

铅对小白菜根际微生物群落与其生理功能的影响*

付为国¹ 王凡坤¹ 李萍萍² 汤涓涓¹

(1. 江苏大学江苏省农业装备与智能化高新技术研究重点实验室, 镇江 212013;
2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 通过不同铅浓度下小白菜根际土壤微生物数量、硝化和反硝化速率及呼吸速率等特征的研究,揭示铅污染对植物根际微生态系统生态安全性的影响。结果表明,随着铅浓度的增加,细菌、真菌和放线菌数量均呈现先升后降的变化趋势,峰值所对应的铅浓度分别为 300、300 和 600 mg/kg,3 种微生物的耐铅能力为真菌 > 放线菌 > 细菌。土壤硝化和反硝化细菌数、硝化和反硝化速率及呼吸速率也随着铅浓度的增加先升后降,各指标峰值所对应的铅浓度均为 300 mg/kg;硝化速率与硝化细菌数、反硝化速率与反硝化细菌数及土壤呼吸速率与微生物总数决定系数分别为 0.684 7、0.851 1 和 0.684 3,均显著正相关。研究发现,当土壤铅浓度达到或超过 1 200 mg/kg 时,小白菜根际微生态系统出现显著的微生物群落结构和功能退化。

关键词: 小白菜 微生物 铅胁迫 硝化 反硝化 呼吸速率

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0203-06

引言

随着生活水平的提高和膳食结构的改变,人们对蔬菜的需求急剧增加。鉴于市场便利和价格等因素,蔬菜种植区域大多分布在城市周边的郊区^[1]。然而,这一区域土壤铅污染尤为严重,土壤表层铅浓度常高达 8 000 mg/kg^[2-3],使得蔬菜产品铅浓度严重超标时有发生,由此引发的食品安全问题已引起了社会的强烈关注^[4],有关城郊菜地土壤铅污染状况、蔬菜产品的铅浓度及其健康安全评价的研究也正在被陆续报道^[5-7]。

小白菜(*Brassica chinensis* L.)因具有清脆可口、营养丰富、四季皆可种植等优点,已成为我国栽培最为广泛的蔬菜品种之一。目前,研究人员已就不同浓度(中等浓度:≤500 mg/kg;高浓度:≤2 000 mg/kg)铅胁迫对小白菜生长生理特性和铅积累过程作了全面而又系统的研究^[8-10],但对不同程度的铅胁迫环境下小白菜根际微生物群落特征和土壤硝化、反硝化及呼吸速率等微生态系统的结构和功能的研究较少。

根际作为土壤-植物生态系统物质交换的活跃界面,是植物-土壤-微生物三者互作的场所^[11],其微生物种群特征不仅可反映根际土壤养分循环转化和呼吸状况,而且还能较植物更敏感地反映土壤污

染状况^[12-13]。本文将通过中高浓度的铅添加处理(铅添加浓度≤1 500 mg/kg),模拟铅污染较为严重的城郊菜地土壤,研究其对小白菜根际微生物群落结构、土壤硝化和反硝化、以及呼吸作用等功能的影响,进而从根际微生物的结构和功能角度,揭示城市郊区蔬菜生长中根际微生态系统所面临的生态安全问题。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验于 2012 年 11 月—2013 年 4 月在江苏大学农业工程研究院大棚内进行。小白菜品种为浙江剑锋种子有限公司提供的上海青,该品种为长三角地区主要栽培品种。供试土壤取自棚内栽培土,其主要理化指标含量为:速效 P 为 38.52 mg/kg,速效 K 为 76 mg/kg,速效 N 为 585.82 mg/kg,pH 值为 6.8,Pb 为 35.6 mg/kg。栽培盆选用上、下口径分别为 20、15 cm,高为 15 cm 的塑料盆,每盆盛土 2 kg(干质量)。

1.2 试验设计

试验设计 5 个铅浓度添加处理(土壤干质量比),浓度分别为 300、600、900、1 200 和 1 500 mg/kg,记为处理 T300、T600、T900、T1200 和 T1500,添加铅源为 Pb(NO₃)₂。另设无铅浓度添加处理 T0 为对照,

收稿日期: 2014-06-25 修回日期: 2014-07-27

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD08B04)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介: 付为国,副研究员,博士,主要从事农业生物环境研究,E-mail: fuweiguo@ujs.edu.cn

共 6 个处理,3 次重复。10 月初,按照不同铅浓度处理将铅添加至栽培盆中,与土壤充分混匀后静置稳定。11 月初,将供试小白菜种子播种于不同处理的盆中,出苗后每盆定苗一株,试验过程中保持盆中土壤相对持水量为 60% 左右,次年 4 月初收获。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤中微生物数量测定方法

于小白菜收获时,自每株根部采集根际土样 10 g,分别溶于 90 mL 无菌水中,震荡 10 min 使土样分散均匀,用无菌枪吸取 1~9 mL 无菌水,依次按 10 倍稀释法稀释至 10^{-8} ,用以测定各类微生物的数量。

细菌、真菌和放线菌均采用稀释平板法测定,接种悬浮液稀释度分别为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 、 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 和 $10^{-4} \sim 10^{-2}$,培养基分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、高氏一号培养基和马丁氏 (Martin) 培养基,接种后分别置于培养箱内,于 30℃ 培养 1~2 d (细菌)、28℃ 培养 3~5 d (真菌)、28℃ 培养 5~7 d (放线菌) 后,按“单位质量干土中菌数等于菌落平均数与稀释倍数的乘积除以干土所占百分比”计算以上各微生物数量^[14]。

硝化细菌和反硝化细菌采用最大或然数 (MPN) 稀释法测定,接种悬浮液稀释度分别为 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 、和 $10^{-8} \sim 10^{-4}$,硝化细菌培养基采用改良的斯蒂芬森 (Stephenson) 培养基。接种后分别置于培养箱内 25~28℃ 培养 14 d 后,按“单位质量干土中菌数等

于近似值与数量指标第一位数的稀释倍数的乘积除以干土所占百分比”计算以上各微生物数量^[14]。

1.3.2 土壤呼吸速率和硝化、反硝化速率的测定

在测定土壤微生物的同时,测定不同铅浓度处理下的小白菜根际土壤的硝化、反硝化速率和呼吸速率。测量采用气压过程分离法 (Barometric process separation, BaPS),测量时输入土样湿质量、含水率和 pH 值等参数,系统计算参数 N_xO_y 为 2.33,自养/异养硝化比例为 0.75,呼吸熵为 1。恒温水浴确保密封室温度为 25℃,启动测定系统连续测定 8 h,系统将根据线性回归分析自动计算出干土的硝化速率 (Nit)、反硝化速率 (Den) 和呼吸速率 (Res)^[15]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 13.0 统计分析软件,分析比较不同处理间根际微生物数量、硝化、反硝化速率和土壤呼吸速率的差异及其相关性。

2 结果与讨论

2.1 铅对小白菜根际土壤微生物数量的影响

土壤细菌、真菌和放线菌是土壤生态系统最重要的 3 大微生物,其组成和数量的变化是表征土壤环境质量最为重要的生物学指标。不同处理下小白菜根际细菌、真菌和放线菌数量的测算结果如表 1 所示。

表 1 不同铅处理下小白菜根际土壤微生物的数量
Tab.1 Number of rhizosphere microorganism under different Pb treatments

处理	细菌/ ($\times 10^7 g^{-1}$)	增减百分比/ %	真菌/ ($\times 10^4 g^{-1}$)	增减百分比/ %	放线菌/ ($\times 10^6 g^{-1}$)	增减百分比/ %	总菌数/ ($\times 10^7 g^{-1}$)	增减百分比/ %
T0	1.65 ± 0.07 ^b	0	2.30 ± 0.09 ^b	0	4.47 ± 0.13 ^c	0	2.10 ^b	0
T300	1.86 ± 0.10 ^a	12.7	3.65 ± 0.07 ^a	58.7	4.72 ± 0.10 ^b	5.6	2.34 ^a	11.4
T600	1.84 ± 0.10 ^a	11.5	3.50 ± 0.06 ^a	52.2	4.90 ± 0.13 ^a	9.7	2.33 ^a	11.0
T900	1.20 ± 0.06 ^c	-27.2	2.39 ± 0.13 ^b	3.9	3.82 ± 0.08 ^d	-14.5	1.61 ^c	-23.3
T1200	1.09 ± 0.10 ^{cd}	-33.9	2.49 ± 0.06 ^b	8.2	3.21 ± 0.10 ^e	-28.2	1.41 ^{cd}	-32.9
T1500	1.08 ± 0.40 ^d	-34.5	1.49 ± 0.13 ^c	-35.2	2.99 ± 0.12 ^f	-33.1	1.38 ^d	-34.3

注:微生物数量表示为“均值 ± 标准误差”,同列均值后的不同小写字母表示在 5% 水平下差异显著,下同。

由表 1 可看出,不同处理小白菜根际微生物数量均以细菌最多、放线菌次之、真菌最少,这符合土壤微生物固有的组成特点,说明一定量的铅浓度添加并未改变土壤中主要菌类在数量上多寡的构成。

随着铅浓度的增加,小白菜根际细菌、真菌、放线菌以及各类菌的总数均呈先升后降的变化趋势,但各类菌的升降幅度和升降拐点所对应的铅浓度范围却不相同。

300 和 600 mg/kg 的铅浓度添加处理可促进根际中细菌数量和放线菌数量显著增加,其中,

300 mg/kg 处理对细菌数量增加的促进效应更明显,600 mg/kg 处理对放线菌数量增加的促进效应更明显;而大于等于 900 mg/kg 的铅浓度添加处理则显著抑制了细菌和放线菌的数量,且随着浓度的增大,其抑制效应愈强。小于等于 1 200 mg/kg 的铅浓度添加处理均可增加 (900 和 1 200 mg/kg) 或显著增加 (300 和 600 mg/kg) 根际中真菌数量,其中,600 mg/kg 对真菌数量的促进效应更明显;而铅浓度添加达到 1 500 mg/kg 时真菌数量则显著降低。

由根际不同微生物数量随铅浓度增加而变化的

拐点可知,细菌和放线菌对铅抑制的敏感浓度范围均在 600 ~ 900 mg/kg,真菌在 1 200 ~ 1 500 mg/kg,表明真菌对铅胁迫的耐受能力最强;由微生物数量随铅浓度增加的变化幅度差异可知,放线菌对铅胁迫的耐受能力强于细菌。因此,小白菜根际 3 大类微生物对铅的耐受能力表现为:真菌 > 放线菌 > 细菌。

2.2 铅对小白菜根际土壤硝化、反硝化及呼吸的影响

硝化作用和反硝化作用是土壤中氮素转化的 2 个重要过程,分别由硝化细菌和反硝化细菌参与完成,硝化、反硝化作用与氮素的有效利用密切相关。因此,研究不同铅浓度添加对根际土壤硝化、反硝化作用的影响,可反映其对土壤氮素利用的影响。

2.2.1 铅对小白菜根际土壤硝化、反硝化细菌数量的影响

不同铅浓度添加处理下小白菜根际土壤硝化和反硝化细菌数量测定结果如图 1 和图 2 所示。从图中可以看出,小白菜根际土壤中具有反硝化作用细菌的数量不仅远高于具有硝化作用细菌的数量,而且还是构成根际土壤细菌的主体(表 1),即土壤中大部分细菌具有反硝化作用,这与植物根际土壤中分离出的细菌中 65% 都具有反硝化能力的结论相符合^[14]。

由图 1 和图 2 可知,小白菜根际土壤反硝化细菌数明显高于硝化细菌数,二者随着铅浓度的增加均呈现先升后降的变化趋势,且升降步调一致。即铅添加浓度为 300 mg/kg 处理时硝化细菌和反硝化细菌数均最高,后随着浓度增加,2 类细菌数量逐渐降低,至 T1500 处理时最低。

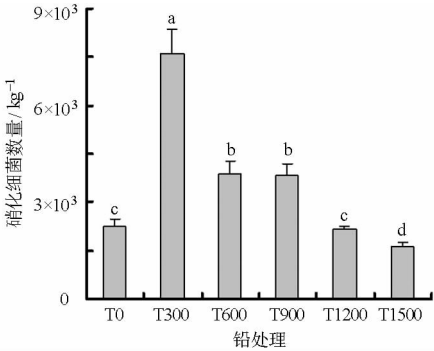


图 1 不同处理下小白菜根际硝化细菌数量
Fig.1 Number of rhizosphere nitrifying bacteria under different Pb treatments

注:不同处理标注的不同小写字母表示在 5% 水平下差异显著。

T300、T600 和 T900 硝化细菌数量均显著高于 T0,增幅分别为 239.3%、73.4% 和 71.7%;而 T1200 和 T1500 较 T0 则分别下降 3.7% 和 28.4%,

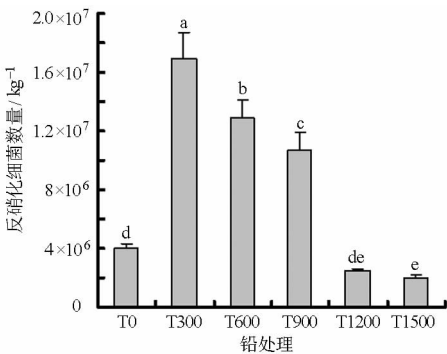


图 2 不同处理下小白菜根际反硝化细菌数量
Fig.2 Number of rhizosphere denitrifying bacteria under different Pb treatments

其中,T1500 与 T0 两处理间硝化细菌数量差异显著(图 1)。随铅浓度增加,反硝化细菌数虽与硝化细菌数变化同步,但升降幅度明显高于硝化细菌。其中,T300、T600 和 T900 的反硝化细菌数量较 T0 分别增加了 327.7%、226.0% 和 170.3%,而 T1200 和 T1500 则分别下降 35.6% 和 50.6%。除 T1200 外,各处理的反硝化细菌数量与 T0 间差异均显著(图 2)。这说明 300 ~ 900 mg/kg 的铅浓度添加可显著刺激小白菜根际土壤硝化细菌和反硝化细菌生长,1 500 mg/kg 铅浓度添加则对小白菜根际土壤硝化细菌和反硝化细菌的生长均有显著的抑制效应,而 1 200 mg/kg 铅浓度添加对小白菜根际土壤硝化、反硝化细菌的生长影响均不明显。比较 2 类细菌数量随铅浓度增加的变化幅度可知,反硝化细菌对铅的“少促多抑”效应更为敏感。

2.2.2 铅对小白菜根际土壤硝化、反硝化速率的影响

随着铅添加浓度的增加,小白菜根际土壤硝化和反硝化速率均呈先升后降的变化趋势(表 2),与硝化和反硝化细菌数随铅浓度增加而变化的峰值一致,均出现在 T300。T300、T600 和 T900 根际土壤的硝化速率和反硝化速率均显著大于 T0。其中,硝化速率较 T0 分别提高 136.5%、132.0% 和 67.1%,反硝化速率较 T0 分别提高 100.7%、65.6% 和 37.8%;T1200 和 T1500 根际土壤的硝化速率较 T0 分别下降 2.3% 和 82.6%,反硝化速率较 T0 分别下降 2.6% 和 78.0%。其中,T1500 根际土壤的硝化速率和反硝化速率均显著低于 T0。

2.2.3 铅对小白菜根际土壤呼吸速率的影响

土壤呼吸速率是微生物活性的反映,代表了土壤代谢的旺盛程度,可用于衡量微生物生命活动的强度。从表 2 可以看出,随着铅浓度增加,土壤呼吸速率同样呈现少促多抑、先升后降的变化趋势,其峰值出现在 T300。其中,T300、T600 和 T900 处理的土壤呼吸速率均显著高于 T0,且 3 个处理间差异不

表 2 不同处理下小白菜根际土壤硝化、反硝化速率和呼吸速率

Tab.2 Nitrification and denitrification rate of rhizosphere soil under different Pb treatments

处理	硝化速率/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	反硝化速率/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	呼吸速率/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)
T0	0.304 ^c	0.720 ^c	0.624 ^b
T300	0.719 ^a	1.445 ^a	1.152 ^a
T600	0.705 ^a	1.192 ^a	0.976 ^a
T900	0.508 ^b	0.992 ^b	0.893 ^a
T1200	0.297 ^c	0.701 ^c	0.123 ^c
T1500	0.053 ^d	0.159 ^d	0.107 ^c

显著,表明土壤能在较宽且较高的铅浓度范围内维持较高的呼吸速率;而 T1200 和 T1500 处理的呼吸速率则显著低于 T0,降幅分别达到 80.3% 和 82.9%,表明土壤铅浓度达到或超过 1 200 mg/kg 后,土壤的呼吸速率受到了明显的抑制。本研究中土壤呼吸速率随土壤铅浓度的变化趋势与其他研究结果相符^[16]。一定浓度的铅添加导致土壤呼吸速率上升,一方面是由于一定量的铅可刺激土壤中微生物数量的增加,另一方面是由于一定程度的铅胁迫可诱使土壤微生物通过增强呼吸作用,消耗更多的有机物,进而产生更多的能量来抵抗这一胁迫^[17]。而当铅浓度进一步增大,铅胁迫程度加重,部分抗性较差的土壤微生物难以生存,微生物数量减小,呼吸速率随之降低。

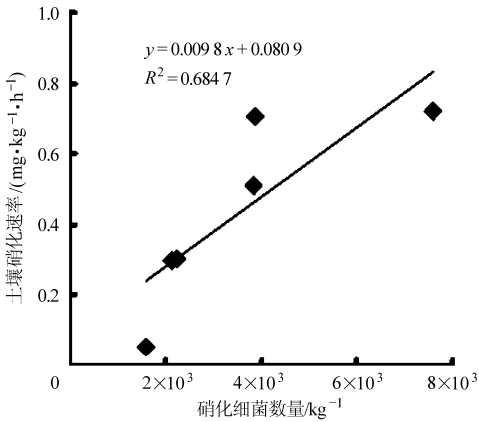


图 3 硝化、反硝化速率和硝化、反硝化细菌数量的相关性

Fig.3 Relational coefficient between nitrification, denitrification rate and nitrifying, denitrifying bacteria

总体上,铅添加处理下土壤硝化、反硝化速率与硝化、反硝化细菌数的决定系数较高,尤其是反硝化速率与反硝化细菌数的相关性远远高于海域沉积物二者的相关性^[19],这主要是由于本研究土壤硝化、反硝化作用的测定在研究所春季进行,且恒温水浴确保 BaPS 密封室温度为 25℃,测试土壤呈中性,而硝化和反硝化细菌的培养温度为 25~28℃,通常在这些环境条件下土壤的硝化、反硝化速率与硝化、反硝化细菌数的相关性均较高^[20]。

土壤呼吸速率与土壤微生物总数的相关性分析结果(图 4)表明,在铅胁迫的环境下,土壤的呼吸速率与土壤中细菌、真菌和放线菌的总数显著正相关

2.2.4 土壤硝化-反硝化速率及呼吸速率与微生物数量的关系

土壤中硝化细菌和反硝化细菌作为硝化和反硝化作用的执行者,其数量的多少直接影响甚至决定土壤硝化和反硝化速率的大小。但硝化和反硝化速率同时又受到温度、pH 值、土壤中氧含量以及氮素的存在形式等多种环境因素的影响^[18]。通过分析不同铅添加浓度处理下小白菜根际土壤硝化、反硝化速率和硝化、反硝化细菌数量的关系可知(图 3),硝化速率和硝化细菌数量决定系数为 0.684 7($p = 0.032$),反硝化速率与反硝化细菌数量的决定系数为 0.851 1($p = 0.013$),均达到显著正相关水平,表明即使在铅胁迫的环境下,硝化细菌和反硝化细菌仍是硝化和反硝化过程中最为关键的作用因子。

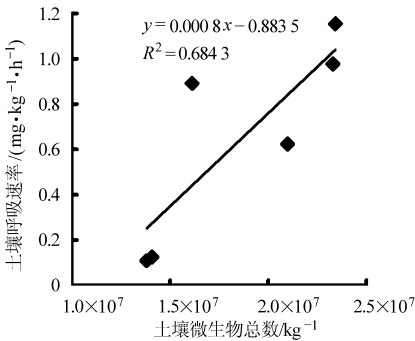
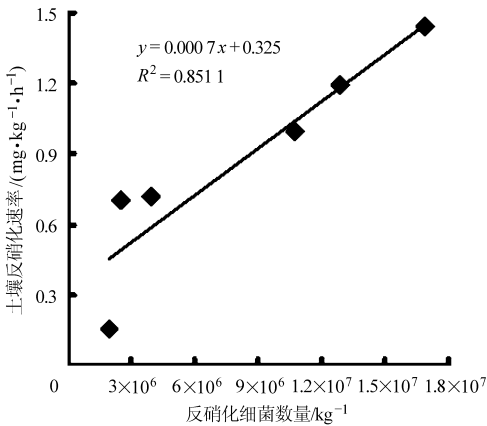


图 4 土壤呼吸速率与土壤微生物总数的相关性

Fig.4 Relationship between soil respiration rate and total number of microorganism

($p = 0.037$),决定系数为 0.684 3,这表明即使在铅

胁迫的环境下,土壤微生物总数仍是影响土壤呼吸速率最为关键的作用因子。

3 结论

(1)随着铅添加浓度的增加,小白菜根际土壤中细菌、真菌、放线菌以及总菌数均呈现先升后降的变化趋势,峰值所对应的铅浓度分别为 300、300、600 mg/kg,对铅耐受能力表现为:真菌 > 放线菌 > 细菌。

(2)根际土壤中硝化、反硝化细菌数、硝化、反硝化速率以及土壤呼吸速率均随着铅浓度的增加而先升后降,峰值所对应的铅浓度均为 300 mg/kg。硝化速率与硝化细菌数、反硝化速率与反硝化细菌数以及土壤呼吸速率与微生物总数均显著正相关。

(3)土壤铅浓度低于 600 mg/kg 时,小白菜根际土壤微生态系统的生理功能更加活跃,而土壤铅浓度超过 1 200 mg/kg 时,则出现显著的微生物群落结构和功能的退化。

参 考 文 献

1 Hu X, Ding Z. Lead/cadmium contamination and lead isotopic ratios in vegetables grown in peri-urban and mining/smelter contaminated sites in Nanjing, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 82(1): 80–84.

2 林啸,刘敏,侯立军,等.上海城市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价[J].中国环境科学,2007,27(5):613–618.

Lin Xiao, Liu Min, Hou Lijun, et al. Soil and surface dust heavy metal pollution state and assessment in Shanghai City[J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 613–618. (in Chinese)

3 吴新民,潘根兴.影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析[J].土壤学报,2003,40(6):921–928.

Wu Xinmin, Pan Genxing. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soil in Nanjing City[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 921–928. (in Chinese)

4 周承龙,杜惠蓉,陈安银.城市市郊蔬菜铅污染现状研究[J].四川文理学院学报,2011,21(5):58–60.

Zhou Chenglong, Du Huirong, Chen Anyin. Analysis on lead in vegetables on roadsides in the suburbs of Dazhou[J]. Sichuan University of Arts and Science Journal, 2011, 21(5): 58–60. (in Chinese)

5 陈同斌,宋波,郑袁明,等.北京市菜地土壤和蔬菜铅含量及其健康风险评估[J].中国农业科学,2006,39(8):1589–1597.

Chen Tongbin, Song Bo, Zheng Yuanming, et al. A survey of lead concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risks[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(8): 1589–1597. (in Chinese)

6 宋波,张学洪,蒙冬柳,等.桂林市菜地土壤和蔬菜铅含量调查与污染评价[J].环境科学研究,2012,25(10):1155–1160.

Song Bo, Zhang Xuehong, Meng Dongliu, et al. Lead concentrations and contamination assessment in vegetables and soils in Guilin[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(10): 1155–1160. (in Chinese)

7 王灵,朱建雯,钱翌,等.乌鲁木齐市菜地土壤和蔬菜铅含量及风险评价[J].新疆农业大学学报,2008,31(1):46–50.

Wang Ling, Zhu Jianwen, Qian Yi, et al. Lead content in vegetable and soil of vegetable plot in Urumqi city and its risk evaluation[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2008, 31(1): 46–50. (in Chinese)

8 秦天才,吴玉树,王焕校,等.镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J].生态学报,1998,18(3):320–325.

Qin Tiancai, Wu Yushu, Wang Huanxiao, et al. Effects of cadmium, lead and their interactions of the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis* [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(3): 320–325. (in Chinese)

9 杜连彩.铅胁迫对小白菜幼苗叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响[J].中国蔬菜,2008(5):17–19.

Du Liancai. Effects of lead stress on chlorophyll content and antioxidant system of Pakchoi[J]. China Vegetables, 2008(5): 17–19. (in Chinese)

10 王浩,顾国平,施彩仙,等.土壤铅、镉污染对小白菜生长与积累的影响[J].浙江农业科学,2009(2):398–400.

11 贾夏,董岁明,周春娟.土壤低含量铅时冬小麦幼苗根际微生物群落的变化[J].农业机械学报,2013,44(2):103–108.

Jia Xia, Dong Suiming, Zhou Chunjuan. Changes of microbial communities in rhizosphere of winter wheat seedlings under low lead content[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 103–108. (in Chinese)

12 杨宁,张荣标,张永春,等.基于微生物生态效益的土壤肥力综合评价模型[J].农业机械学报,2013,44(5):108–112.

Yang Ning, Zhang Rongbiao, Zhang Yongchun, et al. Soil fertility synthesis evaluation model based on ecological benefit of microorganism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 108–112. (in Chinese)

13 Majer B J, Tschkerko D, Paschke A. Effects of heavy metal contamination of soils on micronucleus induction in *Tradescantia* and on microbial enzyme activities: a comparative investigation[J]. Mutation Research, 2002, 515(1–2): 111–124.

14 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008.

15 杨靖民,姜旭,张忠庆,等.基于 BaPS 系统黑土硝化、反硝化和呼吸作用研究[J].吉林农业大学学报,2014,36(1):71–76,88.

Yang Jingmin, Jiang Xu, Zhang Zhongqing, et al. Study on nitrification, denitrification and respiration in black soil based on BaPS system[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2014, 36(1): 71–76, 88. (in Chinese)

16 曾路生,廖敏,黄昌勇,等.外源铅对水稻土微生物量、微生物活性及水稻生长的影响[J].生态环境,2008,17(3):993–

998.
Zeng Lusheng, Liao Min, Huang Changyong, et al. Effects of lead contamination on soil microbial biomass, microbial activities and rice growth in paddy soils[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 993 – 998. (in Chinese)

17 Ryan M G, Lavigne M G, Gower S T. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate[J]. Geophysical Research, 1997, 102(28): 871 – 873.

18 白洁, 王晓东, 李佳霖, 等. 北黄海沉积物-水界面反硝化速率及影响因素研究[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(4): 653 – 666.
Bai Jie, Wang Xiaodong, Li Jialin, et al. A study of the denitrification rate and its influence factors at the sediment water interface in summer in the North Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(4): 653 – 666. (in Chinese)

19 晨曦, 于江华, 王晓东, 等. 黄海北部海域沉积物反硝化细菌数量及反硝化速率的季节变化[J]. 海洋科学, 2011, 35(6): 48 – 51.
Chen Xi, Yu Jianghua, Wang Xiaodong, et al. Seasonal variation of denitrifying bacteria and denitrification rate in the sediment of the northern Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2011, 35(6): 48 – 51. (in Chinese)

20 王玉萍. 珠江河口湿地沉积物硝化与反硝化作用对比研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.
Wang Yuping. Comparative study of nitrification and denitrification in sediment of Pearl River estuarine wetlands[D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2012. (in Chinese)

Effects of Lead on Microbial Communities in Rhizosphere and Physiological Functions of *Brassica chinensis* L.

Fu Weiguo¹ Wang Fankun¹ Li Pingping² Tang Juanjuan¹

(1. High-tech Key Laboratory of Agricultural Equipment & Intelligentization of Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: By studying the characteristics of microbial number, nitrification and denitrification rates and respiration rate of rhizosphere soil of *Brassica chinensis* L. grown under the different concentration of lead (Pb) environments, the effect of lead on the ecological safety of plant rhizosphere micro-ecosystem was revealed. The results showed that the all numbers of bacteria, fungi and actinomycetes first increased and then decreased with increase of Pb concentration, and the peak value occurred in the environment with soil Pb concentration of 300 mg/kg, 300 mg/kg and 600 mg/kg, respectively. The Pb tolerance of microbe was fungi > actinomycetes > bacteria under the Pb stress environments. The all numbers of nitrifying and denitrifying bacteria in the rhizosphere, soil nitrification and denitrification rate, and soil respiration rate also first increased and then decreased with increase of Pb concentration, and peak values of all above parameters occurred in the environment with soil Pb concentration of 300 mg/kg. Nitrification rate and number of nitrifying ($R^2 = 0.6847$), denitrification rate and number of denitrifying bacteria ($R^2 = 0.8511$), and respiration rate and the total number of microbe ($R^2 = 0.6843$) were all correlated significantly and positively. In conclusion, only when the soil Pb concentrations reaches or exceeds 1 200 mg/kg, significant microbial community structural and functional degradation of *B. Chinensis* rhizosphere micro-ecosystem will occur.

Key words: *Brassica chinensis* Microbe Lead stress Nitrification Denitrification Respiration