

李 娅,支崇远,孙翠翠,等. Cd^{2+} 对淡水底栖硅藻 *Nitzschia amplexens* 生长的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(3):305-308.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.03.099

Cd^{2+} 对淡水底栖硅藻 *Nitzschia amplexens* 生长的影响

李 娅,支崇远,孙翠翠,张 伟,孙 丹

(贵州师范大学生命科学学院,贵州贵阳 550001)

摘要:对不同浓度 Cd^{2+} 中淡水底栖硅藻 *Nitzschia amplexens* 的存活数、叶绿素 a 含量及运动速度进行测定,以探索硅藻对重金属毒性的响应规律,为硅藻监测水体污染提供科学依据。纯化培养 *Nitzschia amplexens*,生长数量达到 7 万个/mL 时,加入不同浓度的 Cd^{2+} 进行急性毒性和亚急性毒性胁迫培养。在急性毒性试验中,*Nitzschia amplexens* 的存活数在 96 h 的 EC_{50} 值为 4.989 mg/L。在亚急性毒性试验中,培养 15 d 后 Cd^{2+} 浓度为 0.625 0 mg/L 的 *Nitzschia amplexens* 运动平均速度为 2.5、5.56 $\mu\text{m/s}$,其余试验组无运动迹象;培养 13 d 后, Cd^{2+} 浓度与叶绿素 a 含量呈负相关 ($P < 0.05$)。 Cd^{2+} 浓度对 *Nitzschia amplexens* 的生长、运动速度和叶绿素 a 含量有明显影响,所以 *Nitzschia amplexens* 具监测水体重金属 Cd^{2+} 污染潜力。

关键词:*Nitzschia amplexens*;重金属 Cd^{2+} ;培养;生长;运动;叶绿素 a;水质监测;指示生物

中图分类号: Q945.78;X832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)03-0305-03

镉是一种生物毒性很强的重金属,能在有机体内积蓄,通过食物链传递富集可引起生物体生长缓慢甚至死亡^[1]。随着工业的发展,大量的 Cd^{2+} 向环境中排放,使得环境中的 Cd^{2+} 污染加重。中国水体镉污染时有发生,2012 年 1 月 15 日广西龙江河宜州拉浪段发现重金属镉超标,至 1 月 21 日 18 时污染事件已造成约 28.1 万尾鱼死亡。目前镉已被美国毒理管理委员会(ATSDR)列为第 6 位危及人体健康的有毒物质,被联合国组织确定为优先检测的环境污染物^[2]。

底栖硅藻是一种单细胞生物,分布很广,是水体中的初级生产者,在光合作用下它们吸收水中的无机盐和二氧化碳,制造有机物^[3-4],它们对净化水质具有重要意义。2000 年欧共体水框架指南(Water Framework Directive of the European Union)推荐硅藻为水体监测生物指标。底栖硅藻对许多环境变量(pH 值、光、盐度、温度、无机营养浓度等)敏感^[5-6],它们与水体重金属关系的研究已有一些报道。*Nitzschia amplexens* Hustedt 是中国西南地区河流中常见淡水底栖硅藻,其与重金属关系的系统研究报道甚少。探索 *Nitzschia amplexens* 与 Cd^{2+} 的关系,可为生物监测水质增加新的内容。

1 材料与方法

1.1 藻种

藻种 *Nitzschia amplexens* Hustedt 采集于贵州省乌江上游毕节市七星关区层台镇玉龙乡河流中段。

1.2 仪器设备

主要仪器有显微镜(NIKON EOLIPSE 50i)、生化培养箱(SPX-250)、水浴锅、超净工作台、离心机和微量移液器等。

1.3 底栖硅藻自制培养基

1.3.1 培养基基础液 培养基基础液配制见表 1。

表 1 *Nitzschia amplexens* 培养基基础液情况

试剂名称	培养基中浓度
NH_4Cl	15 mg/L
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	12 mg/L
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	18 mg/L
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	15 mg/L
KH_2PO_4	1.6 mg/L
NaHCO_3	50 mg/L
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	80 $\mu\text{g/L}$
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	100 $\mu\text{g/L}$
H_3BO_3	185 $\mu\text{g/L}$
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	415 $\mu\text{g/L}$
ZnCl_2	3 $\mu\text{g/L}$
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.5 $\mu\text{g/L}$
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.01 $\mu\text{g/L}$
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7 $\mu\text{g/L}$
维生素 B_1	0.1 mg/L
维生素 H	0.5 $\mu\text{g/L}$
维生素 B_{12}	0.5 $\mu\text{g/L}$

1.3.2 土壤浸出液配制 称取 500 g 土壤(土壤采集于贵州省贵阳市相宝山地区),去离子水 1 L,混合后用塑料薄膜封口,沸水浴加热 1 h,冷却,离心,过滤,取上清液,加蒸馏水至总体积 1 000 mL,置于 10.1 MPa 高温下灭菌 30 min,保存于 4 $^{\circ}\text{C}$ 备用。

1.3.3 *Nitzschia amplexens* 培养基 将配制好的培养基基础液与土壤浸出液以一定的比例混合,用 NaOH 液将 pH 值调至 7.5 ± 0.5 ,经 0.2 μm 滤膜,灭菌,得到 *Nitzschia amplexens* 培养基。

收稿日期:2014-11-05

基金项目:国家自然科学基金(编号:41062005);贵州省环保厅项目(编号:目黔环科[2012]1号);贵州省科技厅国际科技合作项目(编号:[2012]800107)。

作者简介:李 娅(1990—),女,贵州贵阳人,硕士研究生,主要从事湿地生态学研究。E-mail:779853599@qq.com。

通信作者:支崇远,博士,教授,主要从事硅藻生理生态方面的研究。E-mail:zhichy@126.com。

1.4 纯化培养和胁迫培养

1.4.1 *Nitzschia amplexans* 的分离及纯化培养 将野外采集的硅藻样品带回实验室,用 50 目的筛绢过滤水样,放于显微镜下观察,采用微吸管分离法,通过多次抓取,将 *Nitzschia amplexans* 藻种分离出来,即可将此放入自制培养基中在培养箱中培养。

培养条件:温度(24±1)℃,光照周期 12 h:12 h,光照度 1 800 lx。每天 12:00 和 19:00 摇动藻液 1 min,以防硅藻附在玻璃壁上。

1.4.2 Cd²⁺ 急性毒性胁迫培养 09:00—10:00 在显微镜下用血球计数板统计藻密度,当藻种数量达到约 7 万个/mL 时,用 500 mL 的培养瓶分装藻液,进行扩大培养,培养条件同“1.4.1”节。

取 7 个 100 mL 培养瓶(1 个对照组+6 个试验组),加入藻液 40 mL,藻液密度为 7 万个/mL,再分别在各培养瓶中滴加 Cd²⁺ 液,7 个瓶中 Cd²⁺ 浓度最终调节依次为 0、0.5、1、2、5、10、15 mg/mL,重复 3 次。按“1.4.1”节培养条件培养,在培养后 0、24、48、72、96 h 取样,用血球计数板计数,所得数值通过计算得出 96 h EC₅₀ 值。先算出抑制率 $X = (I_0 - I) / I \times 100\%$ (式中: I_0 为 Cd²⁺ 浓度为 0 时的特定生长率; I 为试验组特征生长率),通过 SPSS 的 Probit 分析计算得出 EC₅₀。

1.4.3 Cd²⁺ 亚急性毒性胁迫培养 取 5 个 500 mL 培养瓶(1 对照组+4 试验组),放入藻液 200 mL,藻液密度 7 万个/mL,试验组 Cd²⁺ 浓度梯度设置为 96 h EC₅₀、96 h EC₅₀/2、96 h EC₅₀/4、96 h EC₅₀/8^[7],对照组为空白。进行亚急性毒性培养(培养条件同“1.4.1”节)。观察期为 15 d,前 3 d 每天 09:00 取样 1 次,之后每隔 2 d 取样 1 次,每次取样为 10 mL,共计 9 次,对所取藻液进行叶绿素 a 含量的测定及对硅藻运动情况观测。

1.4.3.1 叶绿素 a 含量的测定 通过冷融法提取叶绿素 a,取 5 mL 藻液样品 4 000 r/min 离心,弃上清液,加入 90% 丙酮溶液 3 mL,摇匀,反复冷冻,4℃ 暗保存 24 h,离心 8 000 r/min,测 $D_{630\text{ nm}}$ 、 $D_{645\text{ nm}}$ 、 $D_{665\text{ nm}}$,叶绿素 a 含量按式(1)计算:

叶绿素 a 的含量 (mg/L) = 11.6 $D_{665\text{ nm}}$ - 0.14 $D_{630\text{ nm}}$ - 1.31 $D_{645\text{ nm}}$ ^[8]。(1)

1.4.3.2 *Nitzschia amplexans* 平均运动速度的测定 *Nitzschia amplexans* 运动状态参数为其运动的平均运动速度,09:00—10:00 为观察时间段。观察时,将藻液滴在血球计数板上,利用血球计数板,以线的交点来记录硅藻的运动距离,并用秒表计时,测定计数框内硅藻的平均运动速度,重复 3 次,再计算平均值。

1.4.4 数据统计 用 SPSS 21 对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 Cd²⁺ 浓度对 *Nitzschia amplexans* 急性毒性生长的影响

由图 1 可知,在不同浓度 Cd²⁺ 的胁迫下,经过 96 h 对 *Nitzschia amplexans* 的培养,得其生长情况。通过试验组与对照组比较发现,Cd²⁺ 对 *Nitzschia amplexans* 的生长具有抑制作用。培养 24、48、72、96 h 时硅藻存活数与 Cd²⁺ 浓度相关关系的检验结果分别为 $P=0.013$ 、 $P=0.008$ 、 $P=0.006$ 、 $P=0.003$

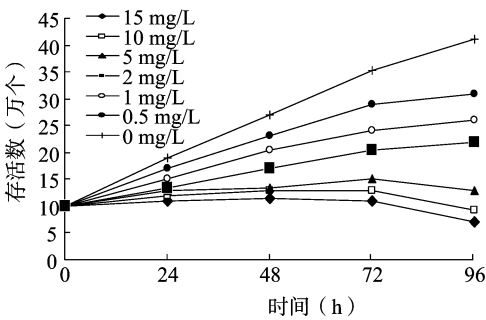


图1 不同 Cd²⁺ 浓度对 *Nitzschia amplexans* 存活数的影响

($P<0.05$),呈负相关关系,说明随着 Cd²⁺ 浓度及胁迫培养时间的增加对 *Nitzschia amplexans* 生长的抑制作用逐渐增强。

在 Cd²⁺ 浓度低于 2 mg/L 的抑制条件下,藻的存活数处于增长状态,但增长值低于对照组。在 Cd²⁺ 浓度为 5、10、15 mg/L 的藻液中培养 72 h 后,*Nitzschia amplexans* 的存活数低于 10 万个,96 h 后进入大量死亡状态。结果表明,所有浓度的重金属对藻体生长都有一定的影响,随着金属浓度的升高,其对藻体生长逐渐产生抑制作用,超过一定浓度的金属甚至对藻体产生致死作用。

2.2 Cd²⁺ 对 *Nitzschia amplexans* 亚急性毒性生长的影响

2.2.1 Cd²⁺ 浓度对 *Nitzschia amplexans* 的半最大效应浓度 Cd²⁺ 对 *Nitzschia amplexans* 的半最大效应浓度见表 2。

表 2 Cd²⁺ 浓度对 *Nitzschia amplexans* EC₅₀ 值的情况

时间(h)	EC ₅₀ (mg/L)
24	15.76
48	9.999
72	7.414
96	4.989

随着 Cd²⁺ 胁迫培养时间的延长,Cd²⁺ 对 *Nitzschia amplexans* 生长的抑制作用增强。96 h 的 EC₅₀ 值为 4.989 mg/L,根据藻类生长抑制毒性分级标准^[9]可知,Cd²⁺ 对 *Nitzschia amplexans* 属于高毒,对其生长的抑制作用较大。

2.2.2 Cd²⁺ 浓度对 *Nitzschia amplexans* 运动状态的影响 由于硅藻的生殖方式为二分裂生殖,藻的体积会减小,运动情况也会受到影响,所以总体运动趋势处于缓慢下降。由图 2 可知,经过 15 d 的 Cd²⁺ 胁迫培养,Cd²⁺ 浓度对 *Nitzschia amplexans* 的运动的抑制作用十分明显。1 d 后,藻的运动速度与 Cd²⁺ 浓度呈负相关关系,其一元回归线性方程为 $y = -0.409x + 3.584$ ($P<0.05$),在 Cd²⁺ 浓度为 2.495 mg/L 的藻液中,所有藻就已停止运动(Cd²⁺ 浓度为 4.989 mg/L 的藻液中,所有藻停止运动,未在图 2 中标出);在 Cd²⁺ 浓度为 1.247 mg/L 的藻液中培养 7 d 后,藻也停止了运动。由此可见,Cd²⁺ 浓度对 *Nitzschia amplexans* 的运动速度有很大的影响。

2.2.3 Cd²⁺ 对 *Nitzschia amplexans* 叶绿素 a 含量的影响 藻类的光合作用与其体内叶绿素的含量密切相关,叶绿素的含量若受到影响,则会影响藻细胞的生长,因此有必要对 Cd²⁺ 胁迫培养下的菱形藻的叶绿素 a 含量进行测定。由图 3 可知,在不同浓度 Cd²⁺ 的条件下对藻培养 15 d,前 3 d 叶绿素

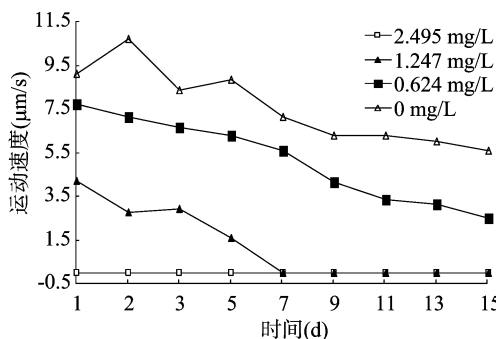


图2 Cd^{2+} 浓度对 *Nitzschia amplexans* 运动状态的影响

a 的总含量变化不是很大;培养后 5 d, Cd^{2+} 浓度为 4.989 mg/L 的生长抑制率达到最大,叶绿素 a 总含量下降。5 d 后, Cd^{2+} 浓度为 4.989、2.495、1.247 mg/L 藻液中的叶绿素 a 含量基本不再增加,对照组的叶绿素 a 含量则明显增加,说明 Cd^{2+} 对该种菱形藻的叶绿素 a 含量有一定影响。计算 13 d 后叶绿素含量与 Cd^{2+} 浓度相关系数 $r = -0.797$, 呈负相关关系,一元回归线性方程为 $y = -0.251x + 4.782$ ($P < 0.05$), 说明 Cd^{2+} 浓度对藻光合作用能力有一定影响,且随着培养时间和 Cd^{2+} 作用时间的延长而增加影响力度。

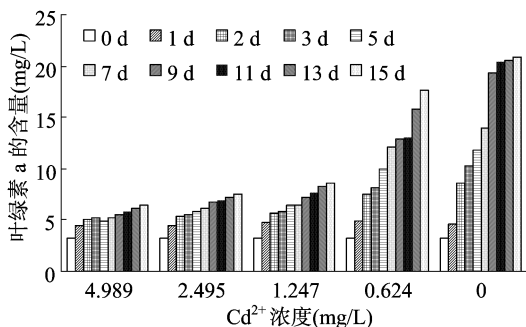


图3 Cd^{2+} 浓度对 *Nitzschia amplexans* 叶绿素 a 的影响

3 结论与讨论

生物监测是理化监测的重要补充,用生物监测进行配合,充分利用指示生物对污染物毒性反应的敏感性,便能较准确地反映真实的污染状况^[10]。菱形藻为污水藻,本试验对象选取菱形藻属中的 *Nitzschia amplexans*,该种生物对重金属响应的报道极少,而它又是中国西南河流中常见的硅藻种。因此,希望通过本试验可以提供一些科学数据。在预试验培养时使用 f/2 培养基、土壤浸出液以及土壤浸出液和培养基基础液混合液作为培养基,经观察得出使用土壤浸出液与培养基基础液按一定比例混合后用作培养基中的藻数量增长最快,藻的运动情况较好,因此,将其作为本试验中 *Nitzschia amplexans* 的培养基。将通过分离和纯化培养得到纯种 *Nitzschia amplexans* 用于不同浓度的 Cd^{2+} 藻液中进行急性毒性试验和亚急性毒性胁迫培养试验,测定 96 h EC_{50} 、叶绿素 a 含量及其运动的平均速度,并对这些测定数据进行分析。藻液中的 Cd^{2+} 浓度与对该藻生长呈负相关关系,且随着时间的延长,特别是亚急性毒性胁迫培养试验 5 d 后, Cd^{2+} 浓度对该藻的叶绿素 a 含量及运动状况的影响程度明显逐渐增强,该反应可用于水环境的检测。

目前,国内外已对多种硅藻受单一重金属胁迫的影响进行了大量研究^[11],将 20 世纪 90 年代之后微藻受单一重金属胁迫的 LC_{50} 或 EC_{50} 值进行总结,但尚未见 *Nitzschia amplexans* 的 EC_{50} 研究报道。若对比该藻种在 Cd^{2+} 胁迫培养与其他硅藻[如三角褐指藻(*Pheodactylum tricornutum*)、新月菱形藻 *Nitzschia closterium* 等]的 96 h EC_{50} 值,其值明显较大^[12],说明 *Nitzschia amplexans* 对 Cd^{2+} 耐受程度较弱,对 Cd^{2+} 浓度变化反应敏感,可用于监测水体中的重金属 Cd^{2+} 含量。

一般情况下,重金属对藻类生理、生化功能的影响主要表现在抑制光合作用、减少细胞色素、导致畸变以及改变天然环境中藻类的组成。此外,有关藻类的 DNA、RNA、蛋白质合成及酶活性等方面也有报道^[13]。本试验对 *Nitzschia amplexans* 在 15 d 内进行不同浓度 Cd^{2+} 亚急性毒性胁迫培养,结果显示,藻的叶绿素 a 含量的增加受到明显抑制。邱昌恩研究发现,重金属离子能通过阻碍光合作用电子传递,抽串 4 蛋白质合成,对藻细胞线粒体形成损伤使叶绿体变形^[14],如叶绿体收缩、类囊体膨胀、基粒结构解体、基质减少、质体小球大量增加等现象^[15-16],从而降低了藻细胞中的叶绿素 a 的含量。藻细胞生存生长的能量来源于光合作用,而光合作用发生在叶绿体片层中。类囊体膜上含有各种光合色素,光合片层基质中含有光合作用暗反应所需的酶系统,光合片层受损,意味着光合作用酶系统受到影响,能量转化无法顺畅完成,导致细胞生长受到影响,从而必定会影响藻的运动。

通过多次试验观察发现,在 09:00—10:00 期间, *Nitzschia amplexans* 最活跃,因此将试验情况观察时间定在这一时段。 Cd^{2+} 浓度为 4.989、2.495 mg/L 时,所有藻停止运动,因此 Cd^{2+} 浓度最高点设定在 2.495 mg/L。通过观测运动情况发现, Cd^{2+} 对 *Nitzschia amplexans* 运动速度有很大的影响,可能是胞外蛋白聚糖(EPS)与硅藻运动有关^[17-18]。今后可以深入开展 *Nitzschia amplexans* 胞外产物与运动情况相关的试验。

参考文献:

- [1] 张征田,庞振波,夏敏,等. 镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4579-4585.
- [2] 张乃星,曹丛华,任荣珠,等. 胶州湾外海洋倾倒地表层沉积物中的重金属及其潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1315-1320.
- [3] 王倩,黔桂珠江水系底栖硅藻群落分布特征及其与环境变量间的相关性研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2009.
- [4] Kelly M G, Cazaubon A, Coring E, et al. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe[J]. J Applied Phycol, 1998, 10: 215-224.
- [5] Whitton B A, Rott E. Use of Algae for monitoring rivers: II[M]. Innsbruck: Institut für Botanik, Universität Innsbruck, 1996, 196.
- [6] 邢荣莲. 海洋底栖硅藻的筛选、培养和应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.
- [7] 周启星,孔繁翔,朱琳. 生态毒理学[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [8] 姚南瑜. 藻类生理学[M]. 大连:大连工学院出版社,1987:120-121.
- [9] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:721.

常子磐,李来武,严经天,等. 菊芋、玉米和大豆秸秆颗粒状燃料的燃烧性能比较[J]. 江苏农业科学,2015,43(3):308-310.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.03.100

菊芋、玉米和大豆秸秆颗粒状燃料的燃烧性能比较

常子磐^{1,2}, 李来武¹, 严经天¹, 林源野¹, 王长海^{1,2}, 赵耕毛^{1,2}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095; 2. 江苏省海洋生物学重点实验室, 江苏南京 210095)

摘要: 菊芋发酵生产生物乙醇的研究报道较多,但是迄今还没有被研究用于生产生物质固体燃料的报道。比较了菊芋、玉米和大豆秸秆加工成的生物质固体燃料的化学组成以及燃烧特性,结果表明:菊芋秸秆加工的生物质固体燃料的燃点和灰分均低于玉米秸秆和大豆秸秆所生产的生物质固体燃料,但其放热量要高于后两者,挥发分高于常规固体燃料加工原料玉米秸秆。菊芋秸秆加工的生物质固体燃料燃烧所释放的酸性气体量极低,燃烧性能明显优于玉米、大豆秸秆等加工的大众固体燃料,因此它是一种有前景、可替代化石能源的新型固体燃料。

关键词: 菊芋;玉米;大豆;生物质秸秆;燃烧性能;固体成型燃料

中图分类号: S216.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)03-0308-03

我国是能源生产大国和消费大国,其中煤炭消耗量占全球煤炭消耗总量的 48.2%^[1]。同时,我国也是化石能源非常短缺的国家。开发利用新的能源成为缓解资源紧张和保护环境的迫切任务。我国是农业大国,每年农业废弃物的生产量高达 7 亿 t,这些生物质原料多数未被有效利用,每年可作生物质燃料利用的有 3 亿~4 亿 t,其中有相当一部分是被直接烧掉,这不仅浪费了资源而且破坏了环境^[2]。以玉米、大豆、麻风树等较为经济的农作物为原料,经过加工产生块状燃料^[3-5],不仅使这些废弃的生物质作为一种可再生资源加以利用,而且起着保护和改善生态环境的重要作用。菊芋(*Helianthus tuberosus* L.) 是一种菊科向日葵属宿根性草本植物^[6],原产于北美洲的温带地区,自 17 世纪一直生长在欧洲^[7],现在也被广泛种植在我国山西、黑龙江、山东、江苏以及土壤贫瘠的地区^[8-11]。菊芋以其优异的经济、环保、能源开发价值越来越受到国内外能源专家的重视^[12]。本研究以能源植物菊芋、玉米、大豆等秸秆为原料,采用比较研究的方

法,探讨不同农业秸秆固体成型燃料的燃烧性能,为研究开发出燃烧性能好、环保标准高的新型生物质固体成型燃料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验仪器设备

试验采用山东宇龙机械有限公司生产的 SG50 型秸秆粉碎机、沙克龙和 SKJ300 秸秆颗粒机、LSJ190 螺旋提升机;鹤壁鑫泰高科仪器制造有限公司生产的 ZDHW-2010B 型微机压缩制冷全自动量热仪、XTRD-5 型燃点测试仪和 JXL-620 型智能马弗炉;德国 RBR 公司生产的 J2KN 型烟气分析仪;德国赛多利斯公司生产的 BSSA224S 型电子天平。

1.2 试验场地概况

试验在南京农业大学滩涂农业试验站(江苏大丰)固体成型燃料中试生产车间进行。固体成型燃料中试生产车间位于江苏省盐城市海洋生物产业园。

1.3 供试材料及工艺流程

收集试验站内菊芋、玉米、大豆等农作物秸秆,并在固体成型燃料中试生产车间,分批次将农作物秸秆粉碎、过筛,调整秸秆粉末湿度,经 SKJ300 秸秆颗粒机将秸秆粉末压缩成型,获得不同农作物秸秆加工而成的固体成型燃料样品(图 1)。经上述工艺流程加工处理出的试验产品见图 2。

收稿日期:2014-03-21

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(12)1005];南京农业大学 2013 年国家级 SRT 项目(编号 201310307022)。

作者简介:常子磐(1988—),男,内蒙兴安盟人,硕士,从事农作物秸秆高能利用研究。E-mail: czp01@163.com。

通信作者:赵耕毛,副教授,从事海洋生物学、滩涂盐碱地改良研究。E-mail: seawater@njau.edu.cn。

[10] 路艳君. 重金属离子对盐藻和新月菱形藻的生长的影响[D]. 烟台:烟台大学,2010.

[11] 油秋平,支崇远,王璐,等. 赤水河底栖硅藻多样性及其与重金属相关性分析[J]. 江苏农业科学,2013,41(10):347-349.

[12] Sun B Y, Ya P, Shi Z L, et al. Effects of chromium(VI) on the growth phytoplankton in sea water[J]. J Ocean Univ Qingdao, 1990,20(4):1-8.

[13] 姜彬慧,林碧琴. 重金属对藻类的毒性作用研究进展[J]. 辽宁大学学报:自然科学版,2000,27(3):281-287.

[14] 邱昌恩. 六种常见重金属对藻类的毒性效应概述[J]. 重庆医科大学学报,2006,31(5):776-778.

[15] Li R C. Effects of cadmium and Lead on physiological and ultrastructural features in tobacco leaves[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2000,24(2):238-242.

[16] Fernandes J C, Henriques F S. Biochemical, physiological, and structural effects of excess copper in plants[J]. The Botanical Review,1991,57(3):246-273.

[17] Gordon R, Drum R W. A capillarity mechanism for diatom gliding locomotion[J]. Proc Natl Acad Sci USA,1970,67:338-344.

[18] Edgar L A, Pickett-Heaps J D. Diatom locomotion[J]. Prog Phycol Res,1984,3:47-88.