

钛酸盐纳米材料和斜生四链藻协同处理 农村生活污水的效应研究

李渊^{1,2}, 葛歧利¹, 吉莉¹, 毕永红²

(1.太原科技大学 环境与资源学院,太原 030024;

2.中国科学院 水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室,武汉 430072)

摘要:当前我国农村生活污水治理形势依然严峻,藻类和纳米材料结合可以有效地处理生活污水,探究纳米材料对生活污水中藻类的影响十分重要.基于钛酸盐纳米材料的调控,研究斜生四链藻处理生活污水的效应.结果表明,低质量浓度钛酸盐纳米材料添加到生活污水中后,斜生四链藻细胞经过 6 d 的适应期,表现出一定的生长促进作用,在 10 d 的培养过程中藻细胞增长了近 97%.在质量浓度 0.1 g/L 的添加下,钛酸盐纳米材料对藻类生物量增长的影响最大,在 0.2 g/L 的添加质量浓度下,藻细胞生长受到抑制.

关键词:藻类;生活污水;纳米材料;钛酸盐;生长抑制实验

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

农村生活污水具有范围广、产量大、处理率低、氮磷排放负荷高等特点,农村生活污水的安全处置问题,已对农村饮用水源的安全构成严重威胁^[1].据 2017 年《第二次全国污染源普查公报》显示,全国农村生活污水排放量为 $75.91 \times 10^8 \text{ m}^3$,COD 排放量占生活源排放总量的 50.8%, $\text{NH}_3\text{-N}$,TN 和 TP 排放量分别占生活源排放总量的 35.0%,30.5%,38.7%^[2-3].藻类在生活污水深度处理方面有着明显的优势.藻类能够充分利用生活污水中的氮、磷等营养元素,降低污染物指标的同时,还能积累优质蛋白和脂质,可用于生产优质肥料和生物燃料^[4-5].除了水质改善之外,污水处理与藻类培养结合还可提供可再生能源,而且不需要占用农业用地.因此,许多国家和地区已将藻类培养作为实现污水生态处理和可再生能源生产的战略发展目标.然而,在处理养殖废水时需要将污水进行大量稀释(10%~30%),以消除对藻类的生长抑制^[6].藻类会由于底物中某些污染物质量浓度过高,导致生物量大幅度下降甚至死亡^[7-9].许多挥发性脂肪酸、酚类及重金属等物质都会抑制藻类的生长,严重影响藻类对污水的处理效果,很大程度上制约了其大规模的应用.纳米材料由于其特殊物理化学性质(如荧光特性、高催化性、良好的导热导电性、特殊的表面张力),已被广泛应用于环境修复^[10-11].

低剂量的纳米颗粒能够有效地降低环境污染物毒性,促进藻类生物质能源的积累,对微藻生长具有一定的正向调节作用,并提高其光合固碳效率和蛋白质代谢水平^[12-15].然而,不同纳米材料对微藻生长的促进作用存在差异,纳米材料的添加剂量和添加方式也有待探究,弄清其对微藻处理污水效应的影响是解决问题的关键步骤.因此,本研究以斜生四链藻(*Tetradesmus obliquus*)处理生活污水为切入点,选择钛酸盐纳米材料(Titanate Nanomaterials, TNTs)为目标添加物,探究纳米材料对微藻生长状况和污水处理效应的影响,研究结果可为生活污水的高效无害处理提供理论依据.

收稿日期:2022-06-04;修回日期:2022-07-22.

基金项目:国家自然科学基金(31971477;42177057;42207528);山西省重点研发计划项目(2022ZDYF125).

作者简介:李渊(1987—),男,山西太原人,太原科技大学副教授,博士,研究方向为水域生态学,E-mail:liyuan_198711@sina.com.

通信作者:毕永红,E-mail:biyh@ihb.ac.cn.

1 材料与方法

1.1 藻种来源与培养条件

本实验选用的斜生四链藻(*Tetradesmus obliquus*, FACHB416)来自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库(FACHB).实验前将藻种在无菌条件下接种在 BG-11 培养基的锥形瓶中,置于光照培养箱中进行扩大培养.培养条件:温度 25 °C,光照强度 2 000 lx,光暗比 12 h : 12 h,每天定时轻摇锥形瓶 3 次.

1.2 纳米材料的制备

本实验钛酸盐纳米材料用 P25 型纳米 TiO₂ 颗粒(包含质量分数 80% 锐钛矿和 20% 金红石, Evonik, 德国), 100 目活性炭(DARCO, 美国).实验选用的钛酸盐纳米材料(TNTs)用一步碱热合成法完成:

(1)将 TiO₂ 颗粒和活性炭 100 目按照 1 : 1 的质量比例混合在一起,并将其分散到 10 mol/L 的 NaOH 溶液中.

(2)用磁力搅拌器充分搅拌溶液 24 h,将混合溶液转移到聚四氟乙烯内衬的高压反应釜中,放到电热鼓风干燥箱中 130 °C 合成反应 72 h.

(3)反应后的混合溶液冷却至室温,用高速离心机 6 000 r/min 离心 8 min,弃掉上面的液体.

(4)离心得到的黑色材料用去离子水反复洗至 pH 降到 9~10,将材料放置到培养皿中,用 80 °C 烘箱烘干,然后研磨即可得到钛酸盐纳米材料.

1.3 实验污水的制备

本实验污水采用人工配水,1 L 污水的具体配方如下:葡萄糖 400.00 mg;NH₄SO₄ 189.00 mg;NaNO₃ 243.00 mg;KH₂PO₄ 43.90 mg;NaHCO₃ 100.00 mg;NaCl 64.00 mg;MgSO₄ · 7H₂O 185.00 mg;FeSO₄ · 7H₂O 9.10 mg;CaCl₂ 25.00 mg;H₃BO₃ 2.86 mg;CuSO₄ · 5H₂O 0.08 mg;CoCl₂ · 6H₂O 0.05 mg.水化学指标的模拟结果:pH 为 7.50,NH₄-N 为 47.22 mg/L,TN 为 50.56 mg/L,TP 为 11.23 mg/L.

1.4 实验设计

1.4.1 钛酸盐纳米材料和藻类混合液制备

在光照培养箱中培养斜生四链藻至对数生长期,然后取 20 mL 斜生四链藻藻液用离心机 6 000 r/min 离心 5 min,弃掉上清液,得到藻细胞.将钛酸盐纳米材料加入到人工生活污水中,超声混匀,质量浓度梯度分别是:0.00 g/L,0.05 g/L,0.10 g/L,0.15 g/L 和 0.20 g/L.最后,将藻细胞加入到含有 200 mL 纳米材料和人工生活污水的 250 mL 锥形瓶中,震荡摇匀,放入光照培养箱中培养待用.每个组设置 3 个平行,所有操作均在超净工作台上进行无菌操作.

1.4.2 钛酸盐纳米材料和藻类混合物的表征

晶体结构(XRD)的测定:实验取足量的斜生四链藻细胞和钛酸盐纳米材料得混合液,用冷冻干燥机处理 24 h,得到粉末状混合物,将粉末状的混合物均匀地放置到样品槽内,压实后用 X 射线衍射仪(XRD)对材料的晶体结构及矿物种类进行扫描测定,Cu 靶,Ka 辐射,工作电压 40 Kv,电流 30 mA,停留时间 0.01,步长 0.01°.扫描范围:2θ = 10°~80°.物质表面元素(XPS)的测定利用 X 射线激发试样的电子能谱,进一步分析物质表面元素,它的分析基础方程式为 Einstein 光电发射放射方程:

$$h\nu = E_K + E_B,$$

其中, h 为普朗克常数, ν 为入射光频率, E_K 为光电子所获的动能, E_B 为电子的结合能.通过测定样品的电子结合能,来测定样品中所包含的元素.测试时,在面积 1 cm² 的双面胶带的一面均匀地铺撒样品,样品要覆盖胶带,另一面要贴在试样台上.测试以 Al 靶为发射源,射线功率为 150 W.

1.5 实验测定方法与统计分析

1.5.1 藻类干质量的测定

对于藻类干质量的测定,以干藻细胞质量计算测量藻类生物产量.每次测量时,人工摇动藻液混匀.每次取用 10 mL 藻液;用 0.45 μm 醋酸纤维素膜过滤收集细胞,以测定藻类生物量.然后,将空白的醋酸纤维素膜和具有藻类细胞的醋酸纤维素膜烘箱中 105 °C,干燥 24 h,分别称量干质量.藻类质量浓度 C (mg/L),根据

以下公式计算:

$$C = (W_{t_i} - W_{t_0}) / V,$$

其中, W_{t_i} 和 W_{t_0} 分别指带有藻类细胞的过滤器的干质量和空白过滤器的干质量, V 是藻类培养物的体积.

1.5.2 叶绿素荧光参数测定

使用便携式 PAM 荧光计 AquaPen-C AP-C 100 测量叶绿素荧光参数. 每次测量时, 用 3 mL 藻类培养物填充反应杯, 并用塞子关闭反应杯. 在室温下暗适应 15 min 后, 使用 OJIP 测试通过 PAM 荧光计自动获得 F_v/F_o 和 F_v/F_m 值. 实验叶绿素荧光参数如下, F_o : 初始荧光 ($F_{50 \mu s}$, 荧光强度为 $50 \mu s$); F_m : 最大荧光强度; F_v : 最大可变荧光 ($F_m - F_o$); F_v/F_o : PSII 的潜在活性; F_v/F_m : PSII 光化学的最大量子产额 ($(F_m - F_o)/F_m$, $0 < F_v/F_m < 1$), 反映了所有 PSII 反应中心处于开放状态时的量子产额.

1.5.3 试验数据采用 Sigmaplot 14.0 分析, 数据测试均重复 3 次, 组间差异比较采用 t 检验.

2 结果与讨论

2.1 纳米材料添加量对斜生四链藻生长状况的影响

不同 TNTs 质量浓度对藻液的 pH 变化影响将斜生四链藻培养在含有不同质量浓度钛酸盐纳米颗粒的生活污水中, 培养液 pH 随时间的变化如图 1 所示. 结果显示, 藻类培养过程中, 在不同 TNTs 质量浓度下, pH 均呈现出缓慢增长的变化趋势, 培养前 2~3 d, pH 略有下降, 未添加 TNTs 的培养液 pH 波动最大, 随培养时间的增长. 在培养前 5 d, 加入纳米颗粒的量对 pH 的变化影响不显著, 当生长到第 7 d 的时候, 低 TNTs 质量浓度下 (0.00, 0.05, 0.10 g/L) pH 增长明显, 第 7 d 的 pH 最大值范围是 9.2~10.3. 纳米颗粒质量浓度较高时, 能维持 pH 的相对稳定.

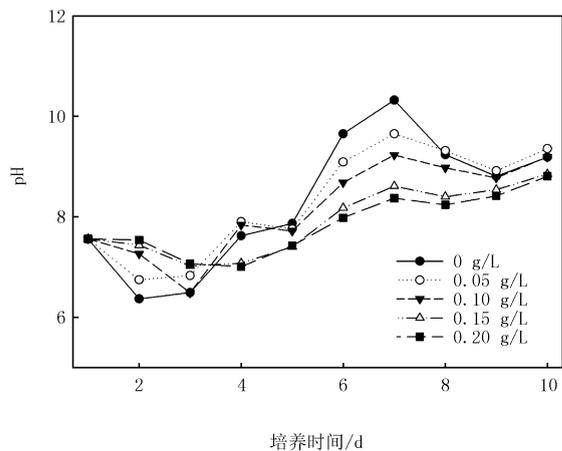


图1 不同TNTs质量浓度中pH的变化

Fig.1 Variation of pH in different nanoparticle concentrations

当藻细胞进行光合作用时可以吸收水中的 CO_2 , 而呼吸作用则可以产生 CO_2 , 对 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 之间的平衡有着一定影响^[13], 打破了原始的酸碱状态. 当高质量浓度的纳米颗粒加入斜生四链藻培养体系中, 超过 0.1 g/L 时, 纳米颗粒覆盖到藻细胞的周围或者水体中, 这就造成藻细胞的光合作用减弱, 同时对于藻类的生长出现一定的抑制效果, 减少了对于 CO_2 的利用, 故而 pH 增长缓慢. 而当纳米颗粒的质量浓度小于 0.1 g/L 时, 藻细胞光合作用速率大于呼吸作用速率, 导致 CO_2 的利用大于产出, 这样就导致水体中 pH 升高. 同时对于藻细胞生长依靠氮源和碳源, 培养水体中碳源和氮源的利用消耗, 也是导致 pH 增长的重要原因.

2.2 不同 TNTs 质量浓度下斜生四链藻生长的影响

实验观察发现, 随着培养时间的增长, 藻细胞会出现增长 (图 2). 以此监测藻类生物量的变化, 根据图中对于钛酸纳米颗粒的质量浓度不同, 发现对于纳米材料质量浓度小于 0.10 g/L 时, 藻类生物量随培养时间呈迅速增长的趋势. 而在纳米材料质量浓度是 0.15 g/L 时, 藻类生物量增长缓慢, 增长率是仅为 27%, 在纳米材料质量浓度为 0.20 g/L 时, 藻类生物量呈负增长或生物量无明显变化. 根据图中的生物量增长比率, 当纳米材料质量浓度是 0.10 g/L 时, 藻细胞生物量增长迅速, 第 2 d 生物量质量浓度是 205 mg/L, 第 10 d 达到 405 mg/L. 在培养结束的时候, 未添加纳米材料的实验组, 生物量增长率是 75%, 纳米材料质量浓度是

0.10 g/L,生物量增长率可以达到 97%,生物量增长接近 2 倍(图 3).一定的低质量浓度改性钛酸盐纳米材料对斜生四链藻产生的促进作用可能由于分解出少量的 Ti 离子对藻细胞存在一定的营养作用.低质量浓度的纳米材料对藻类生理性质产生影响,表明刺激藻细胞多糖和酶活性的增长,会导致藻细胞表现一定的促进生长特性^[16].

不同微藻的种类和钛酸盐纳米材料协同处理对于模拟生活污水污染物的去除效果虽然存在一些差异,但在由于钛酸盐纳米材料的加入中对污染物去除存在的藻种依赖性减弱.实验最终发现先用钛酸盐纳米材料处理前 2 d,再加入藻细胞的培养方式对于污水中 COD、氮磷营养元素的处理时间变短,去除效率变高,适合建立微藻-纳米材料协同处理体系.实验表明,微藻-纳米材料协同处理体系能缩短污水处理的时间,提高去除效率,为强化微藻处理能力提供一种可行性研究.通过微藻生物修复和纳米颗粒相结合以克服技术局限性,将成为开发新的有效修复技术的潜在机会^[17].

2.3 不同 TNTs 质量浓度下斜生四链藻叶绿素荧光特性的影响

通过在培养斜生四链藻的污水中添加不同质量浓度的改性钛酸盐纳米材料,设置 0.00,0.05,0.10,0.15,0.20 g/L 5 个不同质量浓度,测定藻类在不同质量浓度的纳米材料下的光合特性,如图 4 所示.

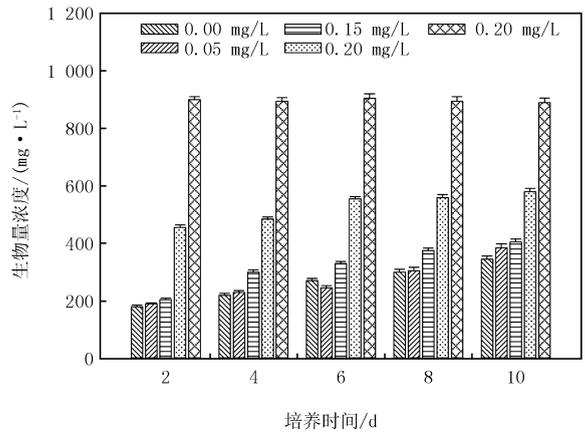


图2 不同质量浓度纳米颗粒对*T. obliquus*生物量的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of nanoparticles on biomass of *T. obliquus*

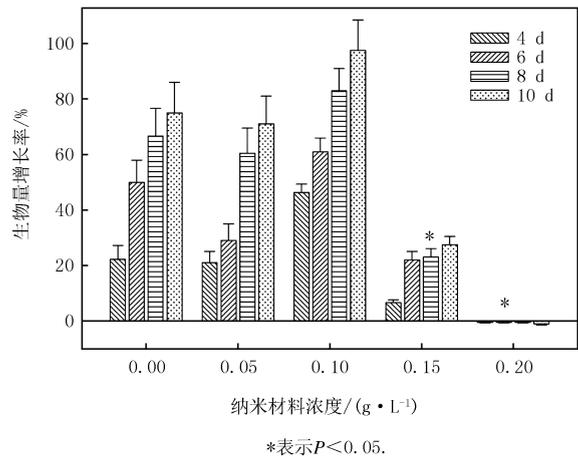
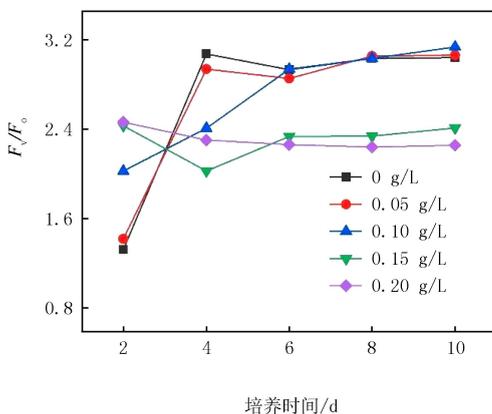
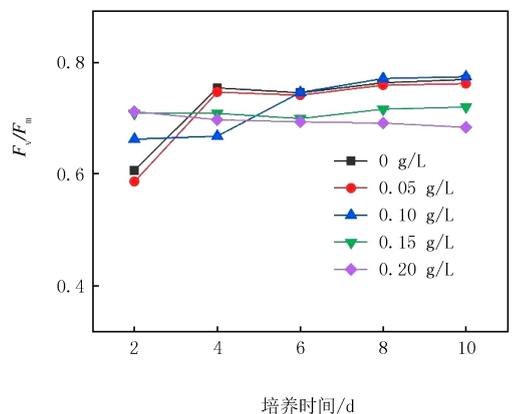


图3 不同质量浓度纳米颗粒对*T. obliquus*生长率的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of nanoparticles on growth rate of *T. obliquus*



培养时间/d



培养时间/d

图4 不同质量浓度的纳米材料对*T. obliquus*的 F_v/F_o 和 F_v/F_m 的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of nanomaterials on F_v/F_o and F_v/F_m of *T. obliquus*

在无微藻添加的情况下,纳米材料的 F_v/F_o 和 F_v/F_m 分别为 0.114 和 0.243.在设定的 5 个组中,高质

量浓度的纳米材料 0.15 g/L 和 0.20 g/L 的 F_v/F_0 和 F_v/F_m 值随着培养时间的增长而缓慢下降,表现出高质量浓度纳米材料对藻的生长出现一定抑制的情况.在前 4 d 未添加纳米材料的 0.00 g/L 和 0.05 g/L 质量浓度的组, F_v/F_0 和 F_v/F_m 值的快速增长,表现出很高的生长潜力.实验研究发现在纳米材料质量浓度为 0.1 g/L 时,藻细胞的潜在活性 F_v/F_0 值一直呈上升趋势,在前 6 d 的时间里表现出对于纳米材料加入的适应性,在第 6 d 的实验组 F_v/F_0 值高出没有添加纳米材料 0 g/L 的组.纳米材料对于藻细胞生长表现出一定的促进作用,这与 NATARAJAN 等^[18]研究一致.在培养的第 6~10 d 时,纳米材料质量浓度是 0.1 g/L 的 F_v/F_0 和 F_v/F_m 值都在一个相对较高的值,表现出较好的叶绿素荧光特性,生长潜力良好.

不同纳米材料添加质量浓度,培养微藻的污水 pH 均呈现不断增长的状态,由于藻细胞光合作用吸收 CO_2 高于呼吸作用,破坏污水中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 之间的化学平衡.钛酸盐纳米材料质量浓度越高,培养过程中污水 pH 值上升的趋势越缓慢,高质量浓度纳米材料 (>0.1 g/L) 因纳米颗粒存在附着在藻细胞的表面,导致光合作用减弱, pH 值增长减缓. F_v/F_0 和 F_v/F_m 值反映出微藻细胞的生长情况,微藻的叶绿素荧光特性,在培养的前 6 d 纳米材料质量浓度时 0.1 g/L 时 F_v/F_0 和 F_v/F_m 值一直处于上升状态,并在第 6 d 达到甚至超过 0 g/L 和 0.05 g/L 时藻细胞 F_v/F_0 和 F_v/F_m 值.在纳米材料质量浓度为 0.1 g/L 时,表现出对藻细胞一定的生长促进作用,可能是由于藻细胞刺激以提高酶活性的原因,同时使得胞外多糖增加^[19].

2.4 TNTs 和斜生四链藻混合物表征结果影响

XRD 图谱显示(图 5), 2θ 在 9.5° , 24.2° , 28.1° , 48.1° 和 61.7° 处,钛酸钠盐的晶格衍射和相对应位置的衍射峰值是相符合的,代表其为单斜层状钛酸盐晶体组成^[18].钛酸盐的层状结构主要体现在 9.5° 处,而在 26° 的衍射峰值则代表的活性炭中的石墨结构,峰值表现不明显,分析是由于被钛酸盐纳米材料覆盖导致.添加藻类后实验可以进行 XRD 测定,并可以确定里面含有钛酸盐纳米材料,这样就表明处理过后藻类沉淀物中含有钛酸盐纳米材料.

实验结果显示添加纳米材料的藻细胞沉淀物,在结合能 1 071.18 eV 出现 Na 1s 含量占比 1.57%,相比于单独的藻细胞 1 071.18 eV 出现 Na 1s 含量占比 0.59% 高出很多,表明藻细胞表面有钠元素物质附着(图 6).在结合能 458.38 eV 处出现 Ti 元素,含量占比达 4.63%,根据 TNTs 的基本钛酸钠结构,即 $\text{Na}_x\text{H}_{2-x}\text{Ti}_3\text{O}_7 \cdot n\text{H}_2\text{O}$,说明藻细胞沉淀物表面含有钛酸盐纳米材料.分析出添加 TNTs 的藻细胞的元素比例,包括 Na (1.57%), Ti (4.63%), O (33.84%), C (57.63%) (表 2,表 3).

3 结论与建议

(1) 钛酸盐纳米材料对生活污水中的斜生四链藻具有一定的生长促进作用.

(2) 在 0.1 g/L 的添加质量浓度下,斜生四链藻细胞经过 6 d 的适应期,表现出最强的生长促进效应.

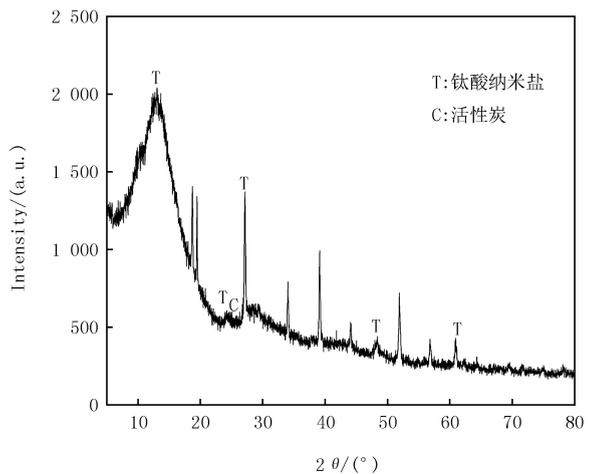


图5 含有 *T. obliquus* 的钛酸盐纳米材料 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of titanate nanomaterials containing *T. obliquus*

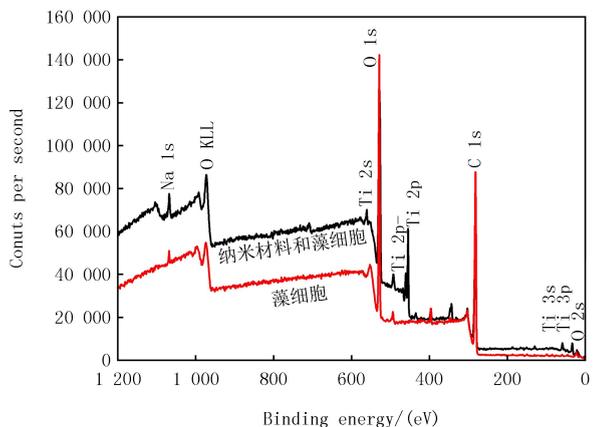


图6 添加钛酸盐纳米颗粒的前后 *T. obliquus* 的 XPS 宽谱扫描图

Fig. 6 XPS broad spectrum scans of *T. obliquus* before and after addition of titanate nanoparticles

(3)在 0.2 g/L 的添加质量浓度下,藻细胞生长受到抑制。

微藻生长消耗与纳米材料吸附降解作用相结合处理农村生活污水具有一定的应用前景,但纳米材料处理与藻类培养在工艺流程上未做到分离串联,可能相互影响.因此,探讨钛酸盐纳米材料处理后的二级废水对微藻生理特征影响是进一步的研究方向.本实验所用的人工模拟生活污水对农村生活污水的还原度不够高,今后需搜集有代表性的农村污水、城市污水处理厂污水、煤矿工业区污水和工业废水,利用纳米材料和微藻协同处理进行比较。

表 2 *T. obliquus* 的表面元素比例

Tab. 2 Percentage surface element content of *T. obliquus*

元素	BE/eV	Atomic conc./%	Error/%	Mass conc./%	Error/%
P 2p	133.81	0.26	0.09	0.62	0.20
C 1s	284.81	69.78	0.34	63.31	0.38
O 1s	532.71	26.37	0.17	31.87	0.22
Na 1s	1071.61	0.59	0.18	1.02	0.30
N 1s	399.91	3.01	0.39	3.18	0.41

表 3 钛酸盐纳米材料和 *T. obliquus* 的表面元素比例

Tab. 3 Percentage surface element content of titanate nanomaterials and *T. obliquus*

元素	BE/eV	Atomic conc./%	Error/%	Mass conc./%	Error/%
C 1s	284.78	57.62	0.30	45.17	0.33
N 1s	399.68	1.87	0.28	1.71	0.26
O 1s	532.58	33.84	0.22	35.34	0.28
P 2p	133.28	0.46	0.14	0.94	0.28
Na 1s	1071.18	1.57	0.22	2.36	0.33
Ti 2p	458.38	4.63	0.12	14.48	0.33

参 考 文 献

- [1] LI X, LI Y Y, LV D Q, et al. Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136235.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[J]. *环境保护*, 2020, 48(18): 8-10.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The second national pollution source census bulletin[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18): 8-10.
- [3] 王俊能, 赵学涛, 蔡楠, 等. 我国农村生活污水污染排放及环境治理效率[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(12): 2665-2674.
WANG J N, ZHAO X T, CAI N, et al. Pollution discharge and environmental treatment efficiency of rural domestic sewage in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(12): 2665-2674.
- [4] SAUNDERS R J, PAUL N A, HU Y, et al. Sustainable sources of biomass for bioremediation of heavy metals in waste water derived from coal-fired power generation[J]. *PLoS One*, 2012, 7(5): e36470.
- [5] YADAV G, SHANMUGAM S, SIVARAMAKRISHNAN R, et al. Mechanism and challenges behind algae as a wastewater treatment choice for bioenergy production and beyond[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119093.
- [6] CHO S, LEE N, PARK S, et al. Microalgae cultivation for bioenergy production using wastewaters from a municipal WWTP as nutritional sources[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 515-520.
- [7] 杨佩响, 徐婷婷, 高伟, 等. 温度、光照和磷质量浓度对小环藻、大型溞和金鱼藻共培养的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1): 110-116.
YANG P Y, XU T T, GAO W, et al. Influences of temperature, illumination and phosphorus mass concentration on Co-cultivation among *Cyclotella* sp., *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum*[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(1): 110-116.
- [8] 吕俊平, 折雨亭, 刘洋, 等. 不同接种质量浓度绿球藻对水产养殖废水净化的影响[J]. *水生生物学报*, 2021, 45(3): 617-624.
LYU J P, ZHE Y T, LIU Y, et al. Effect of chlorococum sphacosum gd with different inoculation concentrations on the purification of aq-

- uaculture wastewater[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2021,45(3):617-624.
- [9] PRAVEEN P, GUO Y C, KANG H, et al. Enhancing microalgae cultivation in anaerobic digestate through nitrification[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 354: 905-912.
- [10] 雷立, 李学钊, 晋银佳, 等. 湿和水热法合成钛酸盐纳米管及其对水中重金属离子的吸附研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1663-1671.
LEI L, LI X Z, JIN Y J, et al. Synthesis of titanate nanotubes through a facile hydrothermal method and their adsorption behaviors for heavy metal ions from waters[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1663-1671.
- [11] MA J, LI F, QIAN T W, et al. Natural organic matter resistant powder activated charcoal supported titanate nanotubes for adsorption of Pb(II)[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 315: 191-200.
- [12] 梁旭鹏. 铁氧化物磁性复合材料去除阴离子污染物的研究进展[J]. 化工时刊, 2022, 36(2): 17-21.
LIANG X P. Application progress of ferrite magnetic composites in removal of anionic pollutants[J]. Chemical Industry Times, 2022, 36(2): 17-21.
- [13] 张政, 冯长生, 张晓瑞, 等. 钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3135-3145.
ZHANG Z, FENG C S, ZHANG X R, et al. Ammonium adsorption characteristics in aqueous solution by titanate nanotubes[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3135-3145.
- [14] ZHANG B, MENG F P, CUI H W, et al. Microalgal cultivation in secondary effluents: enhancement of algal biomass, nutrient removal, and lipid productivity[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 19(6): 1461-1470.
- [15] MIN K J, OH D Y, PARK K Y. Pilot-scale cultivation of water-net in secondary effluent using an open pond raceway for nutrient removal and bioethanol production[J]. Chemosphere, 2021, 277: 130129.
- [16] 戴英奇. 纳米颗粒强化微藻生长与油脂积累及其机制探究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
DAI Y Q. The mechanisms of enhanced microalgal growth and lipid accumulation by nanoparticle addition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] JI L, GE Q L, LI Y, et al. A comparative study of the growth and nutrient removal effects of five green microalgae in simulated domestic sewage[J]. Water, 2021, 13(24): 3613.
- [18] NATARAJAN S, LAKSHMI D S, THIAGARAJAN V, et al. Antifouling and anti-algal effects of chitosan nanocomposite(TiO₂/Ag) and pristine(TiO₂ and Ag) films on marine microalgae Dunaliella salina[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018, 6(6): 6870-6880.
- [19] YADAV B C, YADAV A, SINGH S, et al. Nanocrystalline zinc titanate synthesized via physicochemical route and its application as liquefied petroleum gas sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 177: 605-611.

Effect on the treatment of rural domestic sewage using *Tetrahymena* *obliquus* and titanate nano materials

Li Yuan^{1,2}, Ge Qili¹, Ji Li¹, Bi Yonghong²

(1. School of Environment and Resources, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Key Laboratory of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: At present, the situation of rural domestic sewage treatment in China is still grim. The combination of algae and nano materials can effectively treat domestic sewage. Therefore, it is very important to understand the impact of nano materials on algae in domestic sewage. Based on the regulation of titanate nano materials, the effects of *Tetrahymena obliquus* on domestic sewage treatment are studied. The results showed that low concentrations of titanate nano materials showed the growth promoting effect after a 6-day adaptation period, the algal cells increased by 97% after 10 d. Titanate nano materials had the greatest impact on the growth of algae biomass at the concentration of 0.1 g/L. The growth of algae cells was inhibited at the concentration of 0.2 g/L.

Keywords: algae; domestic sewage; nanomaterials; titanate; growth inhibition test