

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第21期 Vol.32 No.21 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 21 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目次

白洋淀富营养化湖泊湿地厌氧氨氧化菌的分布及对氮循环的影响.....	王衫允,祝贵兵,曲冬梅,等 (6591)
造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地土壤酶活性的响应.....	夏孟婧,苗颖,陆兆华,等 (6599)
图们江下游湿地生态系统健康评价.....	朱卫红,郭艳丽,孙 鹏,等 (6609)
适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法.....	陈 展,林 波,尚 鹤,等 (6619)
基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应.....	梁 婕,蔡 青,郭生练,等 (6628)
崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性.....	章振亚,丁陈利,肖 明 (6636)
中国东部亚热带地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的谐波分析.....	赵兴云,李宝惠,王 建,等 (6647)
甘肃臭草型退化草地优势种群空间格局及其关联性.....	高福元,赵成章 (6661)
川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应.....	谭 波,吴福忠,杨万勤,等 (6670)
模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响.....	邓华卫,布仁仓,刘晓梅,等 (6679)
苹果三维树冠的净光合速率分布模拟.....	高照全,赵晨霞,张显川,等 (6688)
拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响.....	郝玉敏,戴传超,戴志东,等 (6695)
落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系.....	苏冬雪,王文杰,邱 岭,等 (6705)
人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征与空间格局对比研究.....	张永宽,陶 冶,刘会良,等 (6715)
山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例.....	王 强,袁兴中,刘 红 (6726)
荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系.....	吴忠鑫,张 磊,张秀梅,等 (6737)
北黄海秋、冬季浮游动物多样性及年间变化.....	杨 青,王真良,樊景凤,等 (6747)
鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建.....	蒙古军,朱利凯,杨 倩,等 (6755)
村落文化林与非文化林多尺度物种多样性加性分配.....	高 虹,陈圣宾,欧阳志云 (6767)
不同生计方式农户的环境感知——以甘南高原为例.....	赵雪雁 (6776)
两种预测模型在地下水动态中的比较与应用.....	张 霞,李占斌,张振文,等 (6788)
四川黄龙沟少花鹤顶兰繁殖成功特征.....	黄宝强,寇 勇,安德军 (6795)
硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响.....	杨 扬,孟德龙,秦红灵,等 (6803)
新疆两典型微咸水湖水体免培养古菌多样性.....	邓丽娟,娄 恺,曾 军,等 (6811)
白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与环境因子的相关性.....	赵玉娟,李凤超,张 强,等 (6819)
双酚 A 对萼花臂尾轮虫毒性及生活史的影响.....	陆正和,赵宝坤,杨家新 (6828)
孵化温度对双斑锦蛇初生幼体行为和呼吸代谢的影响.....	曹梦洁,祝 思,蔡若茹,等 (6836)
黄玛草蛉捕食米蛾卵的功能反应与数值反应.....	李水泉,黄寿山,韩诗畴,等 (6842)
互惠-寄生耦合系统的稳定性.....	高 磊,杨 燕,贺军州,等 (6848)
超微七味白术散对肠道微生物及酶活性的影响.....	谭周进,吴 海,刘富林,等 (6856)
专论与综述	
氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响.....	陈 浩,莫江明,张 炜,等 (6864)
全球 CO_2 水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展.....	赵旭辉,孔繁翔,谢薇薇,等 (6880)
跨界自然保护区——实现生物多样性保护的新手段.....	石龙宇,李 杜,陈 蕾,等 (6892)
研究简报	
会同和朱亭 11 年生杉木林能量积累与分配.....	康文星,熊振湘,何介南,等 (6901)
退化草地阿尔泰针茅生殖株丛与非生殖株丛的空间格局.....	任 珩,赵成章,高福元,等 (6909)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 35 * 2012-11



封面图说: 白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊湿地。淀区内沟壕纵横交织错落,村庄、苇地、园田星罗棋布,在水文、水化学、生物地球化学循环以及生物多样性等方面,具有非常复杂的异质性。随着上游城镇污废水、农田径流进入水域,淀区富营养化日益加剧。复杂的水环境特点、高度的景观异质性和良好的生物多样性,使得该地区成为探索规模性厌氧氨氧化反应的良好研究地点(详见本期第 6591—6598 页)。

彩图提供: 王为东博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: wdwangh@yahoo.com

DOI:10.5846/stxb201109161358

夏孟婧, 苗颖, 陆兆华, 谢国莉, 裴定宇. 造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地土壤酶活性的响应. 生态学报, 2012, 32(21): 6599-6608.

Xia M J, Miao Y, Lu Z H, Xie G L, Pei D Y Y. Responds of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6599-6608.

造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地 土壤酶活性的响应

夏孟婧¹, 苗颖¹, 陆兆华^{1,2,*}, 谢国莉³, 裴定宇⁴

(1. 中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083; 2. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256600;

3. 北京电子科技职业学院, 北京 100029; 4. 北京计科能源新技术开发公司环境事业部 北京 100038)

摘要:经生物塘处理后的造纸废水矿化度低, 有机物质含量高, 可用来改善滨海盐碱土壤。研究了不同量(每次灌溉深度为 5、10、15 和 20 cm)处理后的造纸废水灌溉对土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、脱氢酶和过氧化氢酶活性的影响, 通过酶活性的变化来反映对土壤改良的效果并寻求最佳灌溉量。结果表明: 5 种土壤酶上层(0—10 cm)和 中层土壤(10—20 cm)的活性大于下层土壤(20—30 cm), 造纸废水灌溉没有改变土壤酶活性在不同土层的分布规律; 灌溉造纸废水对土壤脲酶和磷酸酶活性的提高主要发生在表层土壤, 而对蔗糖酶、脱氢酶以及过氧化氢酶活性的提高主要发生在上层和中层土壤; 20 cm 灌溉对下层土壤酶活性的提高最明显。5 种酶活性均受温度降雨等因素影响, 最大值出现在 8 月份。总体上, 灌溉量的增加能提高酶活性的增加程度, 最佳灌溉量为 20 cm, 土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和脱氢酶相对对照分别提高了 70.0%、30.9%、56.2%、135.2% 和 20.84%。酶活性与土壤盐碱度和微生物代谢商(qCO_2)显著负相关, 与速效磷和微生物量碳显著正相关, 与有机质和速效氮相关性不显著。

关键词:造纸废水; 灌溉; 滨海退化盐碱湿地; 改良; 土壤酶

Responds of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent

XIA Mengjing¹, MIAO Ying¹, LU Zhaohua^{1,2,*}, XIE Guoli³, PEI Dingyu⁴

1 Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Eco-environmental Science for Yellow River Delta in Shandong Province, Binzhou, Shandong 256600, China

3 Biotechnology Department of Beijing Vocational College of Electronic Science, Beijing 100029, China

4 Beijing Jike Energy New Technology Development Co., Beijing 100038, China

Abstract: Yellow River Delta, which is surrounded by Bohai Sea to the north and Laizhou Bay to the east, is one of the three largest deltas in China. However, large amounts of water and salts that were brought by penetration of water in the Yellow River and encroachment of sea water resulted in the rise of groundwater level and salinization. Under the influence of strong evaporation, the soil degraded into saline soil. Currently, up to around 1670 km² of land have turned into saline soil in the Yellow River Delta. Thus, it is urgent to ameliorate the saline soil for the assurance of ecological security and coordinated development of economy and ecology. Treated paper mill effluent was low in salinity and high in organic matter, and could be used to restore saline soil. Irrigation with treated paper mill effluent could enrich soil nutrients, improve soil activity and leach soil salts, and meanwhile it could solve the disposal problem of paper mill effluent. Thus, different

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2010BAC68B01, 2006BAC01A13); 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAC02B01); “十一五”国家科技支撑项目

收稿日期: 2011-09-16; 修订日期: 2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luzhaohua@cumt.edu.cn

depths (viz. 5, 10, 15 cm and 20 cm) of treated paper mill effluent were irrigated for remediation of saline soil in this study. In addition, anti-waterlogging ditches were built around the plots for discharging leached soil salts. Soil enzyme activities, which can reflect soil fertility, are important parameters for evaluating soil quality. Five enzymes, viz. urease, phosphatase, sucrase, dehydrogenase and catalase, were used to evaluate the effectiveness of saline soil remediation. Under the multi-influences of soil water content, temperature, aeration, nutrients and salts, soil enzyme activities were higher in soil layers of 0—10 cm and 10—20 cm than those in soil layer of 20—30 cm. Irrigation did not change the distribution of soil enzymes in the different soil layers. The improvements of urease and phosphatase mainly achieved in soil layer of 0—10 cm, and those of sucrase, dehydrogenase and catalase mainly achieved in both soil layers of 0—10 cm and 10—20 cm. Irrigation rate of 20 cm was the most effective in improving soil enzyme activities in lower soil layer (20—30 cm). The five enzymes also presented regular seasonal dynamics, all reaching the highest level in August. Irrigation with treated paper mill effluent, salinity (2080 mg/L) of which was very low compared to the present saline soil (2.31%), was effective in reducing soil salinity. Thus, inhibition of soil salinity to enzymes was reduced. In addition, irrigation with treated paper mill effluent introduced abundant of substrates for enzymes. Consequently, all the five enzyme activities were significantly improved. In general, higher irrigation rates were more effective in the improvement of enzyme activities and 20 cm turned out to be the optimum irrigation rate. Compared to the control, the activities of urease, phosphatase, sucrose, dehydrogenase and catalase were improved by 70.0%, 30.9%, 56.2%, 135.2% and 20.84%, respectively. The results also showed that in the studied saline soil, the five soil enzyme activities presented significantly negative correlation with soil salinity, sodicity and microbial metabolic quotient (qCO_2), and significantly positive correlation with available phosphorus and microbial biomass carbon, while no significant correlation with soil organic matter and available nitrogen due to the different dynamics over time after irrigation.

Key Words: paper mill effluent; irrigation; degraded coastal saline wetlands; remediation; soil enzymes

黄河三角洲是我国三大三角洲之一,位于渤海西岸、渤海湾和莱州湾湾口。黄河水侧渗、引黄河水、海水侵染和风暴潮侵袭给黄河三角洲带来大量的水分和盐分,成为该地区土壤盐碱化的重要物质基础。水分和盐分进入地下水系统导致地下水位上升,在强烈的蒸发作用下,土壤向盐渍化方向发展^[1];同时三角洲新生土地成土历程短、熟化程度低、土壤养分少^[2]。目前,黄河三角洲地区已经有大约 1670 km² 的土地退化成了盐碱地^[3],导致了大量土地资源的浪费并严重影响了当地的生态安全。近年来,黄河三角洲实施了高效生态经济的发展规划,改良黄河三角洲地区滨海盐碱湿地、恢复绿色生态屏障是发展高效生态经济的重要保障。

已有研究报道采用引黄河水灌溉压盐的方法改良黄河三角洲地区退化盐碱湿地并取得一定成效^[4],但由于工程费用巨大而难以推广。另外,该区域年蒸发量远大于降水量,干旱缺水,加之地下水矿化度高而无法用于灌溉压盐。因此,水成为该地区盐碱地改良的瓶颈。国内外大量研究表明采用再生水或废水灌溉可以提高土壤养分和活性^[5-10],但是尚无研究报道不同灌溉量的改良效果。不合理的废水灌溉方式会加剧土壤盐碱化^[9,11-12],Qadir 等人^[13]提出利用非淡水灌溉的关键在于土壤盐分的充分淋溶和完善的排水系统。结合当地条件,本研究采用经过处理后的造纸废水灌溉来改良退化盐碱地,同时修建降渍沟将盐分排出土壤。由于处理后的造纸废水的矿化度和有机污染物含量均显著降低,结合降渍沟,灌溉后不但不会造成土壤盐分的累积,还能起到提高土壤养分和活性的作用。马欣等人^[14]已报道了该改良措施对退化盐碱湿地土壤理化性质的影响,结果表明土壤 pH 值略有升高,但未加重土壤碱化,土壤水溶性总盐、Na⁺ 和 Cl⁻ 均降低,土壤养分(有机质、碱解氮、速效磷)均升高。

土壤酶是由微生物、动植物活体分泌及植物残骸分解释放于土壤中的一类具有催化能力的生物活性物质;酶活性在一定程度上反映了土壤肥力和活性状况,是评价土壤水平高低的重要指标。本文通过研究造纸废水灌溉对土壤酶活性的改变来反映盐碱土壤改良的效果并寻求最佳灌溉量,同时探讨在盐碱水平下土壤酶

活性和其他性质的相关性。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄河三角洲地区沾化县北约 10 km 处的滨海盐碱地 (37°46'37.6"N, 118°07'37.9"E), 见图 1A。由于该区域属于东亚温暖带大陆季风性气候, 平均降水量约 600 mm/a, 蒸发量 1800—2000 mm/a, 年平均气温 12.5 ℃。该地区淡水资源紧缺, 引用黄河水获取淡水资源工程费用高, 无法大范围实施。高矿化度地下水的大量农用、海水倒灌以及高蒸发量导致该地区土壤盐碱化, 区域内土壤呈现不同的盐碱化程度。本实验选取约 10000 m² 重度盐碱地为试验区, 区域内几乎没有植物生长, 为光板地, 土壤属于滨海石灰性潮土, 表面有大量盐析出, 土体构型多有厚粘层, 基本性质见表 1。

表 1 试验区土壤基本性质

Table 1 Soil properties of experimental region

指标 Index	数值 Value	指标 Index	数值 Value
pH	7.890±0.03	容重 Bulk density /(g/cm ³)	1.60±0.02
水溶性总盐 Total soluble salt/%	2.310±0.14	有机质 Organic matter (g/kg)	7.79±0.71
速效氮 Available N /(mg/kg)	11.360±1.84	速效磷 Available P (mg/kg)	8.09±0.44
速效钾 Available K /(mg/kg)	294.800±36.51	总氮 Total N (g/kg)	0.55±0.16
总磷 Total P /(g/kg)	0.630±0.03	总钾 Total K (g/kg)	21.15±4.35
微生物量碳 Microbial biomass C /(mg/kg)	30.890±1.56	土壤呼吸 Soil respiration /(mg CO ₂ -C kg ⁻¹ d ⁻¹)	46.82±1.79
脲酶活性 Urease activity /(mg NH ₃ -N g ⁻¹ d ⁻¹)	0.056±0.008	磷酸酶活性 Phosphatase activity /(mg PNP g ⁻¹ d ⁻¹)	0.11±0.004
蔗糖酶 Sucrase activity /(mg GLU g ⁻¹ d ⁻¹)	0.530±0.03	脱氢酶活性 Dehydrogenase activity /(μg TPF g ⁻¹ 20h ⁻¹)	2.41±0.08
过氧化氢酶活性 Catalase activity /(ml 0.01 mol/L KMnO ₄ g ⁻¹)	2.320±0.28		

数据为平均值±标准偏差 (n=15)

1.2 试验设计

沾化县某造纸厂在该试验区附近建立造纸废水生物塘处理系统, 工艺流程为: 原水→调节塘→厌氧塘→好氧塘→兼性塘→储存塘。原水和储存塘废水水质见表 2, 本实验采取储存塘出水对重度盐碱地进行灌溉; 可看出, 处理后的造纸废水水质得到很大程度的改善。对试验田进行修整、分区 (图 1B), 小区间的排碱沟 (1—7) 以及两侧的主降渍沟 (8 和 9) 用以排水。另外, 各小区间均深埋土工布 30 cm 做隔离, 以防相互影响。2007 年 8 月份开始对其中 5 个小区分别灌溉了 0 cm (CK)、5 cm (I5)、10 cm (I10)、15 cm (I15) 和 20 cm (I20) 深度的废水, 灌溉后, 待通过蒸发和下渗地面没有积水后, 并晾田 1 周后再以相同方式进水; 冬季 (2007 年 12 月份—2008 年 3 月份) 停止灌水。另一小区为翻耕处理, 现不考虑, 本文仅分析废水灌溉小区。

表 2 造纸厂原水和储存塘废水水质

Table 2 Characteristics of paper mill raw effluent and effluent from storage pond

	pH	化学需氧量 COD /(mg/L)	五日生化 需氧量 BOD ₅ /(mg/L)	总氮 TN /(mg/L)	总磷 TP /(mg/L)	矿化度 Salinity /(mg/L)	钠离子 Na ⁺ /%
原水 Raw effluent	8.50	2500	750	60.47	9.56	2750	0.15
储存塘废水 Effluent from storage pond	7.44	957	84	28.43	7.22	2080	0.12

1.3 试验方法

1.3.1 土壤样品采集

小区土壤采样按 S 型设置 5 个采样点, 每个采样点按剖面分 0—10 cm、10—20 cm 以及 20—30 cm 三层,

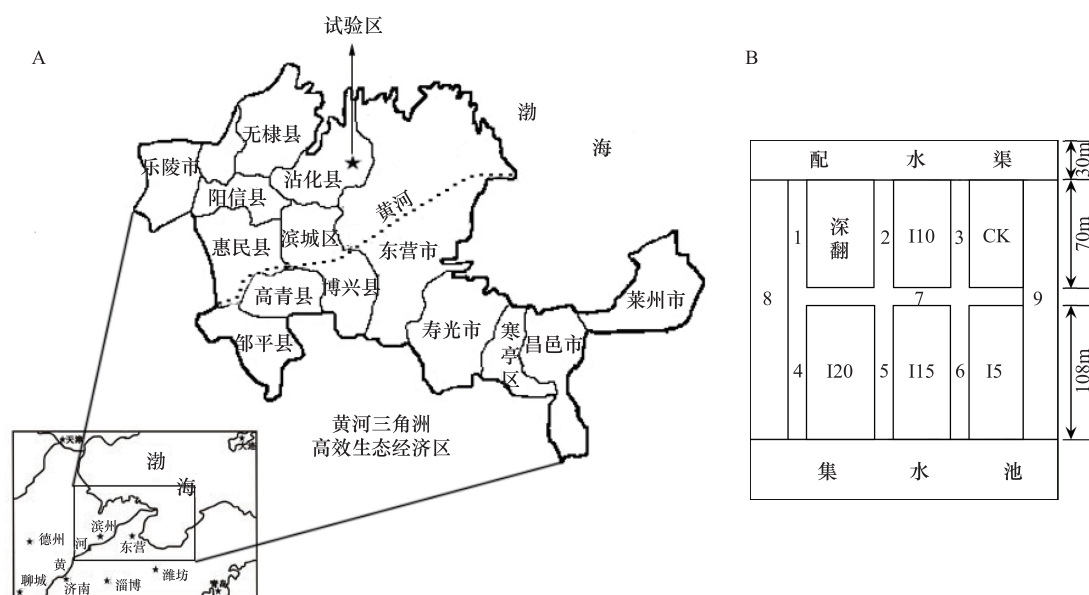


图1 试验区域位置(A)和野外试验设计示意图(B)

Fig.1 Location of study region (A) and field experimental design (B)

分别于2007年5月份、2007年8月份、2007年11月份和2008年3月份进行采样。采集的新鲜土样一部分用来测定土壤微生物量性质,另一部分适当自然风干后磨碎、过2 mm筛,4℃条件下密封保存以待测各项指标。

1.3.2 样品测定方法

水质指标参照《水和废水监测方法》^[15];土壤理化性质参照《土壤农化分析》^[16];土壤微生物碳量采用氯仿熏蒸浸提法,土壤呼吸采用NaOH吸收法^[17];脲酶采用苯酚钠比色法,以 $\text{mg NH}_3\text{-N g}^{-1}\text{d}^{-1}$ 表示;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,以 $\text{mg PNP g}^{-1}\text{d}^{-1}$ 表示;蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,以 $\text{mg GLU g}^{-1}\text{d}^{-1}$ 表示;脱氢酶采用氯化三苯四氯唑(TTC)法,以 $\text{ug TPF g}^{-1}\text{d}^{-1}$ 表示;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,以 $\text{mL 0.01mol/L KMnO}_4 \text{ g}^{-1}$ 干土表示;其中,测定脲酶、磷酸酶和蔗糖酶时均是在37℃恒温箱培养24 h,测定脱氢酶是在30℃恒温箱培养20 h^[18]。

1.4 数据分析

采用SPSS统计软件利用单因素方差分析(ANOVA)对实验数据差异性进行显著性分析,利用最小显著差异(LSD)多重比较方法分别对不同土壤深度之间和不同造纸废水灌溉量之间的两两差异性进行比较分析;同时采用SPSS对土壤酶活性和其他土壤性质如土壤含盐量、钠吸附比(SAR)、有机质、速效氮、速效磷、微生物量碳、土壤呼吸和微生物代谢商($q\text{CO}_2$)做相关性分析。

2 结果分析与讨论

土壤酶活性在不同土层深度呈现出一定的差异性,5种酶表现出不同的土层分布规律;造纸废水灌溉改善了土壤酶活性,但没有改变其在不同土层的分布情况。土壤酶还受温度降水等气候性因素的影响,具有一定的季节性变化规律。5种酶活性表现出相同的季节性变化规律:从5月份到8月份,随着气温的升高,酶活性随之升高,之后随气温下降呈现降低趋势。

2.1 造纸废水灌溉对土壤脲酶活性的影响

脲酶是对土壤有机氮分解转化起重要作用的一种专性酶,主要分解有机氮转化过程中形成的尿素,使其转化为 NH_3 ,从而被植物吸收利用。造纸废水富含氮素(表2),灌溉带来的大量有机氮为土壤脲酶提供了充分的反应基质,从而提高了脲酶活性。从图2可看出,在灌溉造纸废水之前(5月份)各块小区脲酶活性表现出显著性差异,表明该试验区域土壤脲酶活性不均。土壤脲酶活性在本试验区域的空间分布规律为:10—20 cm > 0—10 cm > 20—30 cm(图2)。大量研究报道土壤脲酶活性和总氮相关,但本试验中脲酶和土壤总氮却

表现出不同的空间分布情况,总氮在不同土层中分布情况为:0—10 cm (0.62 g/kg) > 10—20 cm (0.52 g/kg) > 20—30 cm (0.41 g/kg)。这主要是由土壤盐分引起的,土壤盐分在从上到下的3层土壤中含量分别为3.3%、1.4%和1.0%,表层大量盐分抑制了土壤酶活性。造纸废水灌溉提高了土壤脲酶的活性,但对不同土层的提高程度不同。I5—I20各处理平均值在0—10 cm、10—20 cm和20—30 cm分别相对对照提高了79.5%、37.1%和50.1%,表明灌溉对表层土壤的提高率最大。这是因为造纸废水灌溉后土壤表层相对中下层累积了更多的有机氮。差异显著性分析表明不同量造纸废水灌溉对各土层酶活性的提高程度也不同,0—10 cm和10—20 cm土层各灌溉处理均显著高于对照,而20—30 cm土层只有I20显著高于对照,表明只有高灌溉量才能提高深层土壤脲酶活性。

在季节性因素和灌溉共同的作用下,各小区灌溉翌年3月份脲酶活性和灌溉前相比均增加,分别提高了53% (CK),28.2% (I5),46.4% (I10),232.0% (I15)以及200.6% (I20),I15和I20的提高率远大于CK,表明灌溉15 cm和20 cm造纸废水可以显著提高土壤脲酶活性。

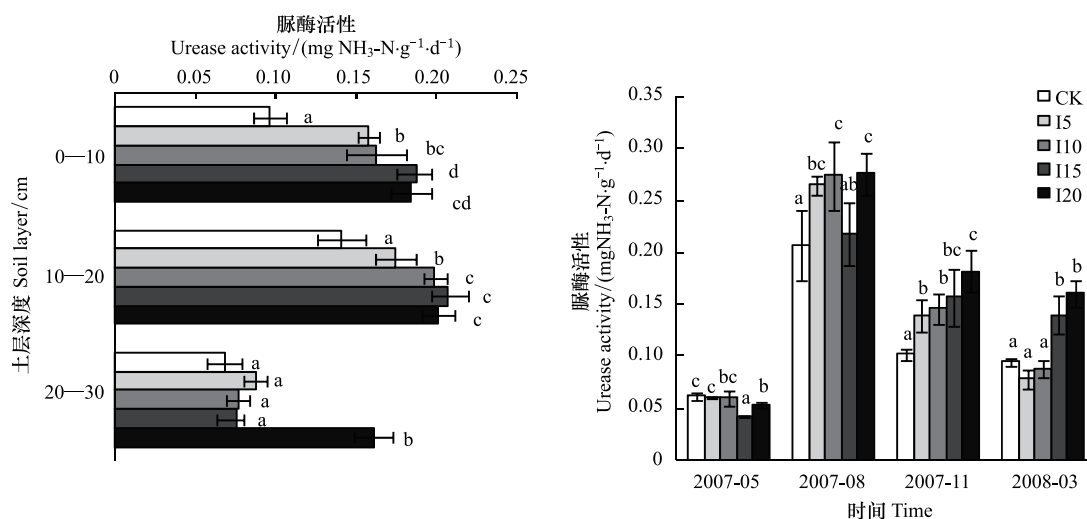


图2 不同量造纸废水灌溉下不同土层深度和不同时间脲酶活性的变化

Fig. 2 Change of urease activity in different soil layers and different times under the influence of irrigation with different amounts of treated paper mill effluent

不同字母表示不同处理在同一土层深度或同一时间显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 造纸废水灌溉对土壤磷酸酶活性的影响

土壤磷酸酶水解有机磷化合物,为植物生长提供无机磷。磷酸酶活性是土壤有机磷矿化潜力和微生物活性的重要指标。土壤磷酸酶在不同土层的分布规律表现为:0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm (图3),和土壤总磷分布一致;表明和脲酶相比,磷酸酶活性受土壤盐分的抑制作用较小。I5—I20各处理磷酸酶活性平均值在0—10、10—20 cm和20—30 cm分别相对对照提高了42.0%、5.5%和17.7%,表明灌溉造纸废水主要提高了表层土壤的磷酸酶活性,这是由于造纸废水富含磷素(表2),灌溉在土壤表层累积了大量磷酸酶的反应基质有机磷。差异显著性分析进一步证实了此结果,不同量灌溉均显著提高了0—10 cm土层磷酸酶活性,而10—20 cm土层各灌溉处理磷酸酶活性均不显著高于对照,20—30 cm土层只有I10和I20显著高于对照。从图3可看出此试验样地各小区土壤磷酸酶分布均匀,各小区间差异不显著。磷酸酶随时间变化没有脲酶明显,最高活性也在8月份。灌溉造纸废水后在2008年3月份,只有I20显著高于对照,比对照高30.9%,表明只有灌溉20 cm的造纸废水显著提高了磷酸酶的活性。

2.3 造纸废水灌溉对土壤蔗糖酶活性的影响

土壤蔗糖酶参与碳水化物的转化,将蔗糖水解成植物以及土壤微生物可直接利用的葡萄糖和果糖。土壤蔗糖酶也表现出0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm的空间分布规律(图4)。造纸废水灌溉主要提高了0—

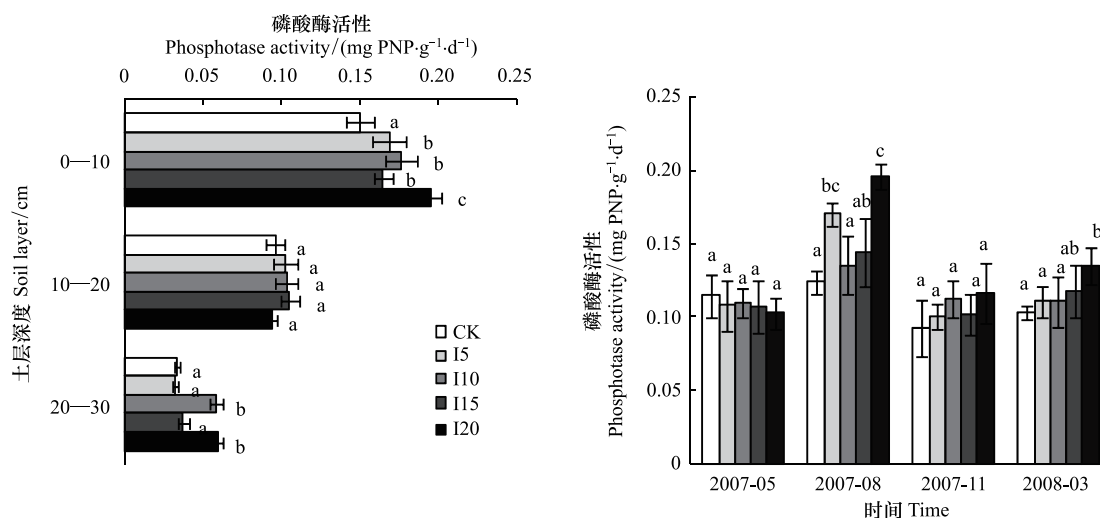


图3 不同量造纸废水灌溉下不同土层深度和不同时间磷酸酶活性的变化

Fig. 3 Change of phosphatase activity in different soil layers and different times under the influence of irrigation with different amounts of treated paper mill effluent

不同字母表示不同处理在同一土层深度或同一时间显著差异 ($P < 0.05$)

10 cm 和 20—30 cm 土层的蔗糖酶活性, I5—I20 各处理平均值分别相对对照提高了 58.7% 和 58.0%, 且不同量灌溉均显著高于对照; 10—20 cm 土层蔗糖酶活性提高了 16.6%, 仅 I20 显著高于对照。所有处理土壤蔗糖酶活性在 4 次不同采样时间均表现出两两显著差异 ($P < 0.05$), 表明蔗糖酶活性随季节性变化非常明显, 波动很大 (图 4)。2008 年 3 月份蔗糖酶活性和灌溉前相比分别提高了 83.2% (CK), 123.5% (I5), 152.4% (I10), 205.1% (I15) 以及 194.8% (I20)。所有灌溉处理提高率均明显高于对照, 表明造纸废水灌溉可显著提高土壤蔗糖酶活性并且在 0—15 cm 灌溉量范围内随灌溉量的增加而增加; 20 cm 灌溉量对蔗糖酶的提高率反而低于 15 cm, 可能是由于较高量造纸废水灌溉所带来的污染物对蔗糖酶有一定的抑制作用, 但抑制作用不显著。

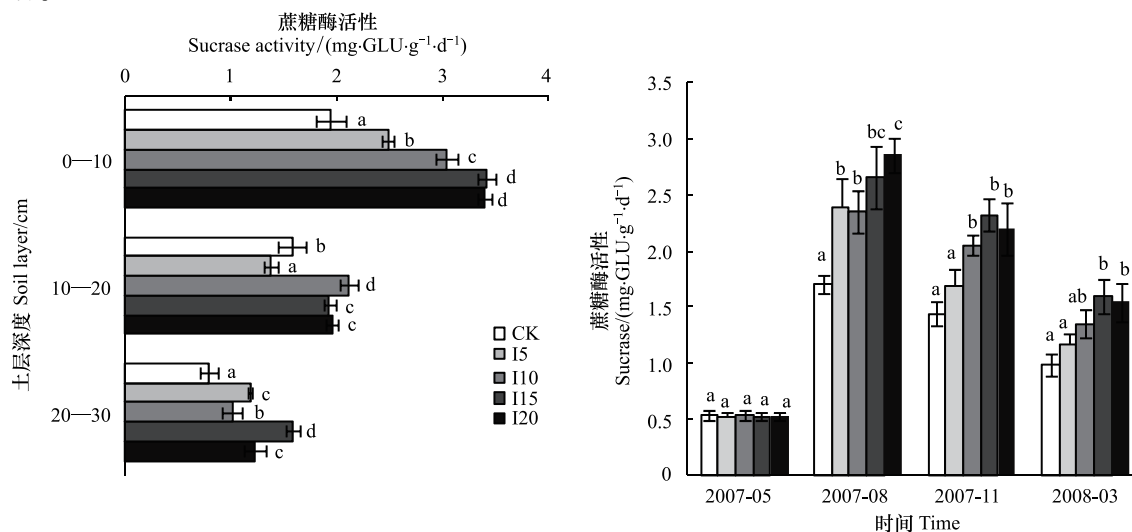


图4 不同量造纸废水灌溉下不同土层深度和不同时间蔗糖酶活性的变化

Fig. 4 Change of sucrase activity in different soil layers and different times under the influence of irrigation with different amounts of treated paper mill effluent

不同字母表示不同处理在同一土层深度或同一时间显著差异 ($P < 0.05$)

2.4 造纸废水灌溉对土壤脱氢酶活性的影响

脱氢酶是一种胞内氧化酶,能促进化合物、有机酸等有机物脱氢氧化,起着递氢体作用^[19],可作为反应土壤微生物总体氧化能力的指标^[20]。土壤脱氢酶同样表现出 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm 的空间分布规律(图 5)。和蔗糖酶类似,造纸废水灌溉主要提高了 0—10 cm 和 20—30 cm 土层脱氢酶活性,15—120 各处理平均值分别相对对照提高了 44.7% 和 39.4%,而 10—20 cm 土层仅提高了 11.3%。0—10 cm 和 20—30 cm 土层不同量灌溉脱氢酶活性均显著高于对照,10—20 cm 土层仅 I20 显著高于对照。同时,各不同土层中 I20 均显著高于 I5、I10 以及 I15,表明 I20 对各层土壤脱氢酶活性提高最显著。

盐渍土壤由于有毒离子以及有机质含量低导致了脱氢酶活性很低^[21],本试验样地脱氢酶活性灌溉前平均仅有 $2.41 \mu\text{g TPFg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。脱氢酶活性在 8 月份最高,和 8 月份的高降雨量有关。根据 Dick 等人^[22]的研究,脱氢酶活性在雨季较高,因为大部分脱氢酶是由厌氧微生物分泌,雨季土壤积水创造的厌氧环境有利于厌氧微生物的繁殖,从而分泌较多脱氢酶。2008 年 3 月份和灌溉前相比,各处理土壤脱氢酶活性均没有得到显著提高,有些小区甚至较灌溉前降低,这主要是季节性因素引起的。但不同量灌溉处理均显著高于对照,5—20 cm 灌溉量分别比对照高 74.0%、118.6%、115.8% 和 135.2%。表明造纸废水灌溉可以显著提高土壤脱氢酶活性并且基本上随灌溉量的增加而增加,但不同灌溉量间除 5 cm 和 20 cm 外均差异不显著。脱氢酶主要参与有机物质降解的初级阶段,有机物质量的增加是提高脱氢酶活性的主要途径^[23],因此高造纸废水灌溉量对土壤脱氢酶活性的提高最显著;这也是和其他土壤酶相比,20 cm 造纸废水灌溉对脱氢酶活性提高最大的原因。

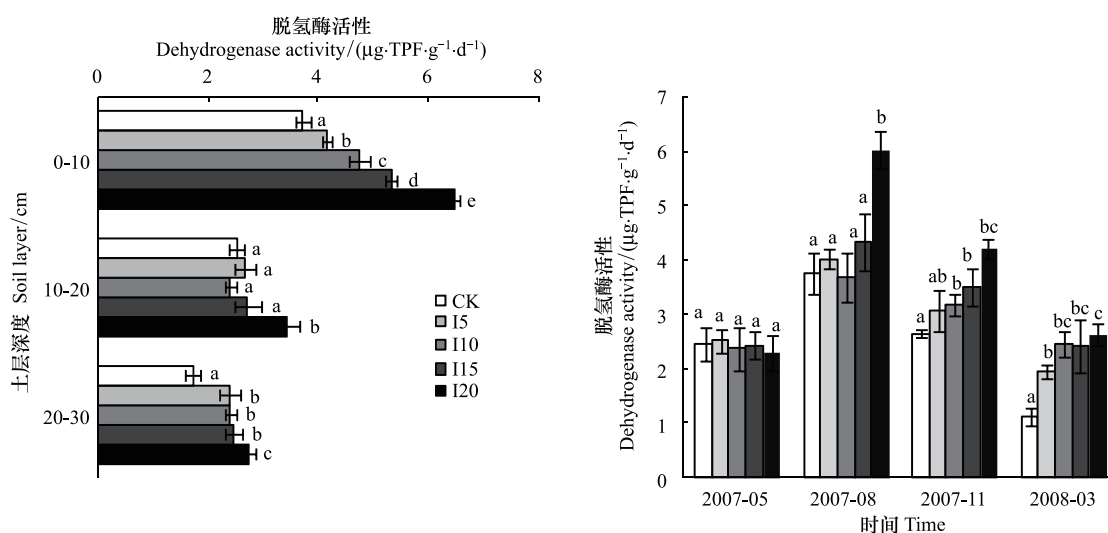


图 5 不同量造纸废水灌溉下不同土层深度和不同时间脱氢活性的变化

Fig. 5 Change of dehydrogenase activity in different soil layers and different times under the influence of irrigation with different amounts of treated paper mill effluent

不同字母表示不同处理在同一土层深度或同一时间显著差异 ($P < 0.05$)

2.5 造纸废水灌溉对土壤过氧化氢酶活性的影响

土壤过氧化氢酶催化土壤中对植物生长有害的 H_2O_2 分解,是土壤生物化学反应过程氧化还原能力的重要指示。土壤过氧化氢酶在不同土层的空间分布规律和脲酶一致:10—20 cm > 0—10 cm > 20—30 cm。造纸废水灌溉对不同土层过氧化氢酶活性的提高率为:0—10 cm > 20—30 cm > 10—20 cm, I5—I20 三层各处理平均值分别比对照提高了 27.8%、21.5% 和 10.2%。0—10 cm 和 20—30 cm 土层,仅 I15 和 I20 显著高于对照,而 20—30 cm 仅 I20 显著高于对照。土壤过氧化氢酶活性和蔗糖酶活性一致,在 4 次不同采样时间均表现出两两显著差异 ($P < 0.05$),随季节性变化明显。鲁萍等人^[24]研究表明过氧化氢酶活性受土壤水分的影响。

响很大,本研究过氧化氢酶活性在 8 月份雨季达到最高值。2008 年 3 月份和灌溉前相比,过氧化氢酶活性分别提高了 167.7% (CK), 174.9% (I5), 186.8% (I10), 205.4% (I15) 和 247.2% (I20), I10、I15 和 I20 三处理显著高于对照,表明一定量造纸废水灌溉可以提高土壤过氧化氢酶活性。造纸废水灌溉给土壤输入了一定量的有毒物质,对土壤过氧化氢酶有一定的激活作用,但如果有毒物质超过一定的量,又会抑制过氧化氢酶活性。本研究最大灌溉量 20 cm 没有表现出对土壤过氧化氢酶的抑制,表明该实验所用处理后的造纸废水有毒物质含量不高,可以用来灌溉。

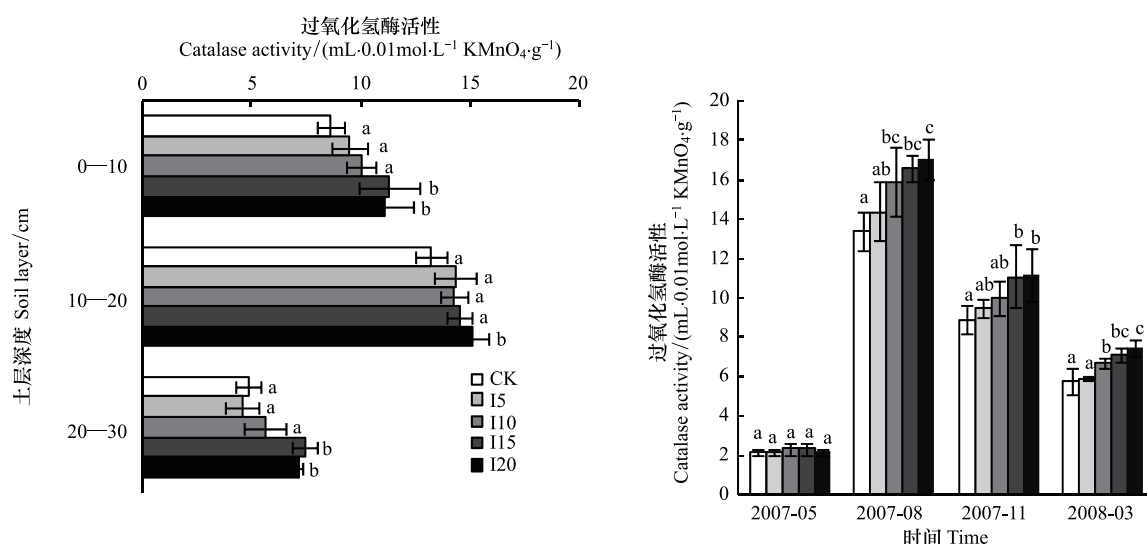


图 6 不同量造纸废水灌溉下不同土层深度和不同时间过氧化氢酶活性的变化

Fig. 6 Change of catalase activity in different soil layers and different times under the influence of irrigation with different amounts of treated paper mill effluent

不同字母表示不同处理在同一土层深度或同一时间显著差异 ($P < 0.05$)

2.6 土壤酶活性与土壤理化性质和微生物性质的相关性分析

从表 3 可知,土壤各种酶活性均在 $P < 0.01$ 水平上与土壤水溶性总盐和钠吸附比 (SAR) 显著负相关,表明土壤盐度和碱度会抑制土壤酶活性,这和 Rietz 等人研究一致^[25]。高土壤盐分抑制酶活性主要是由于盐析作用,对酶活性起重要作用的蛋白质分子的三级结构被破坏,导致土壤酶水溶性降低甚至变性,从而改变了酶促反应的催化部位^[25]。值得注意的一点,在高盐碱度的胁迫下土壤酶仍保持着一定强度的活性,这是因为耐盐碱微生物分泌的酶比非耐盐碱微生物分泌的酶需要较高的盐碱度来刺激活性^[26]。灌溉造纸废水后土壤盐分(平均 1.6%)的降低是土壤酶活性提高的一个重要因素。Pathak 等人^[27]报道,在盐渍化条件下,土壤有机质的提高会增加酶活性,因为有机质不仅是土壤酶的作用基质,还可以使酶在土壤中矿质和腐殖质的复合系统中得以固定,从而起到保护酶的作用^[28]。但此研究中土壤有机质含量与 5 种酶均未表现出显著相关性,主要由于从 8 月份到 11 月份持续灌溉造纸废水使土壤有机质仍呈现上升趋势,而土壤酶活性由于受到温度降低的影响而降低,导致了土壤有机质和酶活性在季节变化上的不同步。速效氮和有机质的季节性变化规律一致:从 5 月份到 11 月份持续上升,之后停止灌溉造纸废水后下降,所以各种土壤酶活性也未与速效氮表现出显著相关性。与有机质和速效氮不同,速效磷的季节性变化和土壤酶一致,在 8 月份达到最大值,所以与 5 种酶均显著相关。

土壤微生物量碳与 5 种酶均在 $P < 0.01$ 水平上显著相关,这是因为微生物分泌是土壤酶的主要来源。土壤呼吸与酶(蔗糖酶除外)没表现出显著相关性,可能是由于土壤呼吸在 08 年 3 月份较 2007 年 11 月份升高,而土壤酶却未升高。土壤呼吸在 2008 年 3 月份升高可能是由于冻融循环引起的,微生物在外界环境发生剧烈变化的情况下通过加大自身呼吸来调节活性;而土壤酶在外界相对低的基质环境中活性没有升高。 $q\text{CO}_2$

(微生物代谢商)是指单位生物量的微生物在单位时间里的呼吸作用,是一个广泛被用来表征微生物对环境胁迫或干扰所做出的反应的指标,在环境胁迫或干扰下,微生物维持生存可能需要更多的能量, $q\text{CO}_2$ 值就越大^[29]。5 种土壤酶均与 $q\text{CO}_2$ 显著负相关,表明环境胁迫或者干扰作用加强会降低土壤酶活性;本试验中胁迫因素主要是土壤盐碱度,土壤酶与 $q\text{CO}_2$ 的显著负相关性进一步验证了高盐碱度对土壤酶的抑制作用。

表 3 土壤酶活性与其他性质的相关性分析 ($n=20$)Table 3 Correlation analysis between soil enzyme activities and other properties ($n=20$)

	水溶性总盐 Total soluble salts	钠吸附比 Sodium adsorption ratio	有机质 Organic matter	速效氮 Available N	速效磷 Available P	微生物量碳 Microbial biomass C	土壤呼吸 Soil respiration	微生物代谢商 Microbial metabolic quotient
脲酶 ^①	-0.860 **	-0.878 **	0.082	0.015	0.557 *	0.932 **	0.396	-0.897 **
磷酸酶 ^②	-0.532 **	-0.730 **	-0.342	-0.277	0.599 **	0.738 **	0.235	-0.530 **
蔗糖酶 ^③	-0.951 **	-0.920 **	0.335	0.283	0.519 *	0.830 **	0.495 *	-0.903 **
脱氢酶 ^④	-0.685 **	-0.797 **	-0.14	-0.122	0.501 *	0.821 **	0.139	-0.782 **
过氧化氢酶 ^⑤	-0.899 **	-0.872 **	0.158	0.073	0.569 **	0.930 **	0.32	-0.941 **

*, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关;① Urease activity; ② Phosphatase activity; ③ Sucrase activity; ④ Dehydrogenase activity; ⑤

Catalase activity

3 结论

(1) 上层土壤累积了较多的有机物质,有充分的营养源,水热和通气状况较好,利于微生物的生长,能分泌较多的酶。但由于本试验土壤为盐碱土壤,上层盐分含量较高,对酶活性的抑制作用相对中层和下层较大。综合作用之下,5 种酶在土壤不同土层(0—10、10—20 和 20—30 cm)的分布规律不尽相同,但总体上中上层土壤酶活性大于下层土壤。灌溉造纸废水对土壤脲酶和磷酸酶活性的提高主要发生在表层土壤,而对蔗糖酶、脱氢酶以及过氧化氢酶活性的提高主要发生在中上层土壤。20 cm 灌溉对下层(20—30 cm)土壤酶活性的提高最明显。

(2) 土壤酶活性受气温、降水等季节性因素的影响,同时受随季节性变化较大的土壤盐分影响很大,因此具有很强的季节性变化规律。本试验土壤 5 种酶均在 8 月份达到最大值。

(3) 本试验所用处理后造纸废水矿化度(2080 mg/L)相对土壤含盐量(2.31%)很低,灌溉对土壤起到压盐的效果,同时通过降渍沟将盐分排出土壤。因此,灌溉造纸废水后盐碱土壤酶活性不会因为盐分累积而降低;相反,盐分的降低减少了对土壤酶活性的抑制,并且造纸废水中所含的丰富有机物质为土壤酶提供了大量基质,从而显著提高了各种酶的活性。总体上,最大灌溉量 20 cm 对土壤酶活性的提高最大,是提高酶活性的最佳灌溉量,对土壤改良的作用显著。

(4) 本试验酶活性与土壤盐碱度和微生物代谢商($q\text{CO}_2$)显著负相关,与速效磷和微生物碳显著正相关,与有机质和速效氮相关性不显著。

致谢:山东省黄河三角洲生态环境研究中心老师对实验给予帮助,中国科学院生态环境研究中心邓红兵研究员帮助写作,特此致谢。

References:

- [1] Guan Y X. Monitoring, Forecasting and Harnessing of Land Salinization in the Yellow River Delta. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2001.
- [2] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, Zhang K J. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. Ecological Engineering, 2009, 35(7): 1090-1103.
- [3] Li J L, Lu Z H, Tian J Y, Wang L, Li P H, Xiao Z F. Bio-remediation of coastal saline-alkali marshy soil by irrigation with pulp and paper waste water. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(2): 281-286.
- [4] Wu K. Water regime change characteristics and sustainable development of irrigation areas diverted water from lower reach of the Huanghe River. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(1): 45-47, 66-66.
- [5] Peng Z G, Yang P L, Wang Y, Ren S M. Effects of irrigation with reclaimed water on available nutrient and salinize-alkalization. Journal of Soil

- and Water Conservation, 2006, 20(6):84-88.
- [6] Heidarpour M, Mostafazadeh F B, Koupar J A, Malekian R. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1/2):87-94.
- [7] Kiziloglu F M, Turan M, Sahin U, Kuslua Y, Dursun A. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *rubra*) grown on calcareous soil in Turkey. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6):716-724.
- [8] Kannan K, Oblisami G. Influence of irrigation with pulp and paper mill effluent on soil chemical and microbiological properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 10(3):197-201.
- [9] Kumar V, Chopra A K, Pathak C, Pathak S. Agro-potentiality of paper mill effluent on the characteristics of *Trigonella foenum-graecum* L (Fenugreek). *New York Science Journal*, 2010, 3(5):68-77.
- [10] Roy R, Prasad J, Joshi A P. Changes in soil properties due to irrigation with paper industry wastewater. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2008, 50(4):277-282.
- [11] Patterson S J, Chanasyk D S, Mapfumo E, Naeth M A. Effects of diluted kraft pulp mill effluent on hybrid poplar and soil chemical properties. *Irrigation Science*, 2008, 26(6):547-560.
- [12] Yan J L, Pan G X. Effects of pulp wastewater irrigation on soil enzyme activities and respiration from a managed wetland. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2010, 19(2):204-216.
- [13] Qadir M, Oster J D. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the Total Environment*, 2004, 323(1/3):1-19.
- [14] Ma X, Xia M J, Lu Z H, Pei D Y, Liu Z M, Miao Y. The influence of irrigation with paper mill effluent on soil chemical properties of the heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11):3001-3009.
- [15] National Environmental Protection Agency. *Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method*; 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [16] Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [17] Wichern J, Wichern F, Joergensen R G. Impact of salinity on soil microbial communities and the decomposition of maize in acidic soils. *Geoderma*, 2006, 137(1/2):100-108.
- [18] Guan S F. *Soil Enzyme and its Research Methods*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986.
- [19] Roger B F, Tate R L III. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in pineland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(10):1389-1401.
- [20] Tam N F Y. Effects of wastewater discharge on microbial populations and enzyme activities in mangrove soils. *Environmental Pollution*, 1998, 102(2/3):233-242.
- [21] Sethi V, Kaushik A, Khatri R. Soil dehydrogenase activity and nitrifier population in relation to different soil-plant association. *Tropical Ecology*, 1990, 31(2):112-117.
- [22] Dick W A, Tabatabai M A. Significance and potential uses of soil enzymes // Metting F B Jr., ed. *Soil Microbial Ecology: Application and Environmental Management*. New York: Marcel Dekker, 1992:99-110.
- [23] Kaushik A, Nisha R, Jagteeta K, Kaushik C P. Impact of long and short term irrigation of a sodic soil with distillery effluent in combination with bioamendments. *Bioresource Technology*, 2005, 96(17):1860-1866.
- [24] Lu P, Guo J X, Zhu L. Soil catalase activity of main plant communities in *Leymus chinensis* grassland in northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6):675-679.
- [25] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6):845-854.
- [26] Zahran H H. Diversity, adaptation and activity of the bacterial flora in saline environments. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(3):211-223.
- [27] Pathak H, Rao D L N. Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(6):695-702.
- [28] Tabatabai M A. Soil enzymes // Weaver R W, Angel J S, Bottomley P S, eds. *Methods of Soil Analysis. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: Soil Science Society of America, 1994:775-833.
- [29] Bardgett G D, Saggar S. Effects of heavy metal contamination on the short-term decomposition of labelled ^{14}C glucose in a pasture soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(6):727-733.

参考文献:

- [1] 关元秀. 黄河三角洲土地盐碱化遥感监测、预报和治理研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2001.
- [3] 李甲亮, 陆兆华, 田家怡, 王琳, 李鹏辉, 肖忠峰. 造纸废水灌溉对滨海盐碱化湿地的生态修复. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(2):281-286.
- [4] 吴凯. 黄河下游水情变化特征与引黄灌溉的可持续发展. *灌溉排水学报*, 2003, 22(1):45-47, 66-66.
- [5] 彭致功, 杨培岭, 王勇, 任树梅. 再生水灌溉对草坪土壤速效养分及盐碱化的效应. *水土保持学报*, 2006, 20(6):84-88.
- [14] 马欣, 夏孟婧, 陆兆华, 裴定宇, 刘志梅, 苗颖. 造纸废水灌溉黄河三角洲重度退化滨海盐碱湿地对土壤化学性质的影响. *生态学报*, 2010, 30(11):3001-3009.
- [15] 国家环境保护总局. *水和废水监测分析方法*, 第四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京:中国农业出版社, 2005.
- [18] 关松荫. *土壤酶及其研究法*. 北京:中国农业出版社, 1986.
- [24] 鲁萍, 郭继勋, 朱丽. 东北羊草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(6):675-679.

CONTENTS

Widespread of anaerobic ammonia oxidation bacteria in an eutrophic freshwater lake wetland and its impact on nitrogen cycle	WANG Shanyun, ZHU Guibing, QU Dongmei, et al (6591)
Responses of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent	XIA Mengjing, MIAO Ying, LU Zhaozhua, et al (6599)
Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream	ZHU Weihong, GUO Yanli, SUN Peng, et al (6609)
An index of biological integrity: developing the methodology for assessing the health of the Baiyangdian wetland	CHEN Zhan, LIN Bo, SHANG He, et al (6619)
MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake	LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al (6628)
The diversity of invasive plant <i>Spartina Alterniflora</i> rhizosphere bacteria in a tidal salt marshes at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary	ZHANG Zhengya, DING Chengli, XIAO Ming (6636)
Analyzing the azimuth distribution of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in subtropical regions of eastern China using the harmonic analysis	ZHAO Xingyun, LI Baohui, WANG Jian, et al (6647)
In the process of grassland degradation the spatial pattern and spatial association of dominant species	GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (6661)
Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan	TAN Bo, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (6670)
Simulating the effects of forestry classified management on forest biomass in Xiao Xing'an Mountains	DENG Huawei, BU Rencang, LIU Xiaomei, et al (6679)
The simulation of three-dimensional canopy net photosynthetic rate of apple tree	GAO Zhaoquan, ZHAO Chenxia, ZHANG Xianchuan, et al (6688)
The effect of <i>Phomopsis</i> B3 and organic fertilizer used together during continuous cropping of strawberry (<i>Fragaria ananassa</i> Duch)	HAO Yumin, DAI Chuanchao, DAI Zhidong, et al (6695)
Temporal and spatial variations of DOC, DON and their function group characteristics in larch plantations and possible relations with other physical-chemical properties	SU Dongxue, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (6705)
Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of <i>Eremosparton songoricum</i> populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China	ZHANG Yongkuan, TAO Ye, LIU Huiliang, et al (6715)
Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools: a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China	WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong (6726)
Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng	WU Zhongxin, ZHANG Lei, ZHANG Xiumei, et al (6737)
Zooplankton diversity and its variation in the Northern Yellow Sea in the autumn and winter of 1959, 1982 and 2009	YANG Qing, WANG Zhenliang, FAN Jingfeng, et al (6747)
Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China	MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qianet al (6755)
Additive partition of species diversity across multiple spatial scales in community culturally protected forests and non-culturally protected forests	GAO Hong, CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun (6767)
Environmental perception of farmers of different livelihood strategies: a case of Gannan Plateau	ZHAO Xueyan (6776)
Application and comparison of two prediction models for groundwater dynamics	ZHANG Xia, LI Zhanbin, ZHANG Zhenwen, et al (6788)
Pollination success of <i>Phaius delavayi</i> in Huanglong Valley, Sichuan	HUANG Baoqiang, KOU Yong, AN Dejun (6795)
Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil	YANG Yang, MENG Denglong, QIN Hongling, et al (6803)
Archaea diversity in water of two typical brackish lakes in Xinjiang	DENG Lijuan, LOU Kai, ZENG Jun, et al (6811)
Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors	ZHAO Yujuan, LI Fengchao, ZHANG Qiang, et al (6819)
Effects of bisphenol A on the toxicity and life history of the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LU Zhenghe, ZHAO Baokun, YANG Jiaxin (6828)
Effect of incubation temperature on behavior and metabolism in the Chinese cornsnake, <i>Elaphe bimaculata</i>	CAO Mengjie, ZHU Si, CAI Ruoru, et al (6836)
Functional and numerical responses of <i>Mallada besalis</i> feeding on <i>Coreyra cephalonica</i> eggs	LI Shuiquan, HUANG Shoushan, HAN Shichou, et al (6842)
Stability analysis of mutualistic-parasitic coupled system	GAO Lei, YANG Yan, HE Junzhou, et al (6848)
Effect of ultra-micro powder qiweibaishuan on the intestinal microbiota and enzyme activities in mice	TAN Zhoujin, WU Hai, LIU Fulin, et al (6856)
Review and Monograph	
The effects of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: a review	CHEN Hao, MO Jiangming, ZHANG Wei, et al (6864)
Effect of enhanced CO ₂ level on the physiology and ecology of phytoplankton	ZHAO Xuhui, KONG Fanxiang, XIE Weiwei, et al (6880)
Transboundary protected areas as a means to biodiversity conservation	SHI Longyu, LI Du, CHEN Lei, et al (6892)
Scientific Note	
The energy storage and its distribution in 11-year-old chinese fir plantations in Huitong and Zhuting	KANG Wenxing, XIONG Zhengxiang, HE Jienan, et al (6901)
Spatial pattern of sexual plants and vegetative plants of <i>Stipa krylovii</i> population in alpine degraded grassland	REN Heng, ZHAO Chengzhang, GAO Fuyuan, et al (6909)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 21 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 21 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元