

城市景观水体水质改善的生态修复效果研究

——以上海市曲阳公园中心湖为例

韩璐 (上海水源地建设发展有限公司, 上海 200092)

摘要 以上海曲阳公园中心湖水体为研究对象, 通过分析其污染成因、污染状况和湖体水质, 结合水质改善及景观功能定位, 确定中心湖生态修复技术。通过对湖底的生境营造及对水生植物系统、水生动物系统及微生物生态系统的修复, 使水体具备自我净化能力, 并维持中湖生态系统的平衡。研究表明, 水生态系统建成1年后, 中心湖水体透明度、化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(TP)等指标均较构建前有显著改善。该研究结果对城市景观水体的水质改善、生态建设和后期管理均具有一定的指导性意义。

关键词 城市景观水体; 水质改善方法; 生态修复; 曲阳公园

中图分类号 S181 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)13-0068-04

Effect of Ecological Restoration on Water Quality Improvement of Urban Landscape Water—Taking Central Lake of Shanghai Quyang Park as an Example

HAN Lu (Shanghai Water Source Construction Development Co. Ltd., Shanghai 200092)

Abstract Taking Central Lake water of Shanghai Quyang Park as the research object, through analyzing the causes of pollution, pollution and lake water quality, combined with the improvement of water quality and landscape function, the ecological restoration technology of central lake was determined. By creating a lake habitat for aquatic plants and systems, aquatic systems and micro-ecosystem restoration, water bodies have the ability to self-purification, and maintain the balance of aquatic ecosystems. The results showed that aquatic ecosystems completed after one year, the central water transparency, chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), total phosphorus (TP), etc. than before to build a significant improvement. The results of this study have some guiding significance for the improvement of the water quality, ecological construction and later management of the urban landscape water.

Key words Urban landscape water; Water quality improvement method; Ecological restoration; Quyang Park

自20世纪80年代以来, 随着经济的迅猛发展, 人口的急剧膨胀, 城市各种景观水体的纳污量大幅增加。多年来, 大量工业废水、生活污水未经处理严重超标直接排入水体, 使得水体水质变差, 呈现富营养化状态。虽然近几年已做出努力, 但水质改善仍然有限, 而且处于不稳定状态。公园水体作为城市水生态环境的主要组成部分, 对人们的生活发挥着重要作用。它不仅能美化居住环境, 还可以改善局部小气候, 优化生态环境。城市水体污染主要是污染源的侵入, 如天然降雨、大气中的扬尘、生活垃圾的侵入, 长期积累的水底淤泥及淤泥释放的有害物质。加上水体溶解氧过低, 缺少水生动物、植物生存的环境, 使水体逐渐失去自净能力, 底泥不断释放分解为氮、磷等营养盐, 导致水体富营养化, 水体逐渐变绿, 藻类疯长, 最终导致“水华”现象。曲阳公园中心湖由于之前开放了钓鱼项目, 大量的残饵落入水底; 水面的落叶及垃圾由于未及时打捞, 最终也沉积在水底。残饵及落叶、垃圾在水底不断腐敗, 释放出大量氮、磷营养物质, 导致水体富营养化情况不断加剧^[1], 致使中心湖几乎每年都会出现蓝藻水华暴发的现象。笔者以上海曲阳公园中心湖水体为研究对象, 研究了水质生态修复技术, 以期为城市景观水体的水质改善及管理提供借鉴。

1 城市景观水体水质改善方法概述

1.1 曝气复氧技术 曝气复氧技术是根据水体受到污染后缺氧的特点, 人工向水体中充入空气, 加速水体复氧过程, 提高水体的溶解氧水平, 为微生物繁殖提供基本生存条件, 促进上下层水体的混合, 使水体保持好氧状态, 同时抑制底泥

氮、磷的释放, 防止水体黑臭, 使水体中的污染物质得以净化, 从而改善水质^[2]。

1.2 生物膜法处理技术 生物膜法是指以天然材料(如砾石)、合成材料(如纤维)为载体, 在其表面形成一层特殊的生物膜。生物膜表面积大, 可为微生物提供较大的附着表面, 有利于加强对污染物的降解作用, 使水体在生物降解、物理吸附、沉降、过滤等作用得到净化。

1.3 生态浮床技术 生态浮床技术是以高分子材料为载体和基质种植水生植物, 通过植物在生长过程中对水体中N、P等植物必需元素的吸收利用及植物根系和浮床基质等对水体中悬浮物的吸附作用, 富集水体中的有害物质。

1.4 人工湿地技术 人工湿地技术是利用基质、微生物、植物这个复合生态系统的物理、化学、生物等多重作用, 通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解等实现对水体的净化。

1.5 水生态系统原位修复技术 水生态系统原位修复是以生态系统中完整的食物网链为基础, 从初级生产者到水体最高消费者, 充分利用食物链摄取原理和生物间相生相克关系, 构建健康的生物群落结构, 从而维持生态系统平衡, 使水体水质长期维持较好的状态^[3]。

1.6 微生物制剂技术 利用微生物的分解还原能力, 将复杂有机物降解为简单无机物, 转变为可供植物吸收利用的物质, 主要用于应急工程, 往往与人工湿地技术和植物修复技术联合使用。

2 曲阳公园概况

曲阳公园地处上海市东北部, 东邻东体育会路, 南邻中山北二路, 西邻中山北一路, 北邻新华一村。公园占地总面积67 337 m², 中心湖面积约7 800 m², 中间有一条堤将整个

湖体分为大小二湖,堤中间有桥,二湖相通。湖岸边水深 1.2~1.4 m;大湖中心水深 1.6~1.7 m,面积约 6 000 m²,原为游船场;小湖面积约 1 800 m²,原为钓鱼场。

钓鱼场曾放养大量鲤科鱼类以供垂钓,致使湖体水质一直很差,公园改造前虽已禁止垂钓,同时也进行了清鱼工作,但湖中仍有普通食用鱼类存活,很多市民还会在岸边钓鱼,未被利用的残饵沉积到水底,释放出有机物质,加快了公园水质恶化的进程。曲阳公园中心湖水水质恶化进程如图 1 所示。

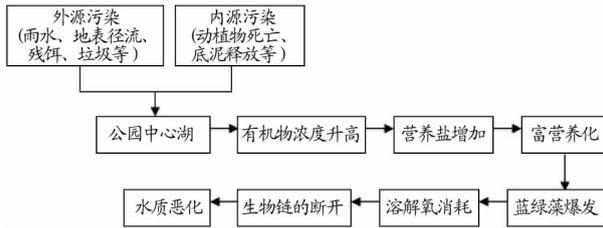


图 1 曲阳公园中心湖水水质恶化进程

Fig. 1 Deterioration of water quality in Central Lake of Quyang Park

天然雨水及雨水径流对中心湖水质的影响也不容忽视。空气中含有溶解性气体或悬浮物固体、重金属以及细菌等会随雨水降落下来,因此雨水中的化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、细菌等含量较高(表 1)。降雨期间雨水冲洗地面,污染物随降雨产生的地表径流进入湖中^[4]。经检测曲阳公园中心湖水水质指标 TN、TP、COD、NH₃-N 含量均超过地表水 V 类水标准值(表 2)。

表 1 我国雨水水质分析

Table 1 Analysis of rainwater quality in China mg/L

类型 Types	SS	COD	TN	TP
天然雨水 Natural rainwater	7.20	19.19	2.98	0.05
屋面雨水 Roof rainwater	102.68	114.06	6.20	0.38
道路雨水 Road rainwater	512.55	286.10	7.84	0.78
地表水 V 类标准值 Standard value of surface water V	—	40.00	2.00	0.40

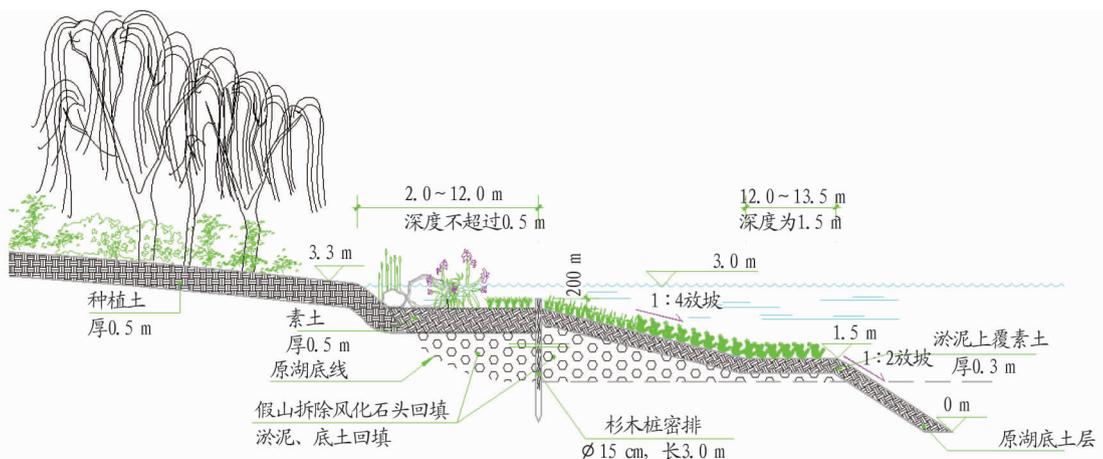


图 2 生境营造

Fig. 2 Habitat creation

表 2 曲阳公园中心湖水水质修复前水质检测结果

Table 2 Test results of water quality before the restoration in Central Lake of Quyang Park mg/L

项目 Items	TN	TP	COD	NH ₃ -N
检测结果 Test result	5.09	0.57	52.40	2.44
地表水 V 类标准值 Standard value of surface water V	2.00	0.40	40.00	2.00

3 曲阳公园中心湖水水质改善生态修复技术

通过分析中心湖污染成因、污染状况和湖体水质、驳岸等特点,工程选用水生态系统原位修复技术进行水质的改善。通过构建完整的水环境生态系统,使各种群之间相互依存、相互制约,使各种群的数量、类型达到相对稳定,使水体处于生态平衡状态。主要包括生境营造、水生植物系统修复、水生动物系统修复及微生物系统修复等。

3.1 生境营造 由于公园在修复之前,近岸水深为 1.0 m,从安全考虑上需对驳岸进行改造。同时,充分考虑水生生物栖息、生活、繁殖等生境要求,对水下地形进行重新整理,以营造出自然生态模拟环境,促进生态系统的良好循环。

离岸边 3 m 内(安全平台)保证水深为 0.5 m,水深 1.5 m 以浅的区域为水生植物种植区。为了营造景观的多样性,在岸边搭建挺水植物种植平台,水深控制在 0.2 m 以内,以满足植物的生长(图 2)。

水生植物的种植采用“浅水栽培—逐步提高水位”的水位调控法。该方法使水生植物的重建或恢复变得更为有效^[5]。

3.2 水生态系统原位修复

3.2.1 水生植物系统修复。高等水生植物和藻类都是水体生态系统中的初级生产者,处于同一个营养级,是营养物质和光能利用上的竞争者。种的遗传特性是决定其竞争能力的内在因素,但营养元素、光照、水深等环境因子是决定其竞争的重要环境因素。研究发现,一些沉水植物可分泌针对藻类生化敏感的物质,杀死藻类或抑制其生长。而且高等水生植物为大型浮游动物提供庞大的栖息表面积,从而抚育出高密度的浮游动物群落,大量捕食浮游藻类,也可以间接地控制藻类的群体数量^[6]。因此,如果水体具有发育良好的高

等水生植物就能强烈地抑制藻类的生长。

高等水生植物发育良好有利于创造环境多样性,提高湖泊生态系统的生物多样性,而生态系统的多样性又有助于提高生态系统的稳定性。高等水生植物能够使沉积物稳定,也是植食性浮游动物的避护所。高等水生植物可为降解微生物提供良好的栖息场所,有利于微生物的生存。高等水生植物庞大的根系为细菌提供了多样性的生境,为微生物的好氧呼吸提供了有利条件。高等水生植物本身又是水生动物的饲料,进一步增加了水生生态系统食物链长度和复杂性,从而形成稳定、平衡的生态系统。

(1) 沉水植物净化。沉水植物是指植株全部或大部分沉没于水下的植物。沉水植物的恢复,是水体从“浊态”向“清态”转变的关键阶段。既是强化处理效果的需要,又是进一步实现水体自恢复的基础。

根据沉水植物对于 TN、NH₃-N、TP 等的去除效果以及形成的水下景观,选择刺苦草 (*Vallisneria spirulosa* S. Z. Yan)、黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、马来眼子菜 (*Potamogeton malaiianus*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、伊乐藻 (*Elodea canadensis*)^[7] 为主要种植品种,并将以上夏秋型品种及冬春型品种采取混种的栽种形式,以保证沉水植物群落的稳定。

(2) 挺水、浮叶植物景观效果体现。挺水植物指茎、叶挺出水面的植物,种植在景观水体岸边。沿湖岸带的挺水植物形成的湿地系统不但对水质净化有着良好的作用,还是多种生物的栖息地,同时搭配周边景观,配合驳岸类型;而且对暴雨冲刷所带来的外源污染具有一定拦截作用。浮叶植物是非常重要的园林水景营造材料,它们不仅具有很高的观赏价值,还可以起到净化和改善水质的作用,是城市景观水体的重要元素。

项目结合周边景观选择水生美人蕉 (*Canna generalis*)、旱伞草 (*Cyperus alternifolius*)、慈菇 (*Sagittaria sagittifolia*)、千屈菜 (*Lythrum salicaria*)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*)、溪荪 (*Iris sibirica*)、常绿水生鸢尾 (*Iris hexagonus* Hybrid)、水葱 (*Scirpus validus*)、梭鱼草 (*Pontederia cordata*)、荷花 (*Nelumbo nucifera*) 等共计 20 种挺水植物。适量配置观赏价值高的浮叶植物如睡莲 (*Nymphaea alba*)、荇菜 (*Nymphoides peltatum*)、香菇草 (*Hydrocotyle vulgaris*)、水罨粟 (*Hydrocleys nymphoides*),更能增添水体景观效果,提升水域景观品质,符合打造生态水景的意境^[8-10]。

3.2.2 水生动物系统修复。水体水生动物净化水质的过程是利用肉食性鱼类—滤食性鱼类—浮游生物—藻类—营养物质的营养级链关系所产生的下行效应,达到消减营养物质、净化水质的目的。水生动物的放养将充分考虑物种的配置结构,科学合理地设计水生动物的放养模式,从而达到生态系统的良性循环。

鱼类可以通过摄食控制其食物生物种群的数量,并沿食物链下传,影响食物链中的各个环节,产生所谓的下行效应。肉食性鱼类对生态系统的影响主要通过捕食压力透过食物链来影响整个水生生态系统,其作用表现在随着食鱼性鱼类捕

食压力的增加,致使食浮游动物鱼类的密度减小,导致浮游动物密度增加,浮游植物数量减小,从而致使水体的叶绿素含量和初级生产力降低,水体的透明度增大。滤食性鱼类能滤食大量的大型浮游植物,由于减少了营养盐的竞争者,浮游植物常利用自身生存对策取得竞争优势而大量繁殖,从而在一定时期内发展成优势种。由于鱼类滤食降低了浮游动物对浮游植物的牧食压力,而使浮游植物生物量和初级生产力不断提高。

底栖动物是水生态系统的重要组成部分,它在水生态系统中起着多种作用,除了加速水底碎屑的分解、调节泥水界面的物质交换及促进水体的自净等作用外,还是水生生态系统食物链的重要环节。底栖动物摄食其他小型无脊椎动物、底栖藻类和有机碎屑等,本身又可被鱼类所食。由于底栖动物对不同的生物和非生物因子有着不同的敏感度,群落结构的变化易受外界环境的干扰,且这种变化趋势经常可以被预测,因此,底栖动物中的许多种类已作为重要指示生物。

3.2.3 微生态系统修复。水体中的微生物是水生态平衡的关键环节。微生物在生态系统中作为还原者,把绿色植物产生的能量通过食物链进行传递,它们在自然界大量而广泛的存在,是生态系统的重要组成部分之一。它们能将自然界中动植物的尸体及残骸分解,将一些有害的污染物加以吸收和转化,成为无毒害或毒害较小的无机营养元素。微生物也可以调整或维持水生动物肠道内的微生态平衡,从而达到防治疾病、促进其健康生长的目的。

4 水质净化效果

据研究,该项目中水生植物的净化能力从大到小依次为沉水植物、浮叶植物、挺水植物。其中,沉水植物对 COD 的去除效果不显著,去除效果相对较好的为黑藻;对 TN 去除效果较好的也是黑藻,其次是伊乐藻;对 TP 去除效果较好的是刺苦草,其次是马来眼子菜;对水体中 NH₃-N 去除效果较好的也是马来眼子菜,其次是金鱼藻^[11-12]。

通过观测完工 1 年后水生动植物的生长情况,可粗略计算生态系统的固氮、磷的能力,结果见表 3。

表 3 曲阳公园中心湖水生生态系统固氮、磷量
Table 3 Nitrogen and phosphorus fixation in aquatic ecosystem in Central Lake of Quyang Park

植物种类 Plant species	工程量 Engineering quantity//m ²	固氮量 Nitrogen fixation//kg	固磷量 Phosphorus fixation//kg
挺水、浮叶植物 Emergent, floating leaved plants	953	10.38	1.12
沉水植物 Submerged plant	5 812	90.55	13.28
水生动物 Aquatic animals		91.26	5.62
合计 Total		192.19	20.02

自然降水及径流雨水进入湖体的含氮量为 49.63 kg,含磷量 0.91 kg。由表 3 可知,经过生态修复后中心湖水生生态系统固氮、磷的量远大于进入湖体污染物的量。

2015 年 8—12 月的 9 次检测数据表明,沉水植物可有效

表 4 曲阳公园中心湖水水质修复后水质检测结果

取样日期 Sampling date	沉水植物 Submerged plant	COD	NH ₃ - N	TP
2015 - 08 - 06	有	<10.0	0.174	0.03
	无	<10.0	0.074	0.04
2015 - 08 - 10	有	<10.0	0.087	0.06
	无	<10.0	0.087	0.07
2015 - 08 - 14	有	<10.0	0.246	0.02
	无	<10.0	0.328	0.03
2015 - 08 - 21	有	18.5	0.152	0.08
	无	18.2	0.346	0.05
2015 - 08 - 31	有	<10.0	0.083	0.03
	无	13.4	0.148	0.03
2015 - 09 - 17	有	12.0	0.188	0.05
	无	13.4	0.110	0.04
2015 - 10 - 20	有	18.8	0.083	0.03
	无	17.6	0.119	0.04
2015 - 11 - 13	有	<10.0	0.196	0.03
	无	<10.0	0.199	0.04
2015 - 12 - 16	有	<10.0	0.162	0.04
	无	<10.0	0.143	0.04
地表水环境质量标准	Ⅱ类	15.0	0.500	0.10
限值 Limit value of environmental quality standard for surface water	Ⅲ类	20.0	1.000	0.20

控制 COD、NH₃ - N、TP 含量,若维护得当,曲阳公园中心湖重要指标可长期稳定在地表水Ⅲ类水平(表 4)。

参考文献

- [1] 李宏祥. 豫园荷花池换水前后水质对比及其恶化原因探讨[J]. 上海水务, 2006, 22(3): 15 - 18.
- [2] 郭迎庆. 城市景观水体的污染控制和修复技术[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(S1): 148 - 150.
- [3] 陈超, 梁卓, 李小燕, 等. 生态修复在景观水体治理中的应用[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(1): 136 - 138.
- [4] 王和意. 上海城市降雨径流污染过程及管理措施研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [5] 李敦海, 杨劲, 方涛, 等. 水位调控法恢复富营养化水体沉水植物技术研究: 以无锡五里湖为例[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(12): 59 - 62.
- [6] 曾爱平, 刘洪见, 施于文. 不同沉水植物水质改善效应研究[J]. 浙江农业科学, 2009, 1(5): 1000 - 1003.
- [7] 陆露璐, 黎明, 刘德启, 等. 影响富营养化水体沉水植物修复的生态因子探讨[J]. 四川环境, 2007, 26(3): 30 - 33.
- [8] 唐丽红, 马明睿, 韩华, 等. 上海市景观水体水生植物现状及配置评价[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 563 - 570.
- [9] 李伟. 长沙市城市水体园林植物配置研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [10] 田志平, 罗建让. 水生植物在园林中的应用[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(6): 180 - 182.
- [11] 刘建伟, 周晓, 吕臣, 等. 三种挺水植物对富营养化景观水体的净化效果[J]. 湿地科学, 2015, 13(1): 7 - 12.
- [12] 田琦, 王沛芳, 欧阳萍, 等. 5 种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 14 - 17.

(上接第 35 页)

解作用。随着 HA - Na 浓度的增加, 冬小麦种子发芽势和发芽率呈现先缓慢上升又缓慢下降的趋势。当 HA - Na 浓度为 50 μmol/L 时, 冬小麦种子发芽势和发芽率相对较高; 当 HA - Na 浓度达 500 μmol/L 时, HA - Na 对冬小麦种子发芽势和发芽率表现为相对抑制现象, 其原因可能是肥料浓度过高出现肥害。

表 4 不同浓度 HA - Na 对 Cd²⁺ 胁迫下冬小麦种子发芽势和发芽率的影响Table 4 Effects of different concentrations of HA-Na on winter wheat germination energy and rate under Cd²⁺ stress

处理 Treatment	HA - Na 浓度 HA-Na concentration μmol/L	发芽势 Germination energy // %	发芽率 Germination rate // %
Cd + S ₀	0	68.8	40.4
Cd + S ₁	10	77.0	49.0
Cd + S ₂	30	80.8	60.6
Cd + S ₃	50	95.2	58.8
Cd + S ₄	100	91.2	50.6
Cd + S ₅	200	64.2	39.2
Cd + S ₆	500	54.0	29.2

3 结论

通过研究不同浓度 Cd²⁺ 对冬小麦种子萌发及根系生长的影响可知, 重金属 Cd 对冬小麦种子萌发和根系生长总体表现为抑制作用。当 Cd²⁺ 浓度为 100、200 和 500 μmol/L 时, 对冬小麦种子萌发和根系生长都有明显抑制作用, 但当 Cd²⁺ 浓度为 100 μmol/L 时冬小麦生长基本正常且没有出现

大量死苗, 故筛选出 100 μmol/L 作为 Cd²⁺ 胁迫浓度。不同浓度 HA - Na 对 Cd²⁺ 胁迫下冬小麦种子萌发及根系生长呈现出一定的缓解作用, 并且在低浓度时促进生长, 高浓度时抑制生长, 50 μmol/L 为最适的 HA - Na 浓度。

参考文献

- [1] 肖瑶, 蒋宇洲, 李迪, 等. 腐殖酸肥对重茬烤烟光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(34): 4 - 6, 22.
- [2] 檀建新, 尹君, 王文忠, 等. 镉对小麦、玉米幼苗生长和生理生化反应的影响[J]. 河北农业大学学报, 1994, 17(S1): 83 - 87.
- [3] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 514 - 523.
- [4] 陈怀满. 我国土壤污染现状、发展趋势及其对策建议[J]. 土壤学进展, 1990, 18(1): 53 - 56.
- [5] 杨颖丽, 王文瑞, 尤佳, 等. Cd²⁺ 胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 88 - 94.
- [6] 江海东, 周琴, 李娜, 等. Cd 对油菜幼苗生长发育及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(1): 39 - 43.
- [7] 周希琴, 吉前华. 镉胁迫下不同品种玉米种子和幼苗的反应及其与镉积累的关系[J]. 生态学杂志, 2005, 24(9): 1048 - 1052.
- [8] 高大翔, 刘惠芬, 刘开生, 等. 汞胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1): 13 - 16.
- [9] ŠMÍDOVÁ M. Effect of sodium humate on swelling and germination of winter wheat[J]. Biologia plantarum, 1962, 4(2): 112 - 118.
- [10] GAUR A C, BHARDWAJ K K R. Influence of sodium humate on the crop plants inoculated with bacteria of agricultural importance[J]. Plant and soil, 1971, 35(1): 613 - 621.
- [11] VAN DE VENTER H A, FURTER M, DEKKER J, et al. Stimulation of seedling root growth by coal-derived sodium humate[J]. Plant and soil, 1991, 138(1): 17 - 21.
- [12] 陈玉玲. 腐植酸对植物生理活动的影响[J]. 植物学通报, 2000, 17(1): 11 - 16.