

水稻不同生育期土壤微生物生物量及生物活性对模拟 Cr(VI) 污水灌溉的响应

胡 健^{1,2}, 康贻军³, 杨连新¹, 朴 哲², 殷士学²

(1.扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 3.盐城师范学院生命科学与技术学院, 江苏 盐城 224002)

摘 要:分析了模拟 Cr(VI) 污水灌溉对水稻不同生育时期土壤微生物生物量及生物活性的影响, 结果表明: (1) 微生物生物量碳、生物量氮、基础呼吸作用、脲酶活性以及反硝化活性均与 Cr(VI) 灌溉浓度呈显著或极显著的负相关性, 过氧化氢酶活性与 Cr(VI) 灌溉浓度呈显著或极显著的正相关, 氨化作用在低浓度 Cr(VI) (10 mg·L⁻¹) 污灌下明显增强而在高浓度 Cr(VI) (50 mg·L⁻¹) 污灌下明显减弱; 其中微生物生物量碳、生物量氮、基础呼吸强度以及脲酶活性与 Cr(VI) 灌溉浓度负相关性较好且在水稻各生育期均比较稳定, 是水稻土 Cr(VI) 污染评价灵敏的生物学指标。 (2) 水稻不同生育时期土壤微生物生物量及生物活性对 Cr(VI) 污灌处理的敏感性存在差异, 其中微生物生物量碳、生物量氮、反硝化活性、过氧化氢酶以及脲酶活性对 Cr(VI) 污灌敏感性总体上表现为生育前期高于生育后期。 (3) 加 Si 处理明显缓解 Cr(VI) 对土壤生物量碳、生物量氮、基础呼吸强度以及反硝化作用的抑制, 但促进了 Cr(VI) 对土壤脲酶活力的抑制以及对土壤过氧化氢酶活力的刺激作用。

关键词: 微生物生物量; 微生物活性; Cr(VI); 水稻土

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)06-2308-07

Response of Soil Microbial Biomass and Bioactivities to Stimulated Irrigation of Cr(VI) Sewage in Different Growth Stages of Rice

HU Jian^{1,2}, KANG Yi-jun³, YANG Lian-xin¹, PIAO Zhe², YIN Shi-xue²

(1.Key Lab of Crop Genetics & Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Environment Science and Engineering College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3.College of Life Sciences and Biotechnology of Yancheng Teachers' College, Yancheng 224002, China)

Abstract: In order to understand the soil microbial biomass and bioactivity response to Cr(VI) stress in different growth stages of rice, pot experiment was conducted using the japonica cultivar Wuxiangjing 14, and irrigated with stimulated Cr(VI) sewage with three levels of concentration: 0 mg·L⁻¹(CK), 10 mg·L⁻¹(Cr10) and 50 mg·L⁻¹(Cr50). Results showed that: (1) There were significantly negative correlations between soil biomass carbon, biomass nitrogen, basal respiration, urease activity, denitrification activity and the Cr(VI) concentration of sewage irrigated in the pots, whereas there was significantly positive correlation between soil catalase activity and the Cr(VI) concentration of sewage irrigated in the pots, and the soil ammonification activity was promoted by Cr(VI) at lower concentration(Cr10), but was inhibited at higher concentration(Cr50). Compared with other soil bioactivity indexes, the soil biomass carbon, biomass nitrogen, basal respiration and urease activity were more correlative to the concentration of Cr(VI) and very stable during whole treated stage, and could be as indicators of the Cr(VI) pollution degree in paddy soil. (2) The sensitivities of soil microbial biomass and bioactivity for Cr(VI) were varied with the growth stages of rice, in general, sensitivities of soil biomass carbon, biomass nitrogen, denitrification activity, urease activity and catalase activity for Cr(VI) were higher in early growth stage than in after growth stage. (3) Adding SiO₂ into pot soil significantly decreased the inhibiting activity of Cr(VI) to soil biomass carbon, biomass nitrogen, basal respiration, and denitrification activity, but it promoted the inhibiting activity of Cr(VI) to soil urease activity and the stimulating activity of Cr(VI) to catalase activity.

Keywords: microbial biomass; microbial bioactivity; Cr(VI); paddy soil

收稿日期: 2008-09-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(130470060, 40471072)

作者简介: 胡 健(1965—), 男, 江苏通州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为农业资源与环境。E-mail: yzuhj1@yahoo.com.cn

城市工业污水农用灌溉是目前污水处置及资源化利用的重要途径^[1-2],污水灌溉加速了重金属在农业土壤中的积累,对农田生态系统产生影响并可能威胁粮食生产安全。土壤微生物活性和群落结构是土壤生态系统受外界扰动最直接、最敏感的部分,因而是土壤环境质量不可缺少的生物学指标。有关重金属污染对土壤微生物生态系统的影响,前人已从微生物区系、生物量、生物活性以及多样性等方面开展了广泛的研究^[3-7],但多数均在室内通过短期培养进行,而重金属进入土壤环境后,其有效性与土壤理化性质以及植被关系密切,因此结合作物种植过程,跟踪作物生长周期研究重金属污染对土壤微生物生态系统的影响显得更有意义。

铬盐和金属铬的大量生产和利用,导致水体及农田铬污染越来越严重^[8-9],前人曾研究了铬污染对水稻等农作物生长发育的影响及其在作物体内吸收、迁移和累积的机制^[10-13],并尝试通过施硅肥减缓铬对作物生长发育的胁迫^[11]。但有关铬污染对土壤微生物群落及生物活性的影响报道极少^[14]。本文通过模拟 Cr(VI)污水灌溉水稻盆栽试验,分析了 Cr(VI)污染对水稻不同生育时期土壤微生物量、酶活性及生化强度等土壤质量生物学指标的影响,明确了施硅处理在缓解铬对土壤微生物生态毒性的作用,从而为日益严重的铬污染以及含铬污水资源化利用对土壤环境质量的影响及其评价与修复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及水稻盆栽管理

采集扬州大学农学院农场土(砂壤土),过筛去除杂质、风干,5 月 20 日装过筛土,每盆 10 kg,5 月 30 日每盆施尿素 N 1.0 g;6 月 10 日单本移栽水稻(粳稻品种武香粳 14),每盆 3 穴,8 月 5 日施促花肥,每盆施尿素 N 0.5 g,全生育期保持水层。移栽 10 d 后用 K₂Cr₂O₇ 溶液进行灌溉,每盆每天 2 000 mL,持续 1 个月,其中灌溉水 Cr 含量设 0、10、50 mg·L⁻¹ 3 个浓度水平,并增加一个 50 mg·L⁻¹ +SiO₂ (每盆 1.5 g)处理,每处理设 3 个重复。其余为常规盆栽管理。土壤理化性质的测定采用常规方法进行^[15],结果见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil samples

有机碳/g·kg ⁻¹ Organic C	全氮/g·kg ⁻¹ Total N	全磷/g·kg ⁻¹ Total P	速效磷/mg·kg ⁻¹ Available P	全钾/g·kg ⁻¹ Total K	速效钾/mg·kg ⁻¹ Avaible K	颗粒组成/g·kg ⁻¹ Size composition		
						2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
9.1	1.4	0.6	10.36	13.6	74.18	578.3	285.1	136.5

1.2 取样

分别于水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期用不锈钢土钻多点采集盆内 0~20 cm 表层水稻土,每盆取样量约为 200 g,风干处理 4 h,拣去土样中的植物残体、砾石,过 2 mm 筛,置于保鲜塑料袋中,放于 4 ℃冰箱内保存备用。

1.3 土壤微生物活性指标测定方法

土壤微生物生物量碳(Cmic)、氮(Nmic)测定采用氯仿熏蒸法^[16],土壤基础呼吸强度测定采用碱液吸收酸滴定法^[17],土壤酶活性及生化作用强度测定方法参考《农业微生物学实验技术》^[18]。所有测定数据均折算成以干土样·kg⁻¹ 表示。本试验所有数据均以 Excel 进行数据处理,SPSS 进行统计分析,Excel 进行图表绘制。通过 PLSD_{0.05} 差数测验对各处理间差异显著性进行分析。

2 结果与分析

2.1 Cr(VI)污水灌溉对水稻土微生物生物量碳(Cmic)及生物量氮(Nmic)的影响

由图 1 可知,在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期及成熟期,Cr(VI)灌溉浓度为 10 mg·L⁻¹(Cr10)处理 Cmic 分别比对照降低 6.5%、30.5%、18.5%和 13.3%,Cr(VI)灌溉浓度为 50 mg·L⁻¹(Cr50)处理比对照降低 25.8%、61.2%、36.2%和 33.7%,Cr(VI)灌溉浓度为 50 mg·L⁻¹

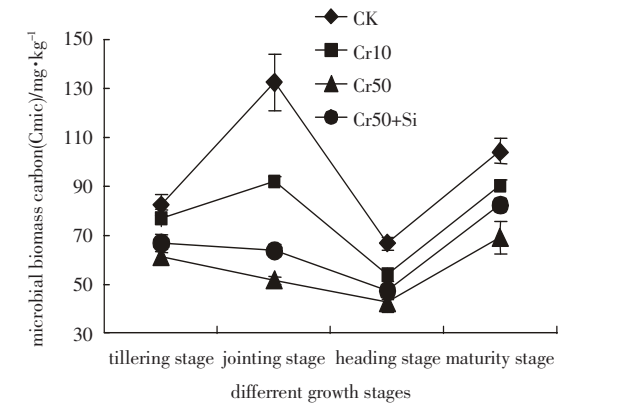


图 1 模拟 Cr(VI)污水灌溉对水稻土生物量碳的影响
Figure 1 Effect of simulated irrigation of Cr(VI) sewage on the soil microbial biomass carbon(Cmic) in different growth stages of rice

并加硅 Cr50+Si 处理比对照降低 19.1%、51.9%、28.5%和 20.8%。由图 2 可知,在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期及成熟期,Cr10 处理 Nmic 分别比对照降低 14.8%、28.7%、31.2%和 21.6%,Cr50 处理分别比对照降低 37.8%、62.8%、56.9%和 52.3%,Cr50+Si 处理分别比对照降低 25.8%、48.6%、43.5%和 33.9%。统计分析结果显示,水稻各生育期 Cr10、Cr50 以及 Cr50+Si 处理土壤 Cmic 和 Nmic 与对照差异均达显著水平,Cr50+Si 处理与 Cr50 处理间差异也均达显著水平。

上述结果说明,Cr(VI)污灌显著降低了水稻不同生育期土壤 Cmic 和 Nmic,并且 Cr(VI)灌溉浓度提高进一步促进了土壤 Cmic 和 Nmic 的下降。

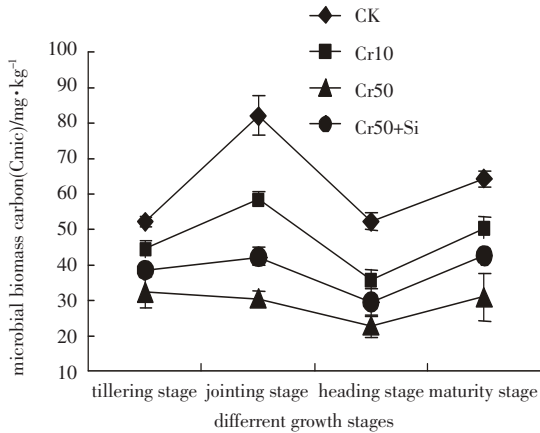


图 2 模拟 Cr(VI)污水灌溉对水稻土生物量氮的影响
Figure 2 Effect of simulated irrigation of Cr(VI) sewage on the soil microbial biomass nitrogen(Nmic) in different growth stages of rice

加 Si 处理明显缓解 Cr(VI)对土壤 Cmic 和 Nmic 的影响。由不同生育期各处理 Nmic 和 Cmic 的变异系数(CV 值)可知,土壤微生物生物量碳和氮对 Cr(VI)的敏感程度拔节期>抽穗期>成熟期>分蘖期。

2.2 Cr(VI)污水灌溉条件下水稻土基础呼吸的变化

土壤基础呼吸反映了土壤碳素周转速率,是土壤微生物总体活性指标。由图 3 可知,在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期及成熟期,Cr10 处理水稻土基础呼吸强度分别比对照降低 22.7%、13.1%、4.7%和 39.6%,Cr50 处理比对照降低 33.1%、58.9%、71.5%和 58.8%,Cr50+Si 处理比对照降低 23.8%、68.8%、23.7%和 4.8%。统计分析结果显示,水稻各生育期土壤基础呼吸强度在不同浓度 Cr 处理间以及 Cr50+Si 与 Cr50 处理间差异均达显著水平。

上述结果说明,Cr(VI)胁迫明显降低了水稻不同生育期土壤基础呼吸强度,并且随 Cr(VI)灌溉浓度的

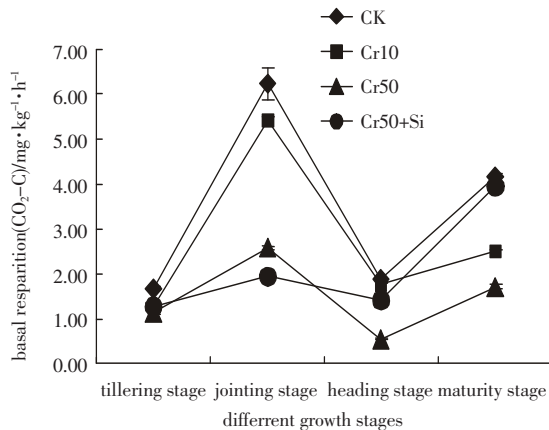


图 3 模拟 Cr(VI)污水灌溉对水稻土基础呼吸的影响
Figure 3 Effect of simulated irrigation of Cr(VI) sewage on the soil basal respiration in different growth stages of rice

提高,土壤呼吸强度进一步下降。

除拔节期外,加 Si 处理明显缓解 Cr(VI)对土壤基础呼吸强度的影响。分析不同生育期各处理间土壤基础呼吸强度的变异系数可知,土壤基础呼吸作用对 Cr(VI)的敏感程度拔节期>抽穗期>成熟期>分蘖期,与微生物生物量碳和氮对 Cr(VI)的敏感性相一致。

2.3 Cr(VI)污水灌溉条件下水稻土酶活性的变化

土壤酶是土壤生物化学过程发生的主体,是土壤微生物活性的重要指标。土壤脲酶参与了土壤有机氮水解过程,其活性的大小可部分反映土壤 N 素供应能力^[19]。由图 4 可知,在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期及成熟期,Cr10 处理水稻土脲酶活力分别比对照降低 54.3%、10.2%、56.6%和 47.9%,Cr50 处理比对照减少 86.1%、64.0%、87.6%和 53.4%,Cr50+Si 处理比对

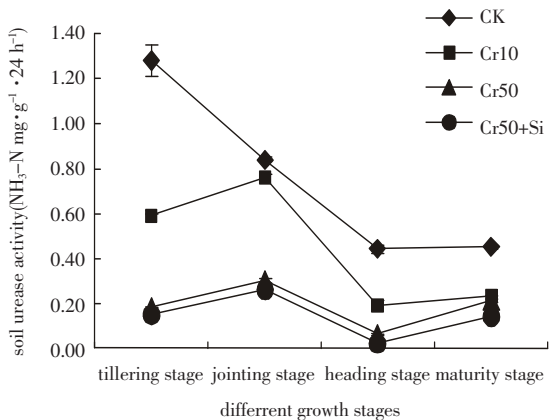


图 4 模拟 Cr(VI)污水灌溉对水稻土脲酶活力的影响
Figure 4 Effect of simulated irrigation of Cr(VI) sewage on the soil urease activity in different growth stages of rice

照减少 88.4%、69.1%、96.3%和 69.5%。统计分析结果显示,在水稻各生育期,土壤脲酶活力在不同浓度 Cr 处理间以及 Cr50+Si 与 Cr50 处理间差异均达显著水平。上述结果说明,Cr(VI)污灌明显降低了水稻不同生育期土壤脲酶活力,并且随 Cr(VI)灌溉浓度的提高,土壤脲酶活性进一步下降。而加 Si 处理促进了土壤脲酶活性进一步下降。分析不同生育期各处理间土壤脲酶活性的变异系数可知,土壤脲酶活力对 Cr(VI)的敏感程度抽穗期>分蘖期>拔节期>成熟期。

过氧化氢酶作为氧化还原酶类,其主要生化功能在于降低土壤环境过氧化氢浓度,缓解过氧化氢对生物体的毒害作用。由图 5 可知,在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期及成熟期,Cr10 处理土壤过氧化氢酶活力分别比对照提高 2.2%、2.4%、2.5%和 3.1%,Cr50 处理比对照提高 3.2%、2.5%、3.0%和 10.4%,Cr50+Si 处理比对照提高 1.5%、6.5%、4.2%和 10.6%, 统计分析结果显示,在水稻各生育期,土壤过氧化氢酶活力在不同浓度 Cr 处理间以及 Cr50+Si 与 Cr50 处理间差异均达显著水平。上述结果说明,Cr(VI)污灌均明显提高了水稻不同生育期土壤过氧化氢酶活力,并且随 Cr(VI)灌溉浓度的提高,土壤过氧化氢酶活性进一步提高。加 Si 处理明显促进水稻拔节期、抽穗期及成熟期土壤过氧化氢酶活力的提高。分析不同生育期各处理间土壤过氧化氢酶活力的变异系数可知,土壤过氧化氢酶活力对 Cr(VI)的敏感程度成熟期>拔节期>抽穗期>分蘖期。

2.4 Cr(VI)污水灌溉条件下水稻土生化作用强度的变化

土壤氨化、反硝化作用强度反映土壤生态系统氮

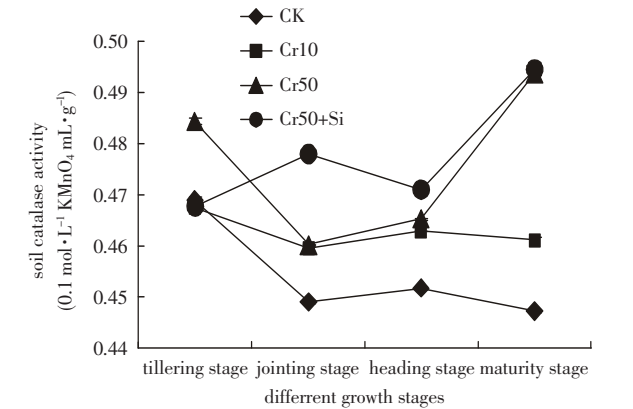


图 5 模拟 Cr(VI)污水灌溉对水稻土过氧化氢酶活力的影响
Figure 5 Effect of simulated irrigation of Cr(VI) sewage on the soil catalase activity in different growth stages of rice

素平衡水平。是土壤生物活性的综合指标之一^[17]。由图 6 可知,在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期及成熟期,Cr10 处理土壤氨化作用分别比对照提高 1.5%、21.1%、11.1%和 4.0%,Cr50 处理比对照降低 57.6%、31.6%、40.7%和 20.0%,Cr50+Si 处理比对照降低 63.6%、60.5%、53.7%和 22.0%,统计分析结果显示,在水稻各生育期,土壤氨化作用强度在不同浓度 Cr 处理间以及 Cr50+Si 与 Cr50 处理间差异多数达显著水平。上述结果说明,Cr(VI)低浓度处理明显促进了水稻不同生育期土壤氨化作用,而高浓度处理均明显抑制土壤氨化作用。加 Si 处理促进了对土壤氨化作用的抑制。分析不同生育期各处理间土壤氨化作用强度的变异系数可知,土壤氨化作用对 Cr(VI)的敏感程度分蘖期>拔节期>抽穗期>成熟期。

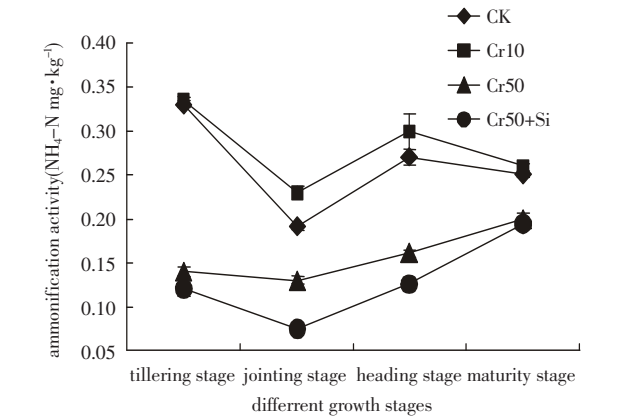


图 6 模拟 Cr(VI)污水灌溉对水稻土氨化作用的影响
Figure 6 Effect of simulated irrigation of Cr(VI) sewage on the soil ammonification activity in different growth stages of rice

由表 2 可知,在分蘖期和拔节期,土壤反硝化活性 Cr10 处理与对照相比分别降低 96.78%和99.04%,而Cr50 及 Cr50+Si 处理均未检测到反硝化活性;在水稻抽穗期,Cr10、Cr50、Cr50+Si 处理的反硝化作用活性分别比对照下降 18.02%、95.38%和 49.39%,说明 Cr(VI)污灌均明显降低土壤反硝化活性,并且 Cr(VI)灌溉浓度的提高,促进土壤反硝化活性的显著下降。加 Si 处理明显缓解水稻抽穗期 Cr(VI)对土壤反硝化作用的抑制作用。分析不同生育期各处理间土壤反硝化活性的变异系数可知,土壤反硝化活性对 Cr(VI)的敏感程度拔节期>分蘖期>抽穗期。

2.5 水稻土微生物活性指标与 Cr(VI)污水灌溉浓度的相关性分析

分析上述微生物活性指标与 Cr(VI)灌溉浓度的

表 2 模拟 Cr(VI)污水灌溉对水稻不同生育期土壤反硝化活性的影响($\text{NO}_2\text{-N mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 2 Effect of simulated irrigation of Cr(VI) sewage on the soil denitration activity in different growth stages of rice

处理 Treatment	分蘖期 tillering stage	拔节期 jointing stage	抽穗期 heading stage
CK	0.080 7 a	0.416 2 a	0.541 2 a
Cr10	0.002 6 b	0.004 0 b	0.443 7 b
Cr50	ND	ND	0.025 0 d
Cr50+Si	ND	ND	0.273 9 c
Means	0.020 8	0.105 1	0.321 0
CV	191.767 0	197.469 7	70.450 4
PLSD0.05	0.000 7	0.008 5	0.028 1

注:表中不同小写字母表示处理间差异经 PLSD 差数测验比较达到显著水平,ND 表示未检测到 N_2O 。

相关性,结果(表 3)显示,微生物生物量碳、生物量氮、基础呼吸作用、脲酶活性、氨化作用以及反硝化活性均与 Cr(VI)灌溉浓度呈不同程度负相关,其中,仅水稻拔节期到成熟期土壤氨化作用与 Cr(VI)的灌溉浓度负相关未达显著水平,而过氧化氢酶活性与 Cr(VI)灌溉浓度呈显著或极显著正相关,说明微生物活性变化与 Cr(VI)污染程度密切相关,并且不同活性指标对 Cr(VI)胁迫的响应存在差异。此外,比较不同土壤微生物活性指标与 Cr(VI)灌溉浓度相关程度及其在不同生育时期的稳定性可知,生物量碳、生物量氮与 Cr(VI)灌溉浓度相关性最好,并且在水稻整个生育期均表现稳定,其次是基础呼吸和脲酶活性以及过氧化氢酶活性,再次为氨化作用及反硝作用。

3 讨论

土壤微生物生物量碳和生物量氮是土壤有机质的活性组成部分,是土壤环境质量评价的基础生物学

指标,试验结果表明,Cr(VI)污灌使水稻各生育期土壤微生物生物量碳和生物量氮均明显下降,结合 Cr(VI)污灌对土壤微生物区系的影响^[20],笔者认为,Cr(VI)污灌使土壤微生物生长受到抑制,微生物种类及丰度发生明显变化是土壤微生物生物量碳和生物量氮下降的主要原因。土壤有机质的分解和转化是土壤微生物重要的生化功能,前人研究认为,一定程度的重金属污染明显抑制土壤有机碳矿化作用,随着重金属浓度的提高,土壤 CO_2 释放的指数增长期越来越滞后^[21],长期受重金属污染土壤中植物凋落物分解率明显下降;本文研究表明,Cr(VI)污灌导致水稻不同生育期土壤基础呼吸强度下降,说明 Cr(VI)污染对土壤微生物碳矿化过程的作用与其他重金属污染一致。已有试验证实,土壤重金属污染与土壤氮素矿化作用呈显著负相关,即使低浓度的重金属污染也会对氮矿化过程产生明显的抑制^[22],从本文结果看,土壤脲酶活力与 Cr(VI)污灌浓度呈极显著负相关,土壤氨化作用受低浓度 Cr(VI)污灌促进,受高浓度 Cr(VI)污灌抑制,总体上看,Cr(VI)污染尤其是高浓度污染对水稻土氮矿化过程存在明显抑制作用。反硝化作用是厌氧条件下水稻土氮形态转化重要的生化过程,重金属污染对反硝化作用的影响,因重金属种类的不同而不同^[23],本研究认为,土壤反硝化作用与 Cr(VI)灌溉浓度呈显著负相关,说明不同程度 Cr(VI)污染均抑制土壤反硝化作用。过氧化氢酶活性常作为土壤重金属污染程度的指标,不同种类重金属污染对过氧化氢酶活性的响应呈不同的趋势^[24-25],本试验结果显示,土壤过氧化氢酶活力与 Cr(VI)污灌浓度呈显著正相关,说明 Cr(VI)污灌促进了土壤过氧化氢酶活力的增加,笔者猜测,淹水条件下土壤微生物对外源 Cr(VI)的有效还原与土壤过氧化氢酶活力的提高存在某种内在关联,有关内容值得进一步研究。

表 3 水稻土微生物活性指标与 Cr(VI)灌溉浓度的相关性分析

生物活性指标 Indexes of bioactivity	生育期 Growth stages			
	分蘖期 tillering stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage
生物量碳 Biomass carbon	-0.961 6**	-1.000 0**	-0.999 9**	-0.992 7**
生物量氮 Biomass nitrogen	-0.992 1**	-0.998 7**	-0.998 4**	-0.995 1**
土壤基础呼吸 Soil basal respiration	-0.979 1**	-0.952 4**	-0.894 3*	-0.980 7**
脲酶活性 Urease activity	-0.988 8**	-0.930 8**	-0.986 1**	-0.908 2*
过氧化氢酶活性 Catalase activity	0.817 0*	0.888 4*	0.937 0**	0.974 2**
氨化作用 Ammonification activity	-0.854 6*	-0.596 1	-0.746 1	-0.777 7
反硝化作用 Denitration activity	-0.879 8*	-0.870 2*	-0.941 1**	—

重金属污染对土壤生物活性的影响是一个在土壤理化环境和生物环境共同作用下的动态过程,前人已广泛关注土壤理化因子对重金属污染生物毒性的影响,对于土壤生物背景尤其是作物生长发育周期背景与重金属污染生物毒性的互作机制尚缺乏深入了解。本文通过比较水稻不同生育时期土壤微生物活性对 Cr(VI)污灌的敏感性可知,土壤微生物生物量碳、生物量氮、反硝化活性以及脲酶活性对 Cr(VI)污灌敏感性总体上表现为生育前期高于生育后期,与水稻不同生育期土壤细菌数量对 Cr(VI)污灌敏感性的趋势基本一致^[20],笔者认为,水稻土缺氧环境下土壤微生物对外源 Cr(VI)的有效还原^[26],降低了水稻生育后期铬对土壤微生物的生物毒性是导致上述趋势的主要原因,此外,随着水稻生育进程的推进,水稻株体对土壤铬离子的吸收以及水稻根系分泌物种类和数量的变化也可能对土壤外源铬的微生物毒性产生影响。

土壤微生物生物量碳、生物量氮、基础呼吸以及生理代谢活性等微生物生理生态参数是近年来重金属污染土壤环境质量评价的重要生物学指标^[27-28],但上述参数对重金属污染的敏感程度及其稳定性可能不同程度地受重金属种类、形态及土壤理化、生物环境影响^[29],因此,选择这些指标来表征土壤重金属污染状况时可能存在不同程度的评价风险。本研究表明:微生物生物量碳、生物量氮、基础呼吸强度、脲酶活性、氨化作用以及反硝化活性均与 Cr(VI)灌溉浓度呈显著或极显著的负相关性,但各活性指标对 Cr(VI)胁迫的敏感性存在明显差异,其中,微生物生物量碳、生物量氮、基础呼吸强度以及脲酶活性与 Cr(VI)灌溉浓度负相关性较好,并且这种相关性在水稻整个生育期均比较稳定,因此作为水稻土 Cr(VI)污染的微生物评价指标较灵敏且相对稳定。

化学改良剂的施用是土壤重金属污染控制的途径之一,加 Si 处理可以明显缓解铬、镉、铜等重金属的植物毒性^[30-31],前文曾报道加 Si 处理可以不同程度地缓解 Cr(VI)对土壤细菌、放线菌以及真菌数量的影响,从本试验结果也可以看出,加 Si 处理对于缓解 Cr(VI)对土壤生物量碳、生物量氮、基础呼吸强度以及反硝化作用的抑制具有明显的积极意义,有关机制值得进一步深入研究。

参考文献:

[1] 周立祥, 胡霁堂, 戈乃玢, 等. 城市污泥土地利用研究[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 185-193.

- ZHOU Li-xiang, HU Ai-tang, GE Nai-fen, et al. Study on Utilization of municipal sewage sludge in farmland and forest Land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 185-193.
- [2] 姚 刚. 德国的污泥利用和处置[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(1): 45-47.
- YAO Gang. Sewage sludge treatment, use and disposal in germany[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2000, 13(1): 45-47.
- [3] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 298-308.
- SUN Tie-heng, ZHOU Qi-xin, LI Pei-jun. Pollution Ecology [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2001. 298-308.
- [4] Baath E. Effects of heavy metal in soil on Microbial processes and populations: a review[J]. *Water Air Soil Pollution*, 1989, 335-379.
- [5] Giller K E, Witter E, McGrath S P. Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 1389-1414.
- [6] 陈中云, 闵 航, 张夫道, 赵秉强, 等. 4 种重金属污染对稻田土反硝化细菌的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(3): 305-310.
- CHEN Zhong-yun, MIN Hang, ZHANG Fu-dao, et al. Effect of four kinds of heavy metal contamination on denitrifying bacteria in paddy soils[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(3): 305-310.
- [7] Roane T M, Pepper I L. Microbial responses to environmentally toxic cadmium[J]. *Micobiol Ecol*, 1999, 38(4): 358-364.
- [8] 仲维科, 樊耀波, 王敏健. 我国农作物的重金属污染及其防止对策[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 270-272.
- ZHONG Wei-ke, FAN Yao-bo, WANG Min-jian. Pollution of heavy metals on crops and its countermeasures in China[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(4): 270-272.
- [9] 王 威, 刘东华, 蒋梧生, 等. 铬污染地区环境对植物生长的影响. 农业环境保护, 2002, 21(3): 257-259.
- WANG Wei, LIU Dong-hua, JIANG Wu-sheng, et al. Effects of plant growth in the soil polluted by chromium[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(3): 257-259.
- [10] 赵 婷, 铁柏清, 等. 水稻种子及幼苗对钛、铬、钒的抗性研究[J]. 西南农业学报, 2007, 20(4): 625-629.
- ZHAO Ting, TIE Bo-qing, et al. Study on the resistance of hybrid rice seed and seedling to titanium chromium and vanadium compounds[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 20(4): 625-629.
- [11] 徐加宽, 王志强, 杨连新, 等. 土壤铬含量对水稻生长发育和产量形成的影响[J]. 扬州大学学报, 2005, 26(4): 61-66.
- XU Jia-kuan, WANG Zhi-qiang, YANG Lian-xin, et al. Effects of soil Cr concentration on growth and development and yield formation of rice [J]. *Journal of Yangzhou University(Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2005, 26(4): 61-66.
- [12] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 105-109.
- CHEN Huai-man. The behavior of chemical matter in soil and environmental quality[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2002: 105-109.
- [13] Sharma D C, Chatterjee C, Sharma C P. Chromium accumulation and

its effects on wheat (*Triticum aestivum* L. cv HD2204) metabolism[J]. *Plant Science (Limerick)*, 1995, 111(2): 145–151.

- [14] 张亚丽, 沈其荣, 王兴兵, 等. 猪粪和稻草对铬污染黄泥土生物活性的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2002, 8(4):488–492.
- ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, WANG Xing-bing, et al. Effect of organic manure on biological activities of Cr-contaminated soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4):488–492.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 30–109.
- BAO Shi-dan. Soil Agrochemical analysis. (third edition)[M]. Beijing: Agricultural Publishing Company of China, 2000.30–109.
- [16] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19:703–707.
- [17] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- XU Guang-hui, ZHENG Hong-yuan. Analytical handbook of soil microbes[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [18] 李阜棣, 喻子牛, 何绍江. 农业微生物学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- LI Fu-di, YU Zi-niu, HE Shou-jiang. Experimental Technique of Agricultural Microbiology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1996.
- [19] Yang Y S, Qiu R H, Yu X T, et al. Study on soil microbes and biochemical activity in the continuous plantations of *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Chinese Biodiversity*, 1999, 7(1):1–7.
- [20] 胡 健, 康贻军, 杨连新, 等. 水稻不同生育期土壤微生物区系对模拟 Cr(VI)污水灌溉的响应[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 94–97.
- HU Jian, KANG Yi-jun, YANG Lian-xin, et al. Response of soil microflora to stimulated Cr(VI) sewage treatment in different growth stages of rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4):94–97.
- [21] Babich H, Stotzky G. Developing standards for environmental toxicants: The need to consider abiotic environmental factors and microbe mediated ecological processes[J]. *Environ. Health Perspect*, 1983, 49: 247–260.
- [22] Wilke B M. Long-term effects of different inorganic pollutants on nitrogen transformations in a sandy cambisol[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1989, 7: 254–258.
- [23] 王淑芳, 胡连生, 纪有海, 等. 重金属污染黑土中固氮菌及反硝化菌作用强度的测定[J]. 应用生态学报, 1991, 2(2): 174–177.
- WANG Shu-fang, HU Lian-shen, JI You-hai, et al. Action in intensity of nitrogen-fixing and denitrifying bacteria in chernozem polluted by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(2): 174–177.
- [24] 刘敬武, 单爱琴, 揣小明, 等. 重金属离子 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 污染对土壤酶活性的影响[J]. 污染防治技术, 2008, 21(1): 19–22.
- LIU Jing-wu, SHAN Ai-qin, CHUAI Xiao-ming, et al. Effects of heavy metals (Cd^{2+} , Pb^{2+}) on soil enzyme activities[J]. *Pollution Control Technology*, 2008, 21(1): 19–22.
- [25] 李博文, 杨志新, 谢建治, 等. 土壤酶活性评价镉锌铅复合污染的可行性研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3):132–134.
- LI Bo-wen, YANG Zhi-xin, XIE Jian-zhi, et al. Possibility of enzyme activities as indicators of assessing soil compound contamination with cadmium, zinc and lead[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3):132–134.
- [26] 李 松, 曲 东. 厌氧环境下 Cr(VI)的微生物还原能力[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 107–112.
- LI Song, QU Dong. Reduction capabilities of microbial Cr(VI) in anaerobic environment[J]. *Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For (Nat Sci Ed)*, 2006, 34(10): 107–112.
- [27] 尹 君, 高如泰, 刘文菊, 等. 土壤酶活性与土壤 Cd 污染评价指标[J]. 农业环境保护, 1998, 18(3): 130–132.
- YIN Jun, GAO Ru-tai, LIU Wen-ju, et al. The activity of soil enzymes and the evaluation indexes for Cd pollution in soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1998, 18(3): 130–132.
- [28] 杨志新, 刘树庆. Cd、Zn、Pb 单因素及复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 15–18.
- YANG Zhi-xin, LIU Shu-qing. Effects of single element and compound pollution of Cd, Zn, Pb on soil enzyme activities[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 15–18.
- [29] Speir T W. Assessment of the feasibility of using CCA(copper, chromium and arsenic)-treated and boric acid-treated saw dust as soil amendments. II. Soil Biochemical and biological properties[J]. *Plant and Soil*, 1992, 142:249–258.
- [30] Iwasaki K, Maier P, Fecht M, et al. Leaf apoplastic silicon enhances manganese tolerance of cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159: 167–173.
- [31] Liang Y C, Chen Q, Liu Q, et al. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160: 1157–1164.