

猪场废水灌溉对潮土酶活性的影响

王 风, 黄治平, 张克强, 杨 军, 张金凤, 李晓光, 于 丹

(农业部环境保护科研监测所资源再生研究室, 天津 300191)

摘 要:通过天津杨柳青镇田间小区试验,研究了猪场废水原水、厌氧出水和仿生态塘与地下水稀释(1:5)灌溉以及厌氧出水高、中、低定额灌溉对潮土 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶活性及土壤有机碳和全氮的影响。结果表明,猪场废水灌溉显著增加土壤有机碳和全氮含量;中量厌氧水灌溉增强土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶活性,过高或过低量厌氧水灌溉降低土壤酶活性;原水、厌氧出水和仿生态塘水稀释灌溉对土壤酶活性也有显著影响;与对照(正常施肥和灌溉)相比,仿生态塘水稀释灌溉促进土壤脲酶活性;所有的稀释灌溉处理对土壤转化酶和过氧化氢酶活性均有抑制趋势,但其中仿生态塘水稀释灌溉处理的降幅较小。建议适宜的猪场养殖废水厌氧出水灌水定额为 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,适宜的稀释灌溉处理为仿生态塘水与地下水 1:5 的稀释比例。

关键词:猪场废水;灌溉;酶活性;厌氧水

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)08-1602-05

Effects of Swine Wastewater Irrigation on the Enzyme Activities in Fluvo-aquic Soil

WANG Feng, HUANG Zhi-ping, ZHANG Ke-qiang, YANG Jun, ZHANG Jin-feng, LI Xiao-guang, YU Dan

(Lab of Agro-waste to Resource, Institute of Agro-environmental Protection, MOA, Tianjin 300191, China)

Abstract: This study is to examine the effects of swine wastewater irrigation on the activity of urease, invertase and catalase as well as soil organic carbon (SOC) and nitrogen contents. Soil samples were collected at the depths of 0~20 cm and 20~40 cm of a fluvo-aquic soil on the basis of the field experiment in the county of Yangliuqing in Tianjin. Irrigation with swine wastewater significantly increased SOC and nitrogen content. The activity of urease, invertase and catalase increased by irrigating with middle quota of anaerobic water while sharply declined with too high or too low quota of anaerobic water irrigation. In addition, the different dilution wastewater of origin, anaerobic and eco-pond water also affected soil enzyme activities; the urease activity increased by irrigating with dilution eco-pond water compared with the control. The invertase and catalase activity were inhibited depending on the three dilution wastewater, but were slightly influenced by eco-pond water irrigation. It was suggested that the appropriate irrigation quota of anaerobic wastewater should be confined to $500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, appropriate dilution wastewater for irrigation was eco-pond water.

Keywords: swine wastewater; irrigation; soil enzymatic activities; anaerobic water

近年,世界范围展开废水灌溉实践和相关研究,特别在发展中国家。废水灌溉一方面为植物生长提供重要的养分,增加土壤有机质从而提高土壤肥力和生产力水平^[1]。另一方面,过量养分、有毒化学物质和病原体同时输入土壤-作物系统,从而降低土壤和作物生产力^[2],同时危害环境和人类健康^[3-4]。因此,应用传统意义上的废水,特别是工业或市政废水进行

灌溉时,如果管理不善可能会引起严重的生态或健康问题^[5]。土壤酶是一种生物催化剂,它参与土壤系统中诸多重要代谢过程^[6-7]。土壤酶活性易受环境中物理、化学和生物因素的影响。环境污染条件下土壤酶活性变化很大,可以在一定程度上反映环境状况^[8-11]。

目前,规模化猪场大都采用干清粪工艺,不仅大大降低废水中重金属等环境污染物质的浓度,含有的大量氮、磷元素也可供作物吸收利用,应用猪场废水进行农田灌溉,不仅对水资源进行再生利用,而且促进了营养物质的循环利用^[12]。本文通过应用猪场养殖废水灌溉土壤酶活性的测试,揭示原水、厌氧出水和仿生态塘出水稀释灌溉及厌氧出水不同灌水定额处

收稿日期:2008-12-09

基金项目:“十一五”国家科技支撑项目(2006BAD17B02);中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助

作者简介:王 风(1982—),男,黑龙江人,硕士,从事废水灌溉方面的研究。E-mail:wangfeng_530@163.com

理对土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶活性的影响,为评价猪场废水灌溉环境风险及制定科学灌溉制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验于 2007 年 9 月底至 2008 年 6 月中旬在天津市西青区杨柳青镇益利来养殖场内进行。该地区气候介于大陆性气候和海洋性气候之间,四季变化明显,年平均气温 11.0~12.5℃,≥0℃积温始于 3 月上旬,终于 11 月下旬,≥10℃活动积温 4 000~4 300℃,≥10℃初日在 4 月上旬,终日在 10 月下旬。多年平均降水量 577.8 mm,主要集中在 7—8 月,10 月份至翌年 6 月份冬小麦生长季节多年平均降水量 107.7 mm^[13]。年平均日照时数在 2 610~3 090 h 之间,年太阳总辐射在 125~135 kW·cm⁻² 之间,年无霜期为 180~190 d。作物种植制度为冬小麦-夏玉米轮作。供试土壤为潮土,耕层容重为 1.39 g·cm⁻³,田间持水量为 40.8%,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 62.2%、29.5%和 8.3%,土壤质地为砂壤土(美国制);耕层基础肥力全氮 0.66 g·kg⁻¹,铵态氮 4.94 mg·kg⁻¹,硝态氮 21.27 mg·kg⁻¹,全磷 0.60 g·kg⁻¹,速效磷 41.05 mg·kg⁻¹,有机质 1.12%,土壤 pH 值为 7.98。

试验小区面积 50 m²(10 m×5 m),供试冬小麦品种为京冬 8 号,2007 年 9 月 29 日播种,行距为 20 cm,2008 年 6 月 18 日收获。除水、肥因子外,其他按照冬小麦常规生产方式进行管理。试验设 8 个处理,每个处理 3 次重复。小区间用 1 m 深防水土工布隔离。冬小麦生育期灌溉 4 次水,分别为越冬水、返青拔节水、抽雄水和灌浆水,所有处理应用地下水(取自 6 m 深地下水井,下同)灌溉越冬水,其他生育期分别应用不同处理水进行灌溉,灌水方式为畦灌。灌溉用水分别为原水(猪圈舍干清粪后地下水冲洗直接流入预处理池的水)、厌氧水(原水经厌氧池处理后的出水)、仿生态塘水(厌氧水经曝气和植物吸收处理后的出水)及地下水,试验灌溉水质见表 1,地下水因含量极低而忽略不计。

1.2 试验设计

试验设以下厌氧出水灌水定额:处理一,厌氧出水高定额(830 m³·hm⁻²),简称厌高(H_{anae});处理二,厌氧出水中定额(500 m³·hm⁻²),简称厌中(M_{anae});处理三,厌氧出水低定额(160 m³·hm⁻²),简称厌低(L_{anae})。设以下稀释灌溉处理(灌水定额均为 830 m³·hm⁻²):处理四,厌氧水与地下水按 1:5 比例稀释,简称厌地 1:5(T_{anae:gw1:5});处理五,仿生态塘水与地下水按 1:5 比例稀释,简称塘地 1:5(T_{eco:gw1:5});处理六,地下水灌溉,简称地下水(T_{gw});处理七,原水与地下水按 1:5 比例稀释,简称原清 1:5(T_{ori:gw1:5});处理八,基施尿素和磷酸二铵分别为 355.5 g·区⁻¹和 1 115.5 g·区⁻¹,拔节期和灌浆期分别追施尿素 250 g·区⁻¹和 450 g·区⁻¹,地下水灌溉,简称对照(CK)。

1.3 研究方法

2008 年 6 月 18 日在作物收获时进行采样,在每个试验小区用土钻分别取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤作为供试土样,每个试验小区随机采 3 个样点,同层混合作为 1 次重复,样品采回后于室内进行风干、研磨备用。

土壤有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,土壤全氮采用半微量开氏法(K₂SO₄-CuSO₄-Se 蒸馏法)测定^[14]。土壤脲酶采用奈氏比色法测定(37℃培养 24 h);转化酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定(37℃培养 4 h);过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法(0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄, 30 min)测定^[15]。

1.4 数据处理

数据处理和图表绘制在 Excel 2003 下完成,试验结果的差异显著性检验、多重比较等统计分析采用 SAS9.0 软件完成^[16]。

2 结果与分析

2.1 猪场废水灌溉对土壤有机碳和全氮含量的影响

厌氧水不同定额灌溉对土壤有机碳和全氮含量呈现 H_{anae}>M_{anae}>L_{anae} 的趋势,见图 1,表明随厌氧水灌溉量的增加,土壤有机碳和全氮含量增加。猪场废水稀释灌溉土壤有机碳和全氮含量均呈现 T_{ori:gw1:5}>T_{eco:gw1:5}>

表 1 灌溉水水质

Table 1 The chemical composition of irrigation water

	NO ₃ -N/mg·L ⁻¹	NH ₄ -N/mg·L ⁻¹	TKN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	SS/mg·L ⁻¹
原水/Origin	1.97~3.04	823~900	323~2 417.51	29~277	760~7 722	386~3 306
厌氧水(Anaerobic)	1.81~3.21	740~810	300~1 447.80	7~102	305~2 266	154~753
仿生态塘水(Eco-ponds)	1.11~1.35	62~685	82~1 185.39	3~92	164~1 960	28~624

$T_{\text{anae:gw1:5}} > CK$ 、 T_{gw} 的趋势, $T_{\text{ori:gw1:5}}$ 处理因 COD 和氮素浓度最高, 所以土壤有机碳和全氮增幅最大; T_{gw} 因缺少物质输入, 所以土壤有机碳和全氮含量最低; $T_{\text{eco:gw1:5}}$ 处理导致较大的土壤有机碳和全氮增幅较大, 可能是灌溉时带入沉淀于仿生态塘底的污泥所致。

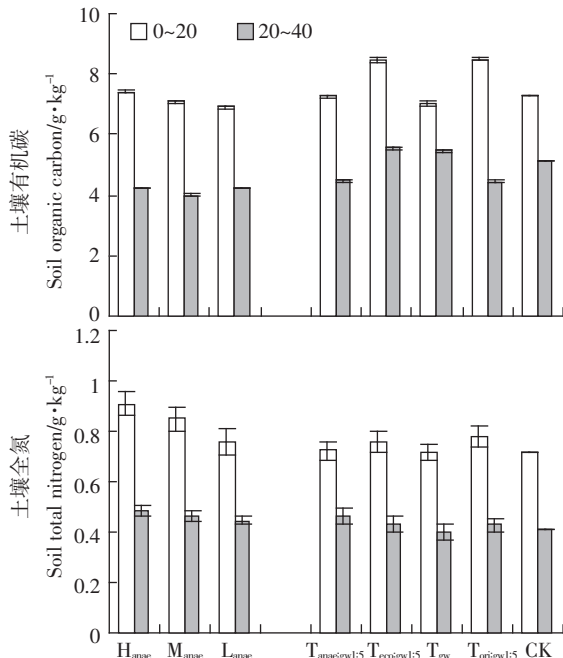


图 1 猪场废水灌溉对土壤有机碳和全 N 含量的影响

Figure 1 Effects of swine wastewater irrigation on soil organic C and total N contents

2.2 猪场废水灌溉对土壤脲酶活性的影响

猪场废水厌氧出水不同定额灌溉对土壤脲酶活性的影响见图 2。0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤脲酶的变化趋势大致为 $M_{\text{anae}} > L_{\text{anae}} > CK > H_{\text{anae}}$, 并且 20~40 cm 土层脲酶活性显著低于 0~20 cm 土层。Hanae 处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤脲酶含量平均比 CK 低 3% 和 8%, 说明 Hanae 处理抑制土壤脲酶的活性, 主要因为过量的铵态氮造成不协调的养分输入以及带入过多的污染物质抑制脲酶活性; M_{anae} 和 L_{anae} 处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤脲酶平均比 CK 高 3%、12% 和 1.7%、15%, 说明这两个处理促进土壤脲酶活性。

不同稀释废水灌溉对土壤脲酶活性的影响见图 2。0~20 cm 和 20~40 cm 土层脲酶活性分别呈现 $T_{\text{eco:gw1:5}} > CK$ 、 $T_{\text{anae:gw1:5}} > T_{\text{gw}} > T_{\text{ori:gw1:5}}$ 和 $T_{\text{eco:gw1:5}} > T_{\text{gw}} > T_{\text{anae:gw1:5}} > T_{\text{ori:gw1:5}}$ 、CK 的变化趋势, 表明 $T_{\text{eco:gw1:5}}$ 处理促进各层次土壤脲酶活性; CK 处理可能因为施肥而增强 0~20 cm 土层脲酶活性, 20~40 cm 土层则由于养分缺乏而

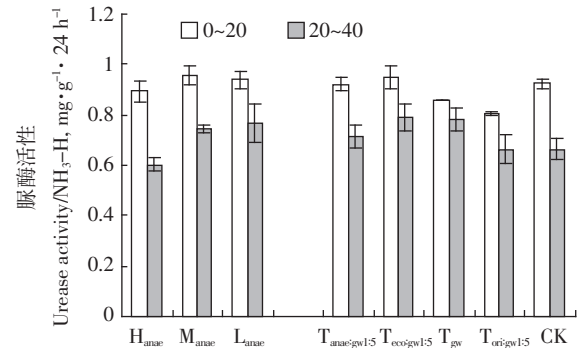


图 2 猪场废水灌溉对土壤脲酶活性的影响

Figure 2 Effects of swine wastewater irrigation on the activities of the urease

抑制脲酶活性; $T_{\text{ori:gw1:5}}$ 处理虽然输入最多的有机碳和养分, 但同时也输入最多的环境污染物质 (如重金属和抗生素), 这可能是造成该处理土壤脲酶活性最低的原因^[17]。

2.3 猪场废水灌溉对土壤转化酶活性的影响

猪场废水厌氧出水不同定额灌溉对土壤转化酶活性的影响见图 3。0~20 cm 和 20~40 cm 土层转化酶分别呈现 $M_{\text{anae}} > CK > H_{\text{anae}} > L_{\text{anae}}$ 和 $CK > L_{\text{anae}} > M_{\text{anae}} > H_{\text{anae}}$ 的变化趋势, 并且 20~40 cm 土层转化酶活性显著低于 0~20 cm 土层。M_{anae} 处理 0~20 cm 土层土壤转化酶含量分别比 CK、H_{anae} 和 L_{anae} 高 12.94%、36.80% 和 50.54%, 说明 M_{anae} 处理显著提高土壤转化酶的活性, L_{anae} 处理因较低的有机碳和养分输入抑制土壤转化酶活性。

不同稀释废水灌溉对土壤转化酶活性的影响见图 3。0~20 cm 和 20~40 cm 土层转化酶活性分别呈现 $CK > T_{\text{eco:gw1:5}} > T_{\text{anae:gw1:5}} > T_{\text{ori:gw1:5}} > T_{\text{gw}}$ 和 $CK > T_{\text{gw}} > T_{\text{eco:gw1:5}} > T_{\text{anae:gw1:5}} > T_{\text{ori:gw1:5}}$ 的变化趋势。与正常施肥处理相比, 猪场废水不同稀释废水灌溉能够抑制土壤转化酶活

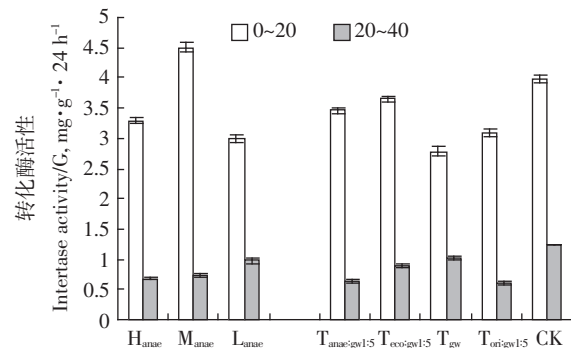


图 3 猪场废水灌溉对土壤转化酶活性的影响

Figure 3 Effects of swine wastewater irrigation on the activity of the invertase

性,但 $T_{eco:gw1:5}$ 处理土壤转化酶活性仅有轻微的降低, $T_{ori:gw1:5}$ 处理因为输入较多的污染物质而显著抑制各层土壤转化酶活性^[18]。

2.4 猪场废水灌溉对土壤过氧化氢酶活性的影响

猪场废水厌氧出水不同定额灌溉对土壤过氧化氢酶活性的影响见图4。0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤转化酶分别呈现 $M_{anae}>CK>H_{anae}>L_{anae}$ 和 $M_{anae}>CK>L_{anae}>H_{anae}$ 的变化趋势,并且各处理 20~40 cm 土层过氧化氢酶活性基本高于 0~20 cm 土层。 M_{anae} 处理因输入较适宜的有机碳和养分含量,所以显著提高土壤过氧化氢酶活性; H_{anae} 和 L_{anae} 处理则表现为抑制土壤脲酶活性,并且 L_{anae} 处理抑制能力较强。

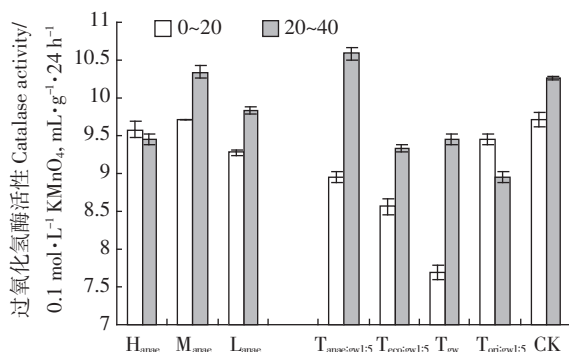


图4 猪场废水灌溉对土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 4 Effects of swine wastewater irrigation on the activity of the catalase

不同稀释废水灌溉对土壤过氧化氢酶活性的影响见图4。0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤过氧化氢酶活性分别呈现 $CK>T_{ori:gw1:5}>T_{anae:gw1:5}>T_{eco:gw1:5}>T_{gw}$ 和 $T_{anae:gw1:5}>CK>T_{gw}>T_{eco:gw1:5}>T_{ori:gw1:5}$ 的变化趋势,并且除了 $T_{ori:gw1:5}$ 处理,其他处理均呈现 20~40 cm 土层土壤过氧化氢酶活性高于 0~20 cm 土层。表明与正常施肥处理相比,稀释灌溉对土壤过氧化氢酶活性起抑制作用;另外, T_{gw} 处理 20~40 cm 土层过氧化氢酶活性较高的现象应值得关注。

通常来讲不同土壤酶之间以及与土壤有机质和全氮具有一定的相关性,对比已有的多次报道^[19-21],本研究并未得到与以往相似的结论,然而该结果也得到相关研究的支持^[22]。综合以往结论,认为污水灌溉条件下,土壤酶活之间以及与土壤有机质、全氮之间可能不存在相关关系,主要原因在于以往的结论主要在施肥或土地利用类型差异下得出的,而污水灌溉,特别是养殖废水灌溉过程不仅引入养分,同时也输入一定的污染物质,而原水、厌氧水、氧化塘水中养分和污

染物的组成均比较复杂,所以在养分和污染物质耦合作用于土壤酶活性时,就可能出现与以往不同的结论。当然,以上解释还有待于实验数据的验证。

3 结论

应用猪场废水厌氧出水灌溉后土壤酶活性发生一定变化。对于土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶来讲,总体表现为中定额灌溉($500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)的土壤中3种酶活性最高,厌氧出水高定额灌溉($830 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)或低定额灌溉($160 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)的厌氧水灌溉后均降低了土壤酶活性。猪场废水不同稀释废水灌溉诱导土壤酶活性发生适应性变化。仿生态塘水稀释灌溉土壤3种酶呈现较高的活性,是较低的污染物质含量以及较适宜的养分比例综合作用的结果。原水虽含有高浓度的有机碳和营养物质,但原水稀释灌溉的过程也输入了高浓度的污染物而抑制土壤酶活性,下一步应结合土壤重金属含量,特别是结合土壤铜、锌含量与土壤各酶活性的相关性分析^[23-24],用以确定猪场养殖废水灌溉条件下相应酶活性的指示性因子。

参考文献:

- [1] Munir J, Mohammad Rusan, Sami Hinnawi, Laith Rousan. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters[J]. *Desalination*, 2007, 215(1-3): 143-152.
- [2] Vazquezmontiel O, Horan N J, Mara D D. Management of domestic wastewater for reuse in irrigation[J]. *Water Sci Technol*, 1996, 33(10-11): 355-362.
- [3] Papadopoulos I. Wastewater management for agriculture protection in the Near East Region[R]. Technical Bulletin, FAO, Regional Office for the Near East, Cairo, Egypt, 1995.
- [4] 张晶, 张惠文, 丛峰, 等. 长期灌溉含多环芳烃污水对稻田土壤酶活性与微生物种群数量的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(8): 1193-1198.
ZHANG Jing, ZHANG Hui-wen, CONG Feng, et al. Effects of long-term PAHs-containing wastewater irrigation on lowland rice soil enzyme activities and microbial populations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1193-1198.
- [5] Mohammad M J, Ayadi M. Forage yield and nutrient uptake as influenced by secondary treated wastewater[J]. *J Pl Nutr*, 2004, 27(2): 351-365.
- [6] 贾继文, 聂俊华, 李絮花, 等. 蔬菜大棚土壤理化性状与土壤酶活性关系的研究[J]. *山东农业大学学报·自然科学版*, 2001, 32(4): 427-432.
JIA Ji-wen, NIE Jun-hua, LI Xu-hua, et al. Study on the relationship between the soil physical-chemical properties and soil enzymatic activity of plastic greenhouse[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2001, 32(4): 427-432.

- [7] Verstraete W, Voets J P. Soil microbial and biochemical characteristics in relation to soil management and fertility[J]. *Soil Biol Biochem*, 1977, 9:253-258.
- [8] 和文祥, 陈会明, 冯贵颖, 等. 汞镉砷元素污染的土壤酶监测研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3):338-343.
HE Wen-xiang, CHEN Hui-ming, FENG Gui-ying, et al. Study on enzyme index in soils polluted by mercury, chromium and arsenic[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3):338-343.
- [9] 和文祥, 马爱生, 武永军, 等. 砷对土壤脲酶活性影响的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5):895-898.
HE Wen-xiang, MA Ai-sheng, WU Yong-jun, et al. Effect of arsenic on soil urease activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5):895-898.
- [10] 滕 应, 黄昌勇, 龙 健, 等. 铜尾矿污染区土壤酶活性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):1976-1980.
TENG Ying, HUANG Chang-yong, LONG Jian, et al. Enzyme activities in soils contaminated by abandoned copper tailings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1976-1980.
- [11] 王友保, 张 莉, 刘登义. 灰渣场土壤酶活性与植被和土壤化学性质的关系[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1):110-112.
WANG You-bao, ZHANG Li, LIU Deng-yi. Relationship among soil enzyme activities, vegetation state, and soil chemical properties of coal cinder yard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1):110-112.
- [12] Rahil M H, Antonopoulos V Z. Simulating soil water flow and nitrogen dynamics in a sunflower field irrigated with reclaimed wastewater[J]. *Agric Water Management*, 2007, 92(3):142-150.
- [13] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报, 2004, 35(2):77-82, 87.
LIU Xiao-ying, LIN Er-da. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(2):77-82, 87.
- [14] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Analysis methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986.
- [16] SAS/STAT User's Guide. Ver. 9. 0, 4th ed[M]. SAS Institute, Cary, NC. 1989.
- [17] 许 超, 夏北成, 冯 涓. 酸性矿山废水污染对稻田土壤酶活性影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5):1803-1808.
XU Chao, XIA Bei-cheng, FENG Juan. Effect of acid mine drainage on soil enzymatic activities in a contaminated paddy soils [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(5):1803-1808.
- [18] 罗 虹, 刘 鹏, 宋小敏. 重金属镉、铜、镍复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2):94-96.
LUO Hong, LIU Peng, SONG Xiao-min. Effect of compound pollution of Cd, Cu and Ni on soil enzyme activities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2):94-96.
- [19] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤酶活性和养分特征[J]. 生态环境, 2008, 17(5):2050-2058.
DONG Li-li, ZHENG Fen-li. Characteristics of soil enzyme activities and nutrients under various landuse in the loessial hilly-gully region [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5):2050-2058.
- [20] 万忠梅, 宋长春. 三江平原不同类型湿地土壤酶活性及其与营养环境的关系[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5):158-161.
WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun. Soil enzyme activity and its relationship with the soil nutrient environment of different types wetland in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5):158-161.
- [21] 王 灿, 王德建, 孙瑞娟, 等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J]. 生态环境, 2008, 17(2):688-692.
WANG Can, WANG De-jian, SUN Rui-juan, et al. The relationship between soil enzyme activities and soil nutrients by long-term fertilizer experiments[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):688-692.
- [22] 何 艺, 谢志成, 朱 琳. 不同类型水浇灌对已污染土壤酶及微生物量碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2227-2232.
HE Yi, XIE Zhi-cheng, ZHU Lin. Effects of reclaimed water irrigation on soil enzyme and soil microbial biomass carbon in paddy soil of wastewater irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2227-2232.
- [23] Lorenz N, Hintemann T, Kramarewa T, et al. Response of microbial activity and microbial community composition in soils to long-term arsenic and cadmium exposure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6):1430-1437.
- [24] Malley C, Nair J, Ho G. Impact of heavy metals on enzymatic activity of substrate and on composting worms *Eiseniafetida*[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(13):1498-1502.