的自组网络与

其他应用的自组网络应用环境有较大区别,本设计的自组网络采用了64个信道,信道数量远远大于其他自组网络,大大降低了移动中的聚集车辆多个自组网络间通信的互相干扰。

(4)温湿度采集模块功耗超低。1 min采集周期下,高精度温湿度测量模块功耗在200  $\mu\text{A}$ 左右;一般精度下,功耗小于100  $\mu\text{A}$ 。

### 参 考 文 献

- 何明珂. 冷链系统基础结构评价指标体系研究[J]. 北京商学院学报, 2001, 16(2): 46~50.  
He Mingke. Evaluation index system of cold chain system infrastructure institutions [J]. Journal of Beijing Institute of Business, 2001, 16(2): 46~50. (in Chinese)
- 史良. 基于GPS/RFID的冷链运输车辆监控系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
Shi Liang. Design of cold chain vehicle monitor system based on GPS/RFID [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- 季力. 基于SimpliciTI协议的无线传感器网络设计[J]. 工矿自动化, 2012, 38(1): 26~30.  
Ji Li. Design of wireless sensor network based on simpliciTI protocol [J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(1): 26~30. (in Chinese)
- 张彪, 胡慧, 孙程光. 基于MSP430F2274的无线数据采集节点的设计[J]. 传感器世界, 2009, 15(1): 28~33.  
Zhang Biao, Hu Hui, Sun Chengguang. Design of wireless sensor networks based on MSP430F2274 [J]. Sensor World Magazine, 2009, 15(1): 28~33. (in Chinese)
- 王风云, 赵一民, 张晓艳, 等. 基于分段控制策略的温室智能测控系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 178~181.  
Wang Fengyun, Zhao Yimin, Zhang Xiaoyan, et al. Intelligent measure-control system design based on sectional-control strategy in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 178~181. (in Chinese)
- 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息检测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181~185.  
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181~185. (in Chinese)
- 武永胜, 王伟, 沈昱明. 基于ZigBee技术的无线传感器网络组网设计[J]. 电子测量技术, 2009, 32(11): 121~124.  
Wu Yongsheng, Wang Wei, Shen Yuming. Design of wireless sensor networks based on ZigBee [J]. Journal of Electronic Measurement Technology, 2009, 32(11): 121~124. (in Chinese)
- 张新荣, 徐保国. 基于CC2430的水产养殖环境信息检测系统设计[J]. 渔业现代化, 2011, 38(2): 17~20, 26.  
Zhang Xinrong, Xu Baoguo. Based on the CC2430 the aquaculture environmental information detection system design [J]. Fishery Modernization, 2011, 38(2): 17~20, 26. (in Chinese)
- 吕芮栋, 张志文. 以MSP430F149为核心的温度检测仪的硬件模块和软件设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(1): 199~201.  
Lü Ruidong, Zhang Zhiwen. Hardware module and software design of temperature measuring instrument based on MSP430F149 [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(1): 199~201. (in Chinese)
- 唐宏, 谢静. 无线传感器网络原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- 张杰, 涂巧玲, 杨文刚. 传感器网络节点通信模块的低功耗研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 28~33.  
Zhang Jie, Tu Qiaoling, Yang Wengang. Research on low power consuming communication modules of sensor networks nodes [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 28~33. (in Chinese)
- 李莉, 张彦娥, 汪懋华, 等. 现代通信技术在温室中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 195~200.  
Li Li, Zhang Yan'e, Wang Maohua, et al. Communication technology for sustainable greenhouse production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2): 195~200. (in Chinese)

(上接第108页)

- 贾夏, 周春娟, 董岁明.  $\text{Pb}^{2+}/\text{Cd}^{2+}$ 处理对冬小麦幼苗根际微生物种群数量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(4): 443~448.  
Jia Xia, Zhou Chunjuan, Dong Suiming. Effects of  $\text{Pb}^{2+}/\text{Cd}^{2+}$  on the number of microorganisms in the rhizosphere of winter wheat seedlings [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(4): 443~448. (in Chinese)
- Malkowski E, Kita A, Galas W, et al. Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium [J]. Plant Growth Regulation, 2002, 37(1): 69~76.
- 杜文勇, 何雄奎, 胡振方, 等. 不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 170~174.  
Du Wen Yong, He Xiongkui, Hu Zhenfang, et al. Effect of different irrigation technology on production of winter wheat [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 170~174. (in Chinese)