

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体积累与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻

顾琼, 金文标*, 陈远清, 郭仕达, 万超凡

(哈尔滨工业大学深圳研究生院, 土木与环境工程学院, 深圳 518055)

摘要: 利用卷枝毛霉孢子悬液与小球藻共培养, 用过滤含藻菌球的方式来收获微藻. 以人工配水为培养基, 收获效率为指标, 通过单因子试验和正交试验得到最佳收获条件为: pH = 6.0, 葡萄糖质量浓度为 $1.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 菌藻比为 1:250, 收获效率为 91.08%. 对培养前后培养液中多糖质量浓度进行测定, 发现小球藻在培养 48 h 后多糖质量浓度较培养前增加了约 $0.047 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 而菌藻共培养后的混合液中多糖质量浓度为 $0.019 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此可知在菌藻共培养过程中, 小球藻会向外分泌某些水溶性多糖物质供卷枝毛霉利用, 二者有一定的共生作用. 对小球藻和卷枝毛霉细胞表面 Zeta 电位进行测量发现, 小球藻细胞表面的 Zeta 电位值随着藻液 pH 值变化波动不大; 而卷枝毛霉细胞表面的 Zeta 电位值, 随着 pH 值的变小, 电位值可由原先最低的 -37.7 mV 升至 -9.87 mV . 由此推定菌藻相互吸附的主要机制为电中和吸附.

关键词: 微藻; 丝状真菌; 卷枝毛霉; 收获; 机制

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0688-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607217

Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using *Mucor circinelloides*

GU Qiong, JIN Wen-biao*, CHEN Yuan-qing, GUO Shi-da, WAN Chao-fan

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Harvesting of microalgae is the major challenge in cost-efficient large-scale microalgal biomass production due to their low concentration and small cell size in the culture medium. The present paper aimed to study the efficiency of the filamentous fungus *Mucor circinelloides* spores suspensions to harvest the green unicellular microalga *Chlorella pyrenoidosa* grown in synthetic medium. Results showed that the optimal co-culture conditions were pH = 6.0, $1.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ glucose and 1:250 fungi to microalgae ratio with harvest efficiency of 91.08%. In addition, the mentioned optimal conditions could be applied for actual sewage with harvest efficiency of 92.33%. Polysaccharide concentrations measured before and after 48 h of cultivation showed that the polysaccharide of *C. pyrenoidosa* cultured alone was increased by $0.047 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, while co-cultured mixture showed increase in polysaccharides by $0.019 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. The recorded decrease in polysaccharides concentration in the co-culture might be attributed to using of excreted polysaccharides by *M. circinelloides* to grow, confirming the symbiotic association of both organisms. Furthermore, with decreasing the pH, *C. pyrenoidosa* Zeta potential was stable, while it was increased from -37.7 mV to -9.87 mV in *M. circinelloides*, which indicated that charge neutralization was the mechanism of flocculation between algae and fungi.

Key words: microalgae; filamentous fungi; *Mucor circinelloides*; harvest; mechanism

利用城市生活污水培养富油微藻, 在净化水质的同时收获微藻以制取生物柴油, 是当前解决水环境污染和能源危机的一个有效途径. 微藻生物柴油属于可再生能源, 且净能量回收率更高^[1]. 就整体工艺而言, 微藻生物柴油的生产包括微藻培养、收获、提脂与转脂, 但与其他原料不同的是, 微藻个体微小(直径约为 $2 \sim 20 \mu\text{m}$), 在水中不易沉淀絮凝, 几乎所有微藻培养方式所获得的都是固体含量在 $0.02\% \sim 0.05\%$ 的稀溶液^[2], 微藻质量浓度低 ($0.3 \sim 5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[3], 使得微藻收获成本巨大. Richardson 等^[4]研究表明, 在户外培养生产系统中收获费用所占比例在运营成本里排名第一, 在整个资本输出中排名第二. 因此找到高效节能收获方式已成为降低微藻生物柴油成本, 实现其工业化的重要挑战.

除传统的离心沉降、絮凝过滤、浮选等方法外^[5], 2012 年 Zhang 等^[6]证明丝状真菌能够共培养

收获微藻, Zhou 等^[7]也利用丝状真菌收获微藻并显示 pH 对菌藻共成球影响巨大. Xie 等^[8]利用刺孢小克银汉霉孢子悬液收获微藻, Zhou 等^[9]利用米曲霉分别探索在自养条件和异养条件小球藻的收获效率. Xia 等^[10]对不同条件下毛霉菌的球化生长及脂肪累计进行研究得到细胞成球与生物质积累成正相关. 除接种丝状真菌孢子悬液共培养收获微藻外, Wrede 等^[11]还发现可先将烟曲霉单独培养成球, 再将球状真菌加到藻液中, 在适宜条件也能收获微藻且效率良好. 刘洁霞^[12]研究通过降低培养基 pH 值诱导原位絮凝采收高生物量微藻, 最佳采收效率达 90%, 利用自絮凝藻在酸性条件下有效提高目标藻

收稿日期: 2016-07-31; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 深圳市科技创新委员会项目(JCYJ20150529114024234)

作者简介: 顾琼(1992~), 女, 硕士, 主要研究方向为微藻制取生物柴油, E-mail: gu_qiong@163.com

* 通信作者, E-mail: 13828830095@139.com

的采收效率,使淡水小球藻和若夫小球藻的采收效率上升到 80%。本研究利用卷枝毛霉孢子悬液与小球藻共培养,通过过滤含藻菌球来收获微藻。优化了最佳收获条件,验证了丝状真菌收获微藻在实际污水中的可行性,并初步探究得出卷枝毛霉共培养收获微藻机制主要为电中和吸附。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

实验所用微藻为课题组前期离子注入法诱变筛选的蛋白核小球藻(以下称小球藻)采用 BG-11 培养基进行保存。所用卷枝毛霉(*Mucor circinelloides*)从广东微生物菌种中心购买(菌种

号 GIM3.521),接种于综合马铃薯培养基(Synthetic Potato Medium)斜面内培养 3 代活力恢复后使用。

实验所用人工污水配方为:依次取尿素、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、葡萄糖、 $(NH_4)_2SO_4$ 、 $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ 、 $NaHCO_2$ 各 0.150、0.075、0.300、0.075、0.030、0.300 g,微量元素液 6 mL,溶解于 1 000 mL 自来水中。微量元素液配制方法:依次取 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 、 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 、 $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 、 Na_2EDTA 、 $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 、 $ZnCl_2 \cdot 6H_2O$ 各 2.0 mg、97.0 mg、4.0 mg、0.75 g、41.0 mg、5.0 mg 溶解于 1 000 mL 蒸馏水中^[13,14]。配水水质见表 1,大学城实际生活污水水质见表 2。

表 1 人工污水水质

Table 1 Water quality of artificial sewage

水质指标	COD	TP	TN	$NH_4^+ - N$	SS
参数/ $mg \cdot L^{-1}$	270 ~ 330	5 ~ 7	70 ~ 80	10 ~ 15	98

表 2 大学城生活污水水质

Table 2 Water quality of University City sewage

水质指标	COD	TP	TN	$NH_4^+ - N$	SS	pH
参数/ $mg \cdot L^{-1}$	230 ~ 250	4.5 ~ 5.6	40 ~ 60	20 ~ 65	75 ~ 105	6.6 ~ 7.6

1.2 实验方法

1.2.1 丝状真菌孢子悬液的配制

将稳定后的真菌接种于 SPM 培养基平板内,28℃ 恒温培养 6 ~ 7 d,在无菌操作台(SW-CJ-2FD 苏州净化设备有限公司)内用 10 mL 灭菌蒸馏水将平板内的孢子洗至 50 mL 灭菌锥形瓶内,用血球计数板计数并记录。

1.2.2 菌藻共培养

实验前分别对小球藻藻液和卷枝毛霉孢子悬液进行计数,确定藻液体积后即可按初始真菌孢子数与微藻细胞数之比(菌藻比)计算得到卷枝毛霉孢子悬液的接种体积。实验条件下得到共培养混合液后置于 28℃,150 $r \cdot min^{-1}$ 恒温摇床内培养 48 h 观察测定记录数据。

1.3 分析方法

1.3.1 微藻光学密度的测定

根据朗博比尔定律,在一定的质量浓度范围内,微藻质量浓度与光学密度(optical density, D 值)成正比,研究表明微藻细胞密度与藻种在特征波长下的 D 值之间存在着一定的线性关系^[15]。可以用 D 值来近似表征微藻的生物量反应微藻的生长情况。经本课题组前期光谱扫描结果,选择在 681 nm 波

长用紫外分光光度计(UV765 上海精密科学仪器有限公司),测量小球藻的 D 值。

1.3.2 微藻叶绿素浓度的测定

由于实际污水中其他颗粒物以及微生物的存在, D 值误差过大,不能很好地表征污水中微藻细胞浓度的变化。而在生活污水中几乎不存在其他含有叶绿素的微生物,因此在生活污水中选择使用叶绿素仪(YSI600CHLYSI 美国维赛仪器公司)测定叶绿素浓度来表征微藻的生物反应其生长情况。

1.3.3 微藻收获效率的测定

收获效率计算公式如下:

$$R = [1 - (N_0/N_1)] \times 100$$

式中, R 为收获效率(%); N_0 为收获前藻液的初始细胞密度; N_1 为收获后藻液的细胞密度。采用共培养前藻液与菌藻成球后经纱布过滤后滤液的 D 值或叶绿素浓度来代表细胞密度进行计算。

1.3.4 多糖与单糖的测定

本研究采用蒽酮-硫酸法测定水样中的多糖质量浓度,灵敏度高,糖含量在 30 μg 左右就能进行测定^[16]。以葡萄糖为标准物质用蒽酮硫酸法绘制标准曲线;取培养液在离心机(H-185 长海湘仪离心

机仪器有限公司)内以 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速离心 10 min ;取上清液以 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤得到水样用蒽酮硫酸法测定其多糖质量浓度.采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定水样中的还原糖质量浓度,操作简便快速,杂质干扰小^[17].同样以葡萄糖为标准物质利用DNS法绘制标准曲线,随后取上述水样用DNS法测算其还原糖质量浓度.

实验对卷枝毛霉、小球藻单独培养时与二者共培养前后培养基多糖质量浓度进行测定时,为排除其他干扰,采用人工配水培养的藻液进行实验.取小球藻液接入卷枝毛霉孢子悬液,作为菌藻共培养液;取藻液离心后,上清液经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜过滤,滤液接入卷枝毛霉孢子悬液,作为真菌卷枝毛霉单独培养液;取小球藻藻液,不接入卷枝毛霉孢子悬液,作为小球藻单独培养液.

1.3.5 样品中 Zeta 电位的测定

本研究采用英国马尔文公司生产的型号为 Zetasizer Nano ZS90 的纳米粒度及 Zeta 电位分析仪

对微藻及丝状真菌细胞表面的 Zeta 电位进行测量.

2 结果与讨论

2.1 卷枝毛霉收获微藻的条件优化

2.1.1 初始 pH 对收获效率的影响

由于 pH 对真菌成球影响较大,根据前期实验选定 7.0 、 6.5 、 6.0 、 5.5 这4个 pH 梯度,命名为1、2、3与4组,以小球藻藻液为空白组进行实验.设定菌藻混合液菌藻比为 $1:350$,葡萄糖质量浓度为 $1.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.实验结果如表3、图1和图2所示.

由表3可知,当菌藻混合液初始 pH 为 7.0 时,卷枝毛霉能够生长但是不能成球;当菌藻混合液初始 pH 为 6.5 时3组平行有一组能够成球,其余两组均未能成球;当菌藻混合液初始 pH 为 6.0 时均能菌藻共生长成球,且微藻生长良好;而当混合液初始 pH 为 5.5 时,3组平行均能菌藻共生长成球,但微藻死亡,因此确定卷枝毛霉与小球藻共培养的最适 pH 为 6.0 .

表3 不同 pH 各组生长收获记录¹⁾

Table 3 Harvest record with different initial pH conditions

组名	初始 pH	孢子数 $\times 10^6$ /个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	藻细胞数 $\times 10^6$ /个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	生长收获情况		
				平行 1	平行 2	平行 3
空白组	9.4	3.750	8.538	+ -	+ -	+ -
1 组	7.0	3.750	8.538	+ -	+ -	+ -
2 组	6.5	3.750	8.538	+ -	++	+ -
3 组	6.0	3.750	8.538	++	++	++
4 组	5.5	3.750	8.538	- +	- +	- +

1)“++”代表菌藻共生长成球;“+ -”代表藻生长菌未生长;“- +”代表菌藻共成球但藻死亡

由图1可知,随着菌藻混合液初始 pH 降低,除1组外,混合液终末 pH 也随之降低,且 pH 变化率逐渐增大,当初始 pH 为 6.0 和 5.5 时,变化率接近 50% .

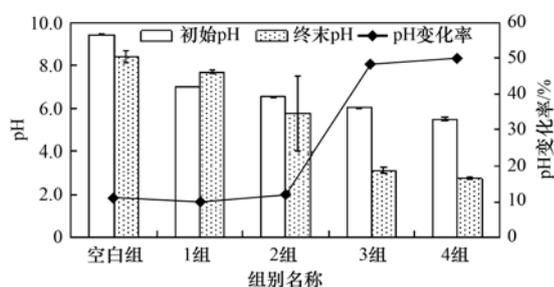


图1 不同 pH 各组培养前后 pH 变化

Fig. 1 The pH change before and after the culture with different initial pH conditions

由图2可知,随着混合液初始 pH 的下降,微藻收获率呈先增加后降低的趋势,在 pH 为 6.0 时,收获效率达最大为 81.23% .可以理解为当菌藻混合液的初始 pH 为 7.0 时,由于溶液环境为中性,卷枝

毛霉不能成球收获小球藻,但由于将藻液的 pH 值由 9.43 降低至 7.0 ,改善了微藻生活环境,故小球藻浓度较之前有所增长,因此收获效率为负.而当菌藻混合液初始 pH 小于 6.0 以后,由于终末 pH 剧烈下降,导致微藻生活环境恶化,部分微藻死亡,故微藻收获效率有所下降.

2.1.2 菌藻比对收获效率的影响

选定 $1:250$ 、 $1:300$ 、 $1:350$ 、 $1:400$ 、 $1:450$ 这5

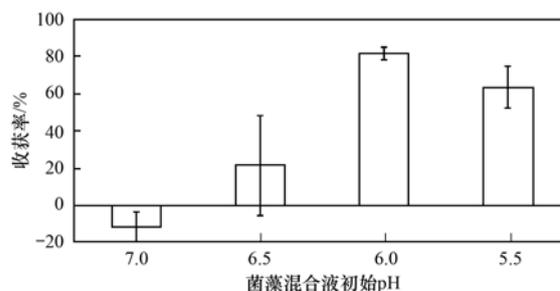


图2 初始 pH 对收获效率的影响

Fig. 2 Effect of initial pH on harvest efficiency

个水平,依次命名为1、2、3、4和5组,以小球藻藻液为空白组进行实验. 菌藻混合液初始 pH 为 6.0, 保持葡萄糖质量浓度为 $1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 实验结果如表 4、图 3 和图 4 所示.

由表 4 可知,除空白组外,不同梯度的菌藻比培养后卷枝毛霉与小球藻均能成球. 由图 3 可知,不同梯度的菌藻比,其始末 pH 变化率相差不大,随着

菌藻比的降低, pH 的变化率逐渐增大. 由图 4 可知,随着菌藻比的下降,小球藻的收获效率呈现出一个先降低后增加的趋势,在菌藻比为 1:250 时,收获率达最大值为 86.12%.

2.1.3 葡萄糖质量浓度对收获效率的影响

选定 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 这 5 个水平进行实验,依次命名为 1 组、2 组、3 组、4 组、5

表 4 不同菌藻比各组生长收获记录¹⁾

Table 4 Harvest record with different bacteria and algae ratios

组名	菌藻比	孢子数 $\times 10^6$ /个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	藻细胞数 $\times 10^6$ /个 $\cdot\text{mL}^{-1}$	菌液体积 /mL	生长收获情况		
					平行 1	平行 2	平行 3
空白	0	1.325	8.583	0	+ -	+ -	+ -
1 组	1:250	1.325	8.583	2.591	++	++	++
2 组	1:300	1.325	8.583	2.159	++	++	++
3 组	1:350	1.325	8.583	1.851	++	++	++
4 组	1:400	1.325	8.583	1.619	++	++	++
5 组	1:450	1.325	8.583	1.439	++	++	++

1) “++”代表菌藻共生长成球; “+ -”代表藻生长菌未生长

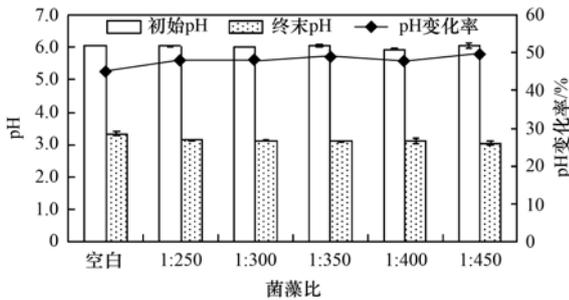


图 3 菌藻比实验 pH 变化

Fig. 3 The pH change with different bacteria and algae ratios

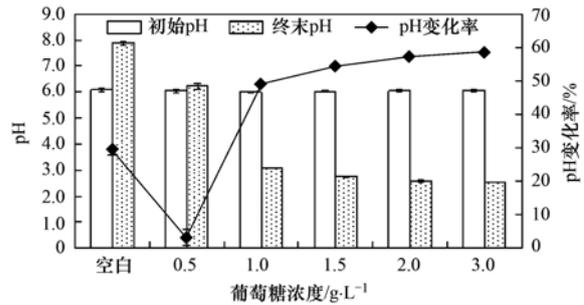


图 5 葡萄糖质量浓度实验 pH 变化

Fig. 5 The pH change with different glucose concentrations

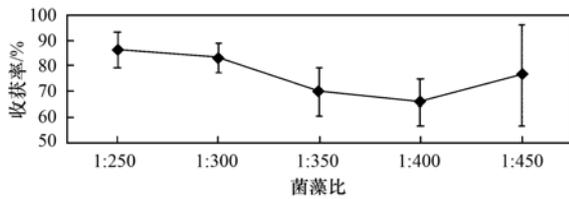


图 4 菌藻比对收获效率的影响

Fig. 4 Effect of bacteria and algae ratio on harvest efficiency

组,以小球藻藻液为空白组进行实验. 菌藻混合液初始 pH 为 6.0、菌藻比为 1:250. 实验结果如表 5、图 5 和图 6 所示.

由表 5 可知,当菌藻混合液中无葡萄糖时,卷枝毛霉因缺少碳源不能生长,其余各组菌藻均能共培养成球. 由图 5 可知,随葡萄糖质量浓度不断增大, pH 变化率逐渐增大,即在相同菌藻混合液 pH 条件下,葡萄糖质量浓度越大,终末 pH 越低. 因此,混合液中酸性物质主要来源于真菌代谢葡

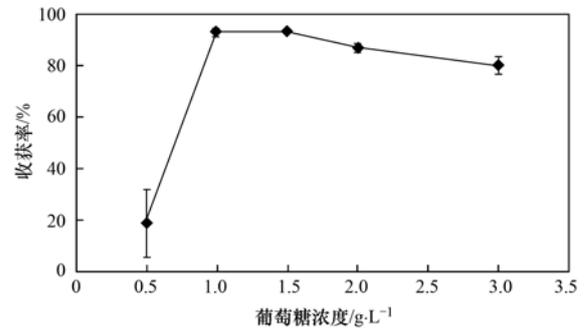


图 6 葡萄糖质量浓度对收获效率的影响

Fig. 6 Effect of glucose concentration on harvest efficiency

萄糖所产生的某些副产物. 由图 6 可以看出,随葡萄糖质量浓度的上升,微藻收获率呈先增加后下降的趋势,在葡萄糖质量浓度为 $1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,收获率达最大分别为 92.76% 和 93.19%. 故选取葡萄糖质量浓度 $1.0 \sim 1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为最适葡萄糖范围.

表 5 不同葡萄糖质量浓度生长收获记录¹⁾

Table 5 Harvest record with different glucose concentrations

组名	葡萄糖质量浓度 /g·L ⁻¹	孢子数 × 10 ⁶ /mL	藻细胞数 × 10 ⁶ /mL	生长收获情况		
				平行 1	平行 2	平行 3
空白	0.0	2.925	16.170	+ -	+ -	+ -
1 组	0.5	2.925	16.170	++	++	++
2 组	1.0	2.925	16.170	++	++	++
3 组	1.5	2.925	16.170	++	++	++
4 组	2.0	2.925	16.170	++	++	++
5 组	3.0	2.925	16.170	++	++	++

1) “++”代表菌藻共生长成球; “+ -”代表藻生长菌未生长

2.1.4 多因子对收获效率的影响

考虑到 pH、菌藻比以及葡萄糖质量浓度之间的相互作用,根据单因子试验结果,对 3 个因子及其最佳水平范围进行正交试验,以 L₂₇(3¹³) 正交表进行实验,所选因子及对应水平如表 6 所示. 对各因子的水平进行随机化处理,实验条件及结果如表 7 所示.

从正交试验结果表 7 来看,菌藻共培养的最优条件为: pH = 6.0, 葡萄糖质量浓度 1.25 g·L⁻¹, 菌藻比为 1:250. 这与 Zhou 等^[9] 在异养培养条件下,

当米曲霉孢子浓度为 1.2 × 10⁴ 个·mL⁻¹、葡萄糖质量浓度为 20 g·L⁻¹、pH 为 4~5 时,小球藻的收获效率最佳的实验结果相比, pH 更接近中性更易调控,且葡萄糖的用量减少了 93.75%,在保证了收获效率的同时,收获成本得到降低.

表 6 正交试验因子及水平

Table 6 Factors and levels of orthogonal experiment

因素	水平		
	A pH	6.0	6.1
B 菌藻比	1:200	1:250	1:300
C 葡萄糖质量浓度/g·L ⁻¹	1.00	1.25	1.50

表 7 正交试验结果

Table 7 Result of orthogonal experiment

试验号	因素														收获效率 /%
	A	B	A × B	C	A × C	B × C	空	空	B × C	空	空	空	空		
1	6.2	1.25	1	1	1:200	1	1	1	1	1	1	1	1	76.62	
2	6.2	1.25	1	1	1:250	2	2	2	2	2	2	2	2	62.68	
3	6.2	1.25	1	1	1:300	3	3	3	3	3	3	3	3	59.25	
4	6.2	1	2	2	1:200	1	1	2	2	2	3	3	3	90.98	
5	6.2	1	2	2	1:250	2	2	3	3	3	1	1	1	85.60	
6	6.2	1	2	2	1:300	3	3	1	1	1	2	2	2	71.57	
7	6.2	1.5	3	3	1:200	1	1	3	3	3	2	2	2	44.12	
8	6.2	1.5	3	3	1:250	2	2	1	1	1	3	3	3	23.08	
9	6.2	1.5	3	3	1:300	3	3	2	2	2	1	1	1	28.74	
10	6.1	1.25	2	3	1:200	2	3	1	2	3	1	2	3	66.02	
11	6.1	1.25	2	3	1:250	3	1	2	3	1	2	3	1	80.75	
12	6.1	1.25	2	3	1:300	1	2	3	1	2	3	1	2	65.67	
13	6.1	1	3	1	1:200	2	3	2	3	1	3	1	2	66.02	
14	6.1	1	3	1	1:250	3	1	3	1	2	1	2	3	57.57	
15	6.1	1	3	1	1:300	1	2	1	2	3	2	3	1	72.74	
16	6.1	1.5	1	2	1:200	2	3	3	1	2	2	3	1	68.88	
17	6.1	1.5	1	2	1:250	3	1	1	2	3	3	1	2	68.58	
18	6.1	1.5	1	2	1:300	1	2	2	3	1	1	2	3	68.37	
19	6.0	1.25	3	2	1:200	3	2	1	3	2	1	3	2	85.94	
20	6.0	1.25	3	2	1:250	1	3	2	1	3	2	1	3	91.08	
21	6.0	1.25	3	2	1:300	2	1	3	2	1	3	2	1	84.29	
22	6.0	1	1	3	1:200	3	2	2	1	3	3	2	1	87.15	
23	6.0	1	1	3	1:250	1	3	3	2	1	1	3	2	84.34	
24	6.0	1	1	3	1:300	2	1	1	3	2	2	1	1	83.99	
25	6.0	1.5	2	1	1:200	3	2	3	2	1	2	1	3	86.36	
26	6.0	1.5	2	1	1:250	1	3	1	3	2	3	2	1	84.50	
27	6.0	1.5	2	1	1:300	2	1	2	1	3	1	3	2	82.34	

为估计试验误差大小并判断各因素及其交互作用的显著程度,对正交试验结果数据进行方差分析,提高 F 检验的灵敏度. 结果如表 8 所示;因素 pH、葡萄糖质量浓度以及 pH 与葡萄糖质量浓度的交互作用对收获效率影响高度显著,其中 pH 的影响最大;

而菌藻比、pH 与菌藻比的交互作用对收获效率有影响;葡萄糖与菌藻比的交互作用影响不显著. 这与之前的实验结果相吻合,pH 对卷枝毛霉能否成球起关键作用,而葡萄糖是卷枝毛霉生长的必备碳源,故二者及二者的交互作用对收获效率有着决定性的作用.

表 8 正交试验方差分析

Table 8 Variance analysis of orthogonal result

因素	平方和	自由度	均方	F 值	F 临	P 值	显著性
A	0.300 0	2	0.150 0	49.785 8	$F_{0.01}(2,12) = 6.93$	0.000 1	高度显著
B	0.131 7	2	0.065 8	21.850 9	$F_{0.01}(2,12) = 6.93$	0.000 1	高度显著
A × B	0.275 6	4	0.068 9	22.966 7	$F_{0.01}(4,12) = 5.40$	0.000 1	高度显著
C	0.017 2	2	0.008 6	2.850 9	$F_{0.1}(2,12) = 2.81$	0.097 0	有影响
A × C	0.035 3	4	0.008 8	2.941 7	$F_{0.1}(4,12) = 2.48$	0.100 0	有影响
误差	0.036 2	12	0.003 0				
总和	0.798 3						

2.1.5 收获条件的污水验证

由于实际生活污水水质水量的波动,对小球藻培养及采收存在一定影响,因此在前期的实验中主要以人工配水为主以便排除干扰,对卷枝毛霉收获小球藻的条件进行定性定量分析以及重复实验. 为了确定在人工污水实验条件下得出的共培养收获条件,能否适用于在实际生活污水中培养的微生物,将正交试验优化出的最佳收获条件应用于实际污水培养的小球藻收获. 将大学城实际生活污水用纱布过滤,取适量滤液按 10% 比例接种小球藻后置于室外培养,每天测定其 D 值待小球藻生物量稳定后进行收获实验. 实验条件为 2.1.4 节的最优条件.

结果证明,以人工配水为培养基培养的小球藻和卷枝毛霉共培养的收获效率为 91.08%; 以生活污水为培养基培养,收获效率略高于以人工配水培养的小球藻,为 92.33%. 因此在以人工配水为培养基的条件下得出的最佳收获条件仍然适用于实际污水中小球藻的收获. 同时生活污水水质变化导致收获效率波动较大.

2.2 收获机制的初步探索

2.2.1 胞外聚合物多糖对收获的影响

菌藻共培养组命名为 G 组,真菌卷枝毛霉单独培养组命名为 J 组,小球藻单独培养组命名为 Z 组. 菌藻共培养条件为正交试验优化所得的最佳收获条件. 每组 3 个平行,置于 28°C , $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 恒温摇床内培养 48 h,测定各组培养前后,培养基内多糖的质量浓度. 实验结果如图 7 和图 8 所示.

由图 7 和图 8 可知,蒽酮硫酸法测定培养前溶液的多糖质量浓度约为 $1.32 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,经过 48 h 培养后,除 Z 组外,其余两组的多糖质量浓度都接近于

零,其中 J 组的葡萄糖质量浓度变化率最大,降幅比达 98.33%; 用 DNS 法测定培养前溶液多糖质量浓度约为 $1.16 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,经过 48 h 培养后,同样,除 Z 组外,其余两组多糖质量浓度趋于零,两组下降幅度均接近 100%.

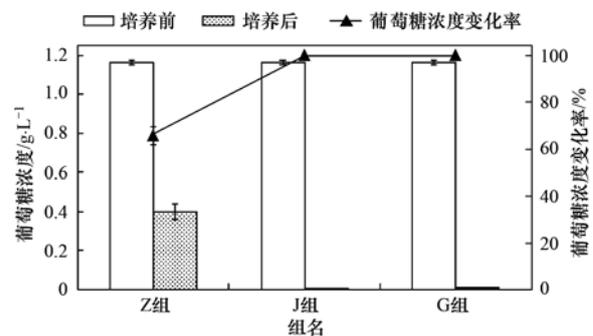


图 7 蒽酮硫酸法所测多糖对比

Fig. 7 Polysaccharide measured by anthrone-sulfuric acid method

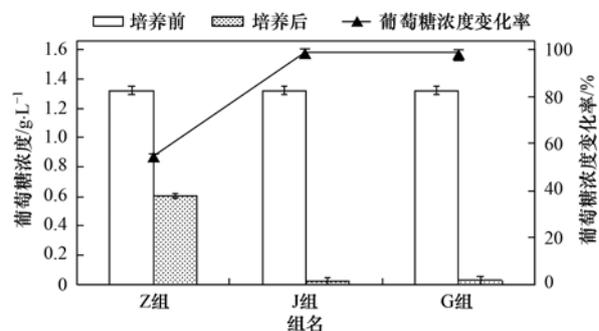


图 8 DNS 法所测多糖对比

Fig. 8 Polysaccharide measured by DNS method

蒽酮硫酸法测定的是溶液中总糖质量浓度, DNS 法主要测的是溶液中还原糖质量浓度,主要为其中葡萄糖质量浓度,因此不论培养前后,溶液中葱

酮硫酸法所测结果均高于 DNS 法所测结果. DNS 法测定的多糖质量浓度变化情况主要反映的是溶液中所添加的葡萄糖变化情况. 因此由酮硫酸法所测定总糖质量浓度减去所添加的葡萄糖总量, 剩余多糖质量浓度反映的才是小球藻与卷枝毛霉分泌的多糖变化情况, 两者相减后数值变化如图 9 所示.

由图 9 可知, Z 组在培养 48 h 后多糖质量浓度有所增加, 增加量 $0.047 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 而 J 组与 G 组培养后多糖质量浓度均大幅度下降, G 组培养后多糖质量浓度为 $0.024 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 略高于 J 组的 $0.019 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此推断, 微藻单独培养时会向溶液中分泌某种多糖物质, 这种多糖物质正好可以被卷枝毛霉分解利用. 因此, 培养后 Z 组多糖质量浓度有所增加, J 组多糖质量浓度大幅下降; 菌藻共培养时, 小球藻仍会向外分泌此类多糖供卷枝毛霉利用, 二者有一定共生作用. 因此培养后 G 组中多糖质量浓度高于 J 组.

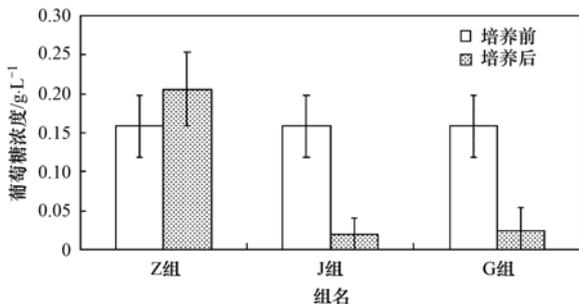


图 9 酮硫酸法与 DNS 法所测多糖质量浓度的差值变化

Fig. 9 Difference between the polysaccharide concentrations measured by anthrone-sulfuric acid method and DNS method

2.2.2 细胞表面电荷对收获的影响

实验取适量小球藻藻液离心, 取上清液过滤液作为培养基, 添加少量葡萄糖后接种适量卷枝毛霉孢子悬液, 培养一段时间待真菌长成, 用盐酸调节溶液呈不同 pH 值, 测定卷枝毛霉细胞表面的 Zeta 电位值; 另取适量藻液直接用盐酸调节溶液 pH, 测定小球藻细胞表面的 Zeta 电位值. 结果如图 10 所示.

由图 10 可知, 小球藻细胞表面的 Zeta 电位值变化波动不大, 基本维持在 -25 mV 至 -20 mV 范围内, 全部为负. 卷枝毛霉细胞表面的 Zeta 电位值, 当培养液 pH 值大于 7.0 时, 没有明显变化; 当培养液 pH 值小于 7.0 时, 随着 pH 值的变小, Zeta 电位值急剧增大.

Zeta 电位一般用来评价或预测微粒分散体系的物理稳定性, 是对颗粒之间相互排斥或吸引力强度的度量. 当其数值维持在一个相对稳定的范围时,

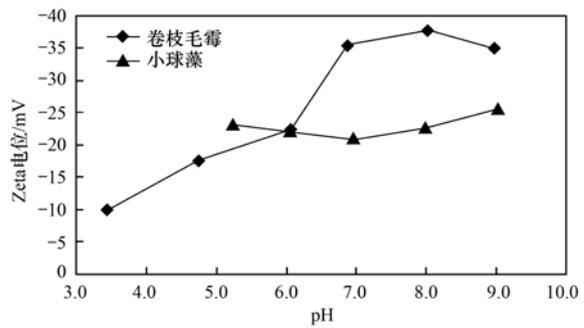


图 10 不同 pH 条件下菌藻细胞表面 Zeta 电位值

Fig. 10 Zeta potential of the Bacterial and algal cell surface under different pH conditions

分散体系趋于稳定, Zeta 电位的绝对值越高, 体系越稳定, 越低越倾向于凝聚或凝结^[18]. 因此单独培养时, 微藻细胞表面电荷随藻液 pH 变化无明显波动, Zeta 电位相对稳定, 使溶液体系内排斥力占主导地位, 故微藻细胞稳定分散于藻液中; 而卷枝毛霉细胞表面电荷量随溶液进入酸性后, 急剧下降, Zeta 电位绝对值不断降低, 排斥能不断下降, 最终导致菌体间吸引力超过了排斥力, 因而分散被破坏, 使得真菌发生凝结或凝聚.

由上可知, 当调节菌藻混合液初始 pH 为弱酸性菌藻共培养时, 卷枝毛霉利用小球藻分泌的葡萄糖生长代谢并不断向混合液分泌释放酸性物质致使混合液 pH 不断下降, 使得真菌细胞表面电荷不断被中和, Zeta 电位逐步下降, 同时也破坏了小球藻细胞间稳定性, 使得菌藻细胞间排斥能不断下降, 最终导致小球藻向卷枝毛霉细胞周围凝聚最后在重力作用下沉淀. 这也正是当调节菌藻混合液 pH = 6.0 后静置培养时, 长出的卷枝毛霉菌块上会附着大量小球藻的原因.

这与 Liu 等^[19]通过投加硝酸降低培养液 pH 使自絮凝藻细胞表面接收质子而使得其电荷为正, 从而吸引目标藻形成絮体而沉降下来的研究有类似之处. 本文中的真菌与 Liu 等研究中自絮凝藻具有相似之处. 本文中菌藻二者 Zeta 电位值均为负, 故而排除正负胶体以及异号电荷间的吸附架桥作用. 由此推断, 致使菌藻相互吸附的主要机制为电中和吸附; 但卷枝毛霉菌丝的存在, 不排除菌丝通过氢键、共价键作用对微藻进行吸附的可能性.

2.2.3 卷枝毛霉菌丝对收获的影响

对卷枝毛霉收获微藻后形成的菌球进行镜检, 结果如图 11, 小球藻紧密地围绕在卷枝毛霉菌丝四周, 而各菌丝又相互缠绕, 使得小球藻被牢固地固定

在菌球内,形成了蓝绿色菌球。

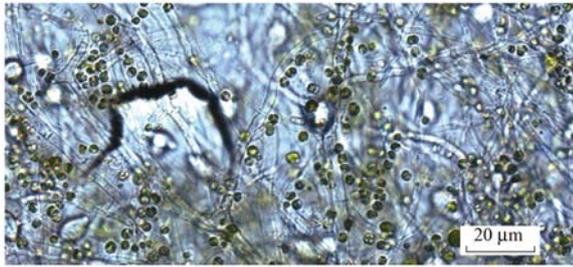


图 11 含藻菌球镜检图

Fig. 11 Microscopic examination of algae-bacteria pellets

在混合液摇晃过程中,小球藻与卷枝毛霉菌丝相互碰撞,并在电中和作用下被吸附至菌丝周围;同时,菌丝在液体摇动的过程中相互缠绕形成絮状小球,并通过卷扫作用逐步吸附其余藻体,最终形成菌藻密不可分的真菌微藻球使得微藻被大量收获。

综上所述,解释了前文正交试验结果中 pH 与葡萄糖质量浓度对收获效率影响高度显著的原因,对收获条件变化会导致收获效率变化的规律有了一定了解. 由此可以根据具体收获情况,调整收获条件同时保证一个较高的收获效率,例如在卷枝毛霉收获小球藻时,可以提高葡萄糖质量浓度,维持原菌藻混合液初始 pH.

3 结论

(1)以人工配水为培养基,收获效率为指标,通过单因子试验和正交试验得到最佳收获条件为: pH = 6.0, 葡萄糖质量浓度为 $1.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 菌藻比为 1:250, 收获效率为 91.08%. 并验证此收获条件完全适用于实际污水中小球藻的收获,其收获效率可达 92.33%.

(2)对培养前后溶液中多糖质量浓度进行测定,发现小球藻在培养 48 h 后多糖质量浓度较培养前增加了约 $0.047 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 而菌藻共培养后的混合液中多糖质量浓度为 $0.019 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此可知在菌藻共培养过程中,小球藻会向外分泌某些水溶性多糖物质供卷枝毛霉利用,二者有一定的共生作用。

(3)对小球藻和卷枝毛霉细胞表面 Zeta 电位进行测量发现,小球藻细胞表面 Zeta 电位值随藻液 pH 变化波动不大. 而卷枝毛霉细胞表面 Zeta 电位值,随 pH 值变小,电位值可由原先最高 -37.7 mV 升至 -9.87 mV . 由此推断菌藻相互吸附主要机制为电中和吸附。

(4)通过上述实验确定卷枝毛霉收获过程. 首先卷枝毛霉利用小球藻分泌的多糖进行代谢活动,

产生酸性物质导致混合液 pH 不断降低,直至产生电中和作用致使小球藻被吸附至卷枝毛霉菌丝周围;然后,菌丝随液体摇动相互缠绕将吸附在其表面的小球藻不断包裹进去形成絮状小球,同时絮状小球还可通过卷扫作用进一步吸附其余藻体,最终形成菌藻密不可分的真菌微藻球。

参考文献:

- [1] Abdelaziz A E M, Leite G B, Hallenbeck P C. Addressing the challenges for sustainable production of algal biofuels: II. Harvesting and conversion to biofuels [J]. Environmental Technology, 2013, **34**(13-14): 1807-1836.
- [2] Zamalloa C, Vulsteke E, Albrecht J, et al. The techno-economic potential of renewable energy through the anaerobic digestion of microalgae [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 1149-1158.
- [3] Gultom S O, Hu B. Review of microalgae harvesting via co-pelletization with filamentous fungus [J]. Energies, 2013, **6**(11): 5921-5939.
- [4] Richardson J W, Johnson M D, Outlaw J L. Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the southwest [J]. Algal Research, 2012, **1**(1): 93-100.
- [5] 沈英, 赵云, 李麒麟. 微藻生物质采收方法的经济性和效率研究进展 [J]. 湖北农业科学, 2012, **51**(22): 4982-4984, 4991.
Shen Y, Zhao Y, Li Q L. Research review on the economical efficiency of microalgae harvesting methods [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, **51**(22): 4982-4984, 4991.
- [6] Zhang J G, Hu B. A novel method to harvest microalgae via co-culture of filamentous fungi to form cell pellets [J]. Bioresource Technology, 2012, **114**: 529-535.
- [7] Zhou W G, Cheng Y L, Li Y, et al. Novel fungal pelletization-assisted technology for algae harvesting and wastewater treatment [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2012, **167**(2): 214-228.
- [8] Xie S X, Sun S, Dai S Y, et al. Efficient coagulation of microalgae in cultures with filamentous fungi [J]. Algal Research, 2013, **2**(1): 28-33.
- [9] Zhou W G, Min M, Hu B, et al. Filamentous fungi assisted bio-flocculation: a novel alternative technique for harvesting heterotrophic and autotrophic microalgal cells [J]. Separation and Purification Technology, 2013, **107**: 158-165.
- [10] Xia C J, Wei W, Hu B. Statistical analysis and modeling of pelletized cultivation of *Mucor circinelloides* for microbial lipid accumulation [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, **172**(7): 3502-3512.
- [11] Wrede D, Taha M, Miranda A F, et al. Co-cultivation of fungal and microalgal cells as an efficient system for harvesting microalgal cells, lipid production and wastewater treatment [J]. PLoS One, 2014, **9**(11): e113497.
- [12] 刘洁霞. pH 值诱导能源微藻原位絮凝方法的建立及机理研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2014. 16-53.
- [13] 况琪军, 谭渝云. 活性藻系统对氮、磷及有机物的去除研究 [J]. 中国环境科学, 2001, **21**(3): 212-216.
Kuang Q J, Tan Y Y. Study on the removal of nitrogen、

- phosphorus and organics by activated algae system[J]. China Environmental Science, 2001, **21**(3): 212-216.
- [14] 魏玉滨. 利用市政污水培育产油斜生栅藻的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 22-23.
- [15] 吕旭阳, 张雯, 杨阳, 等. 分光光度法测定小球藻数量的方法研究[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(23): 11104-11105.
- Li X Y, Zhang W, Yang Y, *et al.* Methodological research on measuring chlorella quantity by spectrophotometry[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, **37**(23): 11104-11105.
- [16] 李强, 唐微, 石园园, 等. 蒽酮-硫酸法和 3, 5-二硝基水杨酸法测定杜仲水提液多糖含量[J]. 食品工业科技, 2010, **31**(10): 370-371, 374.
- Li Q, Tang W, Shi Y Y, *et al.* Determination of polysaccharide in water extraction from *Eucommia ulmoides* Oliver by 3, 5-dinitrosalicylic acid(DNS) method and anthrone-sulfuric method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, **31**(10): 370-371, 374.
- [17] 刘玥, 刘晓兰, 周利敏, 等. DNS 法测定 D-氨基葡萄糖含量方法的研究[J]. 中国调味品, 2014, **39**(10): 89-93.
- Liu Y, Liu X L, Zhou L M, *et al.* Establishment of a method for determination of D-glucosamine content with 3, 5-dinitrosalicylic acid reagent[J]. China Condiment, 2014, **39**(10): 89-93.
- [18] 陈宗淇, 王光信, 徐桂英. 胶体与界面化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 159-166.
- [19] Liu J X, Tao Y J, Wu J H, *et al.* Effective flocculation of target microalgae with self-flocculating microalgae induced by pH decrease[J]. Bioresource Technology, 2014, **167**: 367-375.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2016年10月12日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2015年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2015年度总被引频次8 844,影响因子1.617,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172