Hans Journal of Nanotechnology 纳米技术, 2018, 8(4), 43-52
Published Online November 2018 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/nat
http://doi.org/10.12677/nat.2018.84007

Effect of Nano-Titanium Dioxide on Reed Biomass (*Phragmites australis*)

Qingyu Chai[1], Xiaoyu Li[1], Fangying Chai[2], Hongxian Yu[1*]

[1]Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang
[2]Water Saving Technology Center of Heilongjiang Province, Harbin Heilongjiang
Email: *china.yhx@163.com

Received: Oct. 29th, 2018; accepted: Nov. 13th, 2018; published: Nov. 20th, 2018

Abstract

Nano titanium dioxide is widely used in chemical, pharmaceutical food, clothing and water treatment industries. In the aspect of nano biological effects on plants, some scholars have studied the biological toxicity test of nano titanium dioxide and its effects on seed germination and seedling growth of plants. Currently, data of nano biological effects on plants are mostly based on the laboratory design research. Moreover, the experimental data can only provide rules of plant growth at a certain stage. Complete testing data of plants which grow naturally in the outdoor are not enough. The biological effects of nano titanium dioxide on a complete growth cycle and biomass of plants have not been reported yet. In this experiment, the biological effects of nano titanium dioxide on the whole growth cycle of reed under natural growth conditions have been recorded and studied. Reed is a kind of aquatic and wetland plant which is widely distributed in the worldwide, and plays an important role in the removal of pollutants in water, water purification and ecological restoration of the water system. The results show that the positive biological effect of nano titanium dioxide on reed is extremely significant. The biomass of reed of experimental group treated with nano titanium dioxide is 97.5% higher than that of the control group, plant size increases 47.7%, the plant height increases 23.3%, and the photosynthetic increases by 88.3% in sunny day and 72.5% in cloudy day. At the same time, nano titanium dioxide can significantly reduce the weed coverage rate of the test area. The weed coverage rate of the experimental group is only 6%, and that of the control group is 57%. This study, by using the positive biological effect of nano titanium dioxide on reed, increases the biomass of reed, lifts reed's periodic yield, achieves efficient removal of pollutants in water and could provide a safe, efficient and simple new way of water purification and protection of artificial wetlands and lakes, reservoirs and other water sources.

Keywords

Nano Titanium Dioxide, Reed, Biomass, Water Source, Water Quality Purification and Protection

纳米二氧化钛对芦苇生物量的影响

柴青宇[1]，李晓钰[1]，柴方营[2]，于洪贤[1*]

于洪贤（1962-），女，辽宁岫岩人，东北林业大学教授，博士生导师，湿地科学学科带头人，研究方向为湿地生态与管理。
*通讯作者。

文章引用: 柴青宇, 李晓钰, 柴方营, 于洪贤. 纳米二氧化钛对芦苇生物量的影响[J]. 纳米技术, 2018, 8(4): 43-52.
DOI: 10.12677/nat.2018.84007

[1]东北林业大学，黑龙江 哈尔滨
[2]黑龙江省节约用水技术中心，黑龙江 哈尔滨
Email: *china.yhx@163.com

收稿日期：2018年10月29日；录用日期：2018年11月13日；发布日期：2018年11月20日

摘 要

纳米二氧化钛广泛应用于化工、医药、食品、服装和水处理行业。在植物纳米生物学效应方面，部分学者研究了纳米二氧化钛的植物生物毒理试验和对植物种子发芽、幼苗生长的影响。目前的植物纳米生物学效应数据都是基于室内试验设计研究取得的，而且试验数据只能反映植物在室内生长发育某一个阶段的状况，缺少植物在野外自然生长状态下完整的试验数据。关于纳米二氧化钛对植物的一个完整生长周期和生物量的生物学效应问题，目前仍未见报道。本试验研究了在野外自然生长状态下纳米二氧化钛对芦苇整个生长周期的生物学效应问题。芦苇是分布极为广泛的水生和湿生植物，在去除水体污染物、净化水质和修复水生态系统方面具有十分重要的作用。试验表明，纳米二氧化钛对芦苇生物学的正向效应极为显著，采用纳米二氧化钛材料处理的试验组芦苇生物量比对照组提高了97.5%、株径增加47.7%、株高增加23.3%、晴天光合速率提高了88.3%、阴天光合速率提高了72.5%，同时纳米二氧化钛可以显著降低芦苇试验田的杂草覆盖率，试验组的杂草覆盖率仅有6%，对照组为57%。本研究通过纳米二氧化钛的生物学效应增加芦苇生物量，达到高效率去除水体污染物的目的，为人工湿地和湖泊、水库等水源地水质净化保护提供了安全高效、简单易行的新模式。

关键词

纳米二氧化钛，芦苇，生物量，水源地，水质净化保护

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

水生植物在水体净化和保护方面具有十分重要的作用。金树权等研究表明水生植物可以明显降低水体氮、磷的浓度[1]，周裔文等研究证明随着水体氮磷等营养元素浓度的升高，水生植物——苦草对氮磷的净化能力逐渐增强[2]，陈友媛等研究了芦苇和香蒲修复高盐碱富营养化水体的作用[3]。芦苇(*Phragmites australis* (Clav.) Trin.)属禾本科多年生的水生和湿生植物，分布范围十分广泛。国内外学者对芦苇改善生态环境的功能进行了大量研究。Weis 等、Aksoy 等对芦苇在重金属的吸收、分布、迁移、释放规律等方面进行了研究，认为芦苇在重金属污染区域的生态修复中有着较好的应用前景[4] [5]。滑丽萍等研究了芦苇对有毒重金属的抗性和富集作用[6]，钱鸣飞等研究了芦苇和香蒲去除水污染的效果[7]，欧维新等研究了芦苇湿地对氮、磷污染物的净化效应[8]，杨金红研究了芦苇对重金属污染修复的作用[9]。

利用绿色无污染技术提高芦苇的产量，增加芦苇的生物量，无疑会提高芦苇去除水体污染物的效率。纳米材料已广泛应用于各个领域，利用纳米材料的生物学效应去除水质污染的研究未见报道。本试验在哈尔滨市后备饮用水源地西泉眼水库消落带的试验区，研究了纳米材料生物学效应对芦苇生长的影响。采用 TiO_2 纳米材料对芦苇处理，通过观察和测定芦苇生长发育和生理的变化，研究其对芦苇生物量的生

物学效应，为提高芦苇生物量、改善芦苇品质提供理论依据，同时为湖泊水库等水源地安全高效净化水体提供了新的模式。

2. 研究区概况及试验方法

2.1. 试验区概况

西泉眼水库是哈尔滨市的后备饮用水源地，地理坐标为东经 127˚16'，北纬 45˚12'，位于松花江南岸一级支流阿什河上游。西泉眼水库气候属温带大陆性季风气候，春季风大少雨干旱，夏季湿热多雨，秋季冷凉早霜，冬季长而寒冷。年降水量 536 mm，全年无霜期 120~140 d，年平均气温 3.4℃，年日照时数 2400~2700 h，有效积温 2500℃~2800℃。11 月初开始冰冻，冰厚 0.7~1 m，4 月上旬解冻[10]。目前，库区消落带植物少，物种不丰富，因此通过水库消落带水生植被的恢复，控制地表径流带来的氮磷污染，对改善库区生态环境和水源地保护具有长远意义。

2.2. 试验方法

试验所用的芦苇根采自黑龙江省哈尔滨市白鱼泡国家湿地公园。在西泉眼水库上游消落区设置 20 m × 15 m 的试验田(图 1)，将芦苇以同种模式种植在试验田，然后将试验田划分为两个试验区，面积分别为 20 m × 7.5 m (图 2)，分别为试验组和对照组，对试验组芦苇采用纳米材料进行处理。

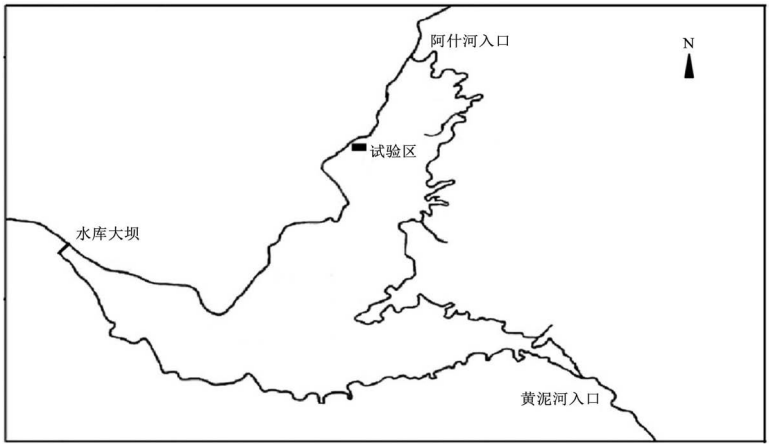


Figure 1. Location of nano material test area in Xiquanyan reservior
图 1. 西泉眼水库纳米材料试验区位置图

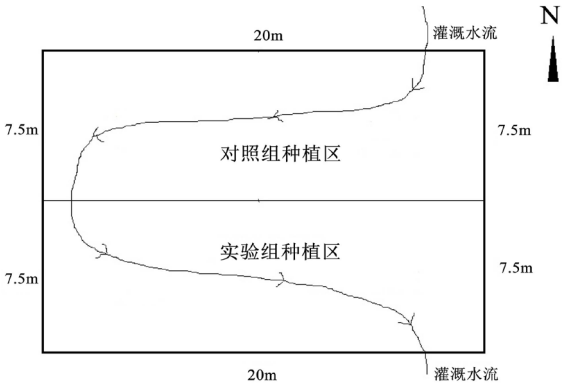


Figure 2. Sketch map of test area division
图 2. 试验区划分示意图

2011 年 5 月 7 日将采集的芦苇根扦插种植，芦苇根直径 2~3 cm，长 30~40 cm，株距为 20 cm × 20 cm。水面覆盖层为 5~10 cm，灌溉用水来自山区地表径流，水源充足。

西泉眼水库五月中旬平均气温在 15℃左右，芦苇插秧经过 20 天缓苗期后才开始生长。2011 年 5 月 27 日在试验组芦苇顶端喷洒纳米级钛化合物。纳米材料为纳米级二氧化钛(产地为广州拓亿，纯度为 95%)，粒径 20 nm，浓度为 2.8%，使用前用超声波震荡一小时，然后加 300 倍水稀释。此后，分别于 6 月 27 日、8 月 25 日和 9 月 19 日对两个组的芦苇进行观察和数据采集。

2.3. 形态指标及生理指标的测定

2.3.1. 形态指标测定

苗期和穗期分别测定芦苇叶穗、株高、株茎、叶长、叶宽、叶面积、叶鞘长等生长指标。每次测量时，随机选取试验组和对照组的 10 株芦苇测量株高、株径、叶穗，同时自距离地面 30 cm 处开始向上部依次测量每株芦苇的 6 个叶片，测量每个叶片的叶长、叶宽、叶面积、叶鞘数值。

2.3.2. 生理指标测定

穗期分别随机选取 10 株试验组和对照组的芦苇测定其晴天和阴天光合速率。光合速率测定采用 Licor-640 光合速率仪。

2.4. 数据分析

数据采用 Excel 2003 制图，SPSS 17.0 对试验数据进行 Dun-can’s 单因素多重比较检验。

3. 试验结果与分析

5 月 7 日扦插芦苇，经过 20 天缓苗期后开始生长新叶。5 月 27 日在芦苇长出 1~3 个叶片时对芦苇喷洒纳米二氧化钛，将纳米材料喷洒在芦苇顶端(图 3)。

Figure 3. Spraying reed seedlings with nano titanium dioxide
图 3. 纳米二氧化钛喷洒芦苇幼苗

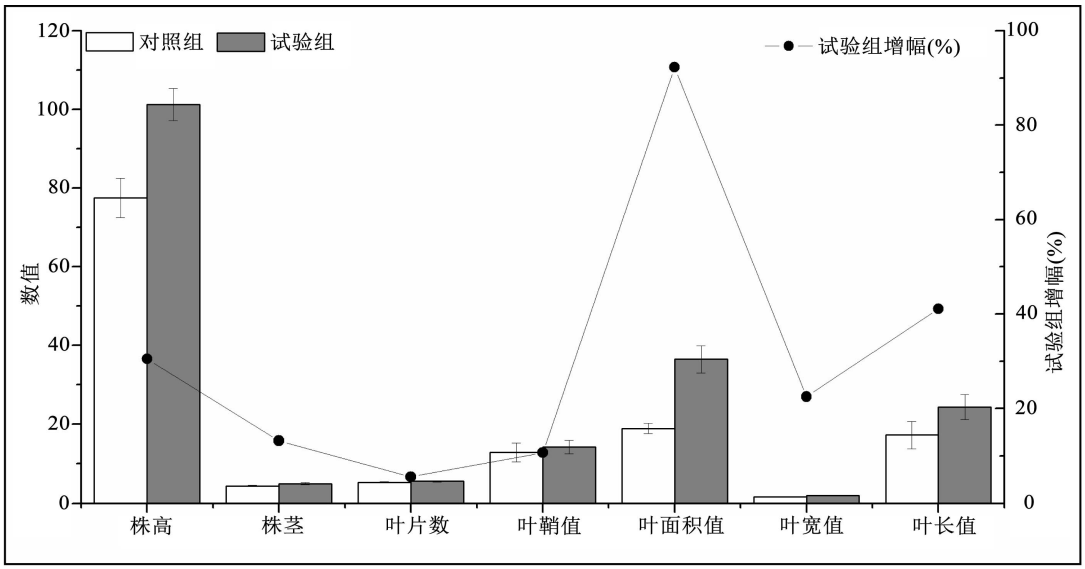
3.1. 纳米材料对芦苇生长的作用

3.1.1. 喷洒纳米材料一个月后芦苇生长情况

2011 年 6 月 27 日对芦苇生长情况进行观察和数据采集(见图 4)。

采用纳米二氧化钛处理芦苇后，经过一个月的生长期，除芦苇叶片、叶鞘值没有显著差异外，试验组和对照组芦苇的株高、株径、叶片数、叶面积、叶宽和叶长值都表现出了显著差异。生长差异最大的

是叶面积，其次是叶长和株高值，试验组芦苇平均叶面积 36.48 cm^2，对照组平均叶面积 18.97 cm^2，增幅高达 92.3%；试验组叶长值平均 24.36 cm，对照组 17.26 cm，增幅达 41.1%；试验组芦苇平均株高 101.25 cm，对照组仅为 77.56 cm，差距达 30.5%。纳米二氧化钛处理芦苇后，经过一个月的生长期，试验组与对照组各部位生长差异大小次序为：叶面积 > 叶长 > 株高 > 叶宽 > 株径 > 叶鞘 > 叶片。



注：株高(cm)，株茎(mm)，叶片数(片)，叶鞘值(cm)，叶面积值(cm^2)，叶宽值(cm)，叶长值(cm)。

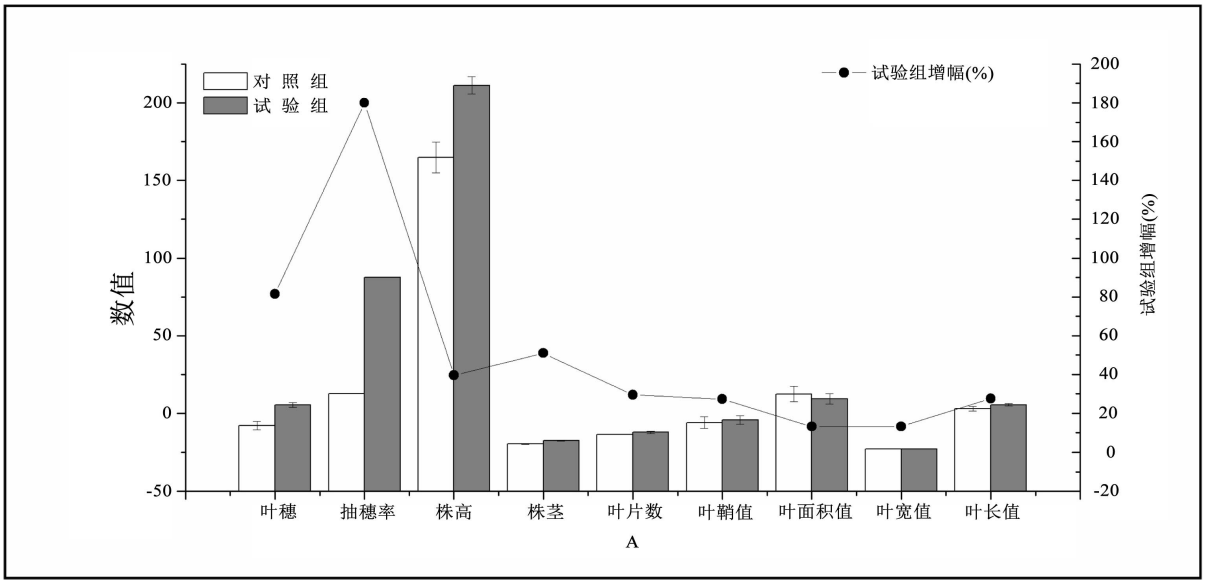
Figure 4. Effect of nano titanium dioxide on the growth of reed in one month
图 4. 一个月后纳米二氧化钛对芦苇生长的影响(mean ± SE)

3.1.2. 喷洒纳米材料三个月后芦苇生长情况

2011 年 8 月 25 日，在纳米材料喷洒三个月后再次对芦苇生长情况进行观察和数据采集。试验组绝大多数芦苇都已抽穗，且杂草较少，芦苇生长非常旺盛。对照组芦苇普遍株高较矮，且杂草较多，其中稗草为优势种，芦苇覆盖度明显低于试验组，且仅有少部分芦苇抽穗(图 5)。

Figure 5. Growth status and weed cover of reed in experimental group (right) and control group (left)
图 5. 试验组(图右)与对照组(图左)芦苇长势及杂草覆盖情况

通过统计数据分析发现，纳米二氧化钛处理后，经过三个月的生长期，试验组与对照组芦苇各部位生长差异主要表现在抽穗率、叶穗、株径和株高方面，试验组分别超过对照组 200%、76.9%、38.7%和24.4% (见图 6)；试验组与对照组差异不显著的的是叶面积值、叶宽值、叶片数、叶长值和叶鞘值。

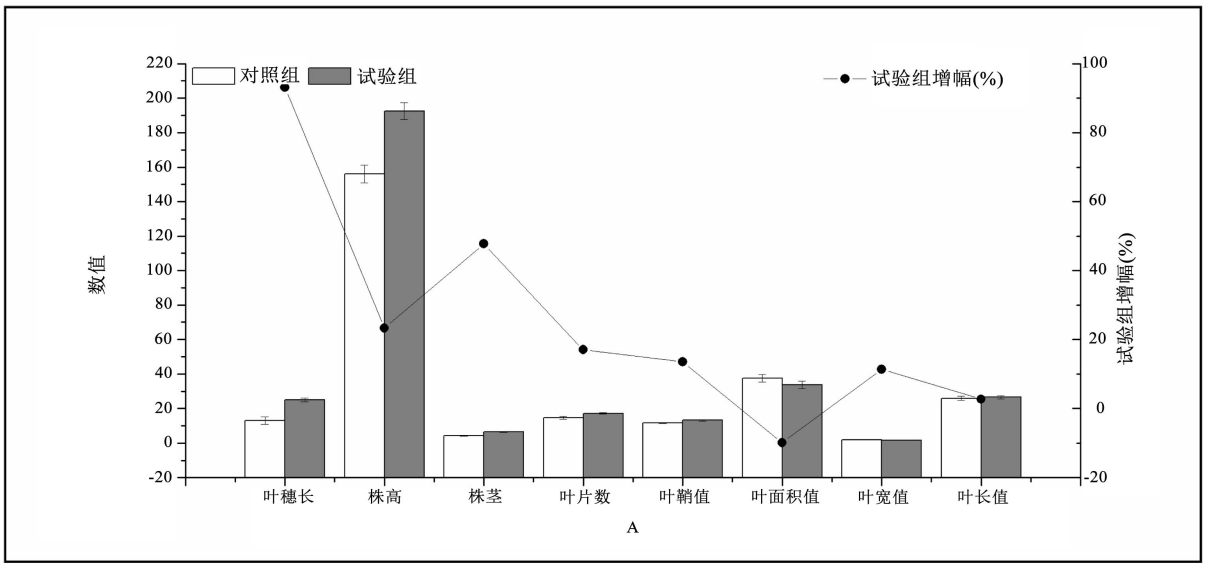


注：抽穗率计算方法为直接核算试验组和对照组全部抽穗数量。叶穗(cm)，抽穗率(%)，株高(cm)，株茎(mm)，叶片数(片)，叶鞘值(cm)，叶面积值(cm^2)，叶宽值(cm)，叶长值(cm)。

Figure 6. Effect of nano titanium dioxide on the growth of reed after three months
图 6. 三个月后纳米二氧化钛对芦苇生长的影响

3.1.3. 喷洒纳米材料四个月后芦苇生长情况

2011 年 9 月 19 日对芦苇又进行了一次观测和数据采集，统计数据见图 7。



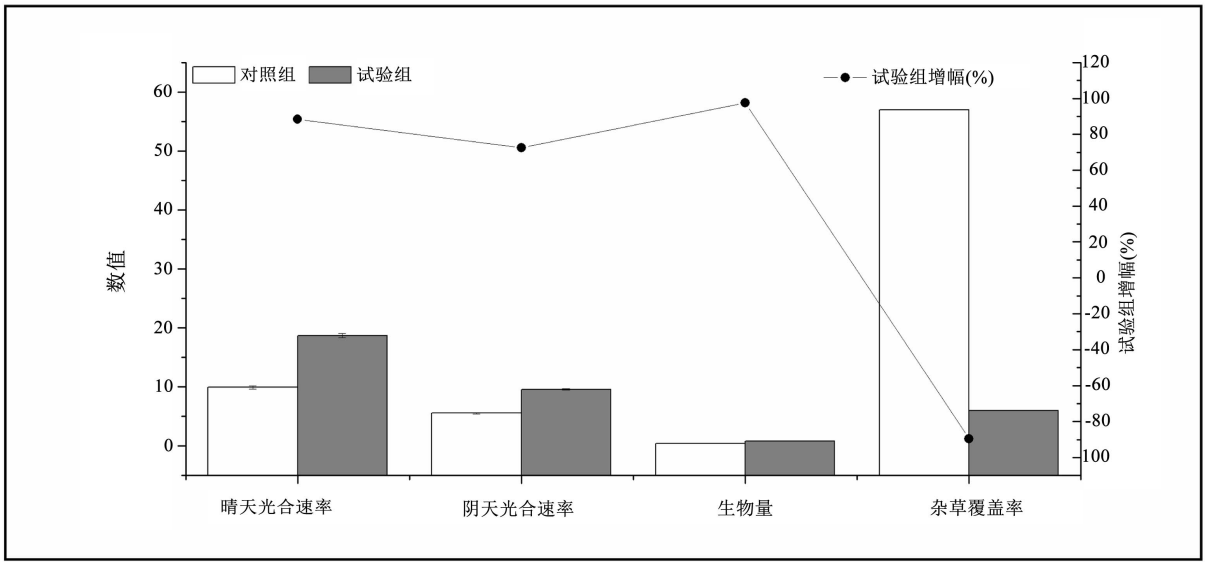
注：叶穗长(cm)，株高(cm)，株茎(cm)，叶片数(片)，叶鞘值(cm)，叶面积值(cm^2)，叶宽值(cm)，叶长值(cm)。

Figure 7. Effect of nano titanium dioxide on the growth of reed after four months
图 7. 四个月后纳米二氧化钛对芦苇生长的影响

经过四个多月的生长，芦苇进入成熟期。试验组和对照组芦苇显著差异主要表现在叶穗长度、株径直径和株高尺寸方面。试验组叶穗长度超过对照组 93.1%、株径超过 47.7%、株高超过 23.3%。试验组和对照组在叶片数、叶鞘值、叶面积值、叶宽值和叶长值方面都没有明显差异。

3.1.4. 试验组和对照组主要生物生理指标比较

试验期间对试验组和对照组芦苇的光合作用效率进行了测定，在芦苇生长旺盛的 8 月份选择相邻的阳光充足的晴天和光照不足的阴天进行测定。在东北作物停止生长的 10 月上旬开始收割芦苇，计算试验组和对照组生物量，同时计算杂草覆盖率(图 8)。



注：晴天光合速率(umol $CO_2/m^2 \cdot s^{-1}$)，阴天光合速率(umol $CO_2/ m^2 \cdot s^{-1}$)，生物量(kg/m^2)，杂草覆盖率(%)；注：1) 光合速率测定日期为 8 月 19 日(晴)和 8 月 20 日(阴)；2) 生物量计算方法为 10 月 6 日全部收割试验组和对照组芦苇称重后计算得数；3) 杂草覆盖率为收割芦苇时实际核算试验组和对照组杂草和芦苇株数结果。

Figure 8. Comparison of main biological and physiological indexes between experimental group and control group
图 8. 试验组和对照组主要生物生理指标对比

分析统计数据发现，试验组和对照组光合速率差异显著，纳米二氧化钛对芦苇的光合作用速率影响很大，晴天阳光充足时试验组光合速率比对照组增加了 88.3%，阴天光照不足时增加了 72.5%。

试验组和对照组芦苇的生物量差异也非常显著，经过一个完整的生长周期后，试验组芦苇的生物量超过对照组生物量的 97.5%，芦苇产量提高了一倍。纳米二氧化钛不仅对提高芦苇产量作用明显，其抑制杂草的效果也非常显著，试验组杂草覆盖率仅为对照组的 10.5%。

4. 讨论

4.1. 纳米二氧化钛生物学效应问题

纳米二氧化钛具有光催化、比表面积大等一系列优异的性能，在世界范围内得到广泛应用。目前主要应用于化工领域作为催化剂、添加剂和改性剂，水处理领域作为光催化剂降解有机污染物和富集重金属，环保领域用于杀菌消毒、净化空气和作为自清洁涂层，医学领域用于肿瘤诊断治疗、种植体表面改性等等。此外，纳米二氧化钛在电池、印染、颜料、食品、光学、路桥、木材和弹药等行业都得到开发应用[11] [12] [13]。

关于纳米生物学效应问题国内外研究起步较晚，而且主要集中于纳米材料的毒理性研究方面。Lovern

SB.和 Klap R. (2006)研究了纳米二氧化钛可引起浮游动物中大型蚤类的中毒死亡[14]；Ilona Velzeboer 等(2008)在研究纳米二氧化钛对水生生物的毒理作用时未发现对藻类有任何影响[15]；Enrique Navarro 等(2008)认为纳米二氧化钛可以改变藻类、植物和真菌的细胞膜以及其他细胞结构和分子结构[16]；Uhram Song 等(2013)研究了纳米二氧化钛对油菜、莴苣和菜豆的毒理效应，结论表明对这三种植物没有任何毒性[17]；Hassan Feizi 等(2012)研究了纳米二氧化钛对小麦种子发芽和幼苗生长的影响，结果表明纳米二氧化钛可以促进小麦种子发芽和幼苗生长[18]；侯东颖等(2012)研究认为纳米二氧化钛对普生轮藻具有毒性作用，且表现出剂量效应[19]；李雅洁等(2013)研究认为纳米二氧化钛表现为低浓度(1 $mg \cdot L^{-1}$)促进藻类生长，高浓度(200 $mg \cdot L^{-1}$)抑制藻类生长的趋势，同时高浓度还导致细胞色素和蛋白质含量减少，抗氧化酶活性明显下降，同样引起氧化胁迫效应[20]；Maryam Haghighi 等(2014)研究了纳米二氧化钛对西红柿、洋葱和萝卜种子发芽的影响，认为纳米二氧化钛可以提高种子发芽率，效果最显著的是西红柿，其次是萝卜和洋葱[21]。

目前国内外开展的植物纳米生物学效应问题研究具有很大的局限性，其全部数据都是基于实验室室内试验设计研究取得的，而且仅仅局限于植物生长发育的某一个阶段，无法准确反映植物在自然生长下的状态，更没有关于植物整个生长周期或完整生命周期的试验数据。关于芦苇的纳米生物学效应问题也未见任何报道。

本试验自 2011 年 5 月 7 日芦苇插秧至 10 月 6 日芦苇收割，经历了芦苇一个完整的生长周期，准确记录了芦苇自然生长状态下纳米二氧化钛对芦苇的生物学效应问题。研究发现，纳米二氧化钛对芦苇生物学的正向效应极为明显，采用纳米二氧化钛材料处理的试验组芦苇生物量比对照组提高了 97.5%、株径增加 47.7%、株高增加 23.3%。因此纳米二氧化钛的芦苇生物学效应研究在水生态环境修复中具有重要意义。采用纳米技术促进水生植物的生长，可以极大地提高水生植物消除水质污染的效率。由于采用的纳米材料无色、无味、无污染、成本低廉，所以纳米生物技术净化水质是一种绿色高效的新技术。芦苇在湿地及人工湿地系统中发挥着重要作用，它不仅能够直接吸收有机物氮、磷等营养物质还为微生物提供了良好的场所，使得污染物质可以通过硝化、反硝化、降解、络合、吸附等作用而去除。芦苇的根对重金属的积累具有重要作用。芦苇对镉、铅、铜等污染物都有一定程度的吸收、积累能力，尤其是对铬和六六六，有较大的吸收、积累能力[22]。纳米二氧化钛可以把芦苇生物量增加一倍，纳对水生态环境修复作用显著，直接提高了芦苇在人工湿地和湖泊、水库等水源地去除污染、保护和净化水质的能力。

4.2. 纳米二氧化钛与光合作用

Zheng Lei 等(2007)研究了纳米二氧化钛与植物光合作用的关系，认为纳米二氧化钛可以提高植物可见光和紫外光的光合速率[23]；Su Mingyu 等(2007)认为纳米二氧化钛提高光合作用效率的机理是它可以促进光合作用中的能量转移和氧气释放[24]；Fengqing Gao 等(2008)研究了纳米二氧化钛增加光合作用速率的机理，认为它不仅能提高光的吸收率，将光能转化为电子能和活性化学能，更重要的是促进了二磷酸核酮糖羧化酶的活性[25]。

本试验中纳米二氧化钛对芦苇光合作用的研究数据表明：晴天光线充足条件下试验组芦苇的光合速率比对照组提高了 88.3%，阴天光照不足时光合速率提高了 72.5%。本次研究最重要的发现在于试验组芦苇阴天光照不足时的光合速率为 9.59 umol $CO_2/m^2 \cdot s^{-1}$，对照组晴天光线充足条件下的光合速率为 9.93 umol $CO_2/ m^2 \cdot s^{-1}$，两者光合速率数据相差无几！证明纳米二氧化钛可以把芦苇阴天光线不足时的光合作用速率提高到晴天阳光充足时的光合作用速率水平。阴天可见光照射强度减少，但是紫外光照射强度与晴天差异不大，本试验直接证实了 Zheng Lei 等(2007)认为纳米二氧化钛可以提高紫外光光合作用速率的研究结果。

4.3. 纳米二氧化钛与植物群落结构

试验证明纳米二氧化钛可以显著降低芦苇群落中的杂草覆盖率，对照组的杂草覆盖率为 57%，试验组的仅为 6%。关于纳米二氧化钛对植物种群群落结构的影响方面的研究未见任何报道。本研究证明纳米二氧化钛对植物群落结构的影响十分显著，一部分原因可能是纳米材料通过提高芦苇光合速率对芦苇生长具有促进作用，芦苇通过种间竞争抑制了杂草的生长；另一方面可能由于纳米材料在一定程度上对杂草的生长具有直接抑制作用，尚需要进一步验证。

5. 结论

纳米二氧化钛对芦苇具有明显的生物学正向效应。

1) 芦苇生长一个月后，纳米二氧化钛对芦苇的生物学效应影响主要表现在叶面积、叶长和株高值。

2) 芦苇生长三个月后，纳米二氧化钛对芦苇的生物学效应影响主要表现在抽穗率、叶穗、株径和株高方面，试验组分别超过对照组 200%、76.9%、38.7%和 24.4%。

3) 芦苇生长四个月后，纳米二氧化钛对芦苇的生物学效应影响主要表现在叶穗长度、株径直径和株高尺寸方面，试验组叶穗长度超过对照组 93.1%、株径超过 47.7%、株高超过 23.3%。

4) 试验组和对照组光合速率差异显著，纳米二氧化钛对芦苇的光合作用速率影响很大，晴天阳光充足时试验组光合速率比对照组增加了 88.3%，阴天光照不足时增加了 72.5%。试验组阴天光照不足时的光合作用速率达到了对照组晴天光照充足时的光合速率水平。

5) 纳米二氧化钛不仅对增加芦苇生物量作用明显，其抑制杂草的效果也非常显著，试验组杂草覆盖率仅为对照组的 10.5%。

6) 纳米二氧化钛可以增加芦苇生物量，试验组和对照组芦苇的生物量差异非常显著，经过一个完整的生长周期后，试验组芦苇的生物量超过对照组生物量的 97.5%，芦苇产量提高了一倍。

参考文献

[1] 金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋. 5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 156-161.

[2] 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥. 水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1180-1187.

[3] 陈友媛, 孙萍, 陈广琳, 王宁宁. 滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1489-1496.

[4] Weis, J.S. and Weis, P. (2004) Metal Uptake, Transport and Release by Wetland Plants: Implications for Phytoremediation and Restoration. *Environment International*, **30**, 685-700. https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.002

[5] Aksoy, A., Duman, F. and Sezen, G. (2005) Heavy Metal Accumulation and Distribution in Narrow-Leaved Cattail (*Typha angustifolia*) and Common Reed (*Phragmites australis*). *Journal of Freshwater Ecology*, **20**, 783-785. https://doi.org/10.1080/02705060.2005.9664806

[6] 滑丽萍, 华珞, 王学东, 尹逊霄, 朱凤云. 芦苇对白洋淀底泥重金属污染程度的影响效应研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 102-105.

[7] 钱鸣飞, 李勇, 黄勇. 芦苇和香蒲人工湿地系统净化微污染河水效果比较[J]. 工业用水与废水, 2008, 39(6): 55-58.

[8] 欧维新, 高建华, 杨桂山. 芦苇湿地对氮磷污染物质的净化效应及其价值初步估算—以苏北盐城海岸带芦苇湿地为例[J]. 海洋通报, 2006, 25(5): 90-96.

[9] 杨金红. 芦苇修复重金属污染土壤研究进展[J]. 北方园艺, 2017(4): 171-176.

[10] 王建国, 于洪贤, 马成学, 姚允龙, 等. 哈尔滨西泉眼水库夏季浮游植物群落结构动态特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 667-678.

[11] 陈杰山. 国内纳米二氧化钛应用研究的进展[J]. 广东化工, 2012, 39(18): 78-79.

[12] 李智, 葛少华. 纳米二氧化钛在医学中的应用进展[J]. 口腔医学, 2017, 37(1): 85-88.

[13] 刘立华. 纳米二氧化钛应用研究进展[J]. 唐山师范学院学报, 2004, 26(5): 3-5.

[14] Lovern, S.B. and Klap, R. (2006) *Daphnia magna* Mortality When Exposed to Titanium Dioxide and Fullerence (C_{60}) Nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **25**, 1132-1137. https://doi.org/10.1897/05-278R.1

[15] Ilona, V.A., Jan, H., *et al.* (2008) Aquatic Ecotoxicity Tests of Some Nanomaterials. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **27**, 1942-1947. https://doi.org/10.1897/07-509.1

[16] Enrique, N., Anders, B., *et al*. (2008) Environmental Behavior and Ecotoxicity of Engineered Nanoparticles to Algae, Plants, and Fungi. *Ecotoxicology*, **17**, 372-386. https://doi.org/10.1007/s10646-008-0214-0

[17] Uhram, S., Minjoo, S., Gisuk, L., *et al.* (2013) Functional Analysis of TiO_2 Nanoparticle Toxicity in Three Plant Species. *Biological Trace Element Research*, **155**, 93-103. https://doi.org/10.1007/s12011-013-9765-x

[18] Hassan, F., Parviz, R.M., *et al.* (2012) Impact of Bulk and Nanosized Titanium Dioxide (TiO_2) on Wheat Seed Germination and Seedling Growth. *Biological Trace Element Research*, **146**, 101-106. https://doi.org/10.1007/s12011-011-9222-7

[19] 侯东颖, 冯佳, 谢树莲. 纳米二氧化钛胁迫对普生轮藻的毒性效应[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1481-1486.

[20] 李雅洁, 王静, 崔益斌, 李梅. 纳米氧化锌和二氧化钛对斜生栅藻的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1122-1127.

[21] Maryam, H., Jaime, A. and Teixeira da, S. (2014) The Effect of N-TiO_2 on Tomato, Onion, and Radish Seed Germination. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, **17**, 221-227. https://doi.org/10.1007/s12892-014-0056-7

[22] 董志成, 鲍征宇, 谢淑云, 严森. 湿地芦苇对有毒金属元素的抗性及吸收和积累[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 80-84.

[23] Lei, Z., Mingyu, S., Chao, L., *et al*. (2007) Effects of Nanoanatase TiO_2 on Photosynthesis of Spinach Chloroplasts under Different Light Illumination. *Biological Trace Element Research*, **119**, 68-76. https://doi.org/10.1007/s12011-007-0047-3

[24] Mingyu, S., Xiao, W., Chao, L., *et al.* (2007) Promotion of Energy Transfer and Oxygen Evolution in Spinach Photosystem II by Nano-Anatase TiO_2. *Biological Trace Element Research*, **119**, 183-192.

[25] Fengqing, G., Chao, L., Chunxiang, Q., *Et Al.* (2008) Was improvement of Spinach Growth by Nano-TiO_2 Treatment Related to the Changes of Rubisco Activase? *BioMetals*, **21**, 211-217. https://doi.org/10.1007/s10534-007-9110-y

Hans汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD
   下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-086X，即可查询
2. 打开知网首页 http://cnki.net/
   左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：nat@hanspub.org