

一种用于微藻培养的新型板式光生物反应器

张庆华, 颜成虎, 薛升长, 吴霞, 王智慧, 丛威

中国科学院过程工程研究所 生化工程国家重点实验室, 北京 100190

张庆华, 颜成虎, 薛升长, 等. 一种用于微藻培养的新型板式光生物反应器. 生物工程学报, 2015, 31(2): 251-257.

Zhang QH, Yan CH, Xue SZ, et al. A novel flat plate photobioreactor for microalgae cultivation. Chin J Biotech, 2015, 31(2): 251-257.

摘要: 微藻的闪光效应可以大幅提高微藻的光效率, 提高微藻产量。通过在传统的板式光生物反应器中加入斜挡板以增强微藻的闪光效应。以小球藻为模型藻种, 考察了新型板式光生物反应器内不同光强和不同进口流速对小球藻生长速率和光效率的影响。结果表明, 当进口流速为 0.16 m/s 时, 随着光强的提高, 小球藻的细胞浓度逐渐增加, 光效率逐渐降低; 在 $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光强条件下, 小球藻细胞浓度和光效率均随着进口流速的提高而增加。新型板式光生物反应器内小球藻的细胞浓度比传统板式光生物反应器提高了 39.23%, 表明在传统板式光生物反应器内加入斜挡板可有效增强微藻的闪光效应。

关键词: 微藻, 板式光生物反应器, 光强, 进口流速, 光效率

A novel flat plate photobioreactor for microalgae cultivation

Qinghua Zhang, Chenghu Yan, Shengzhang Xue, Xia Wu, Zhihui Wang, and Wei Cong

National Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Flashing light effect on microalgae could significantly improve the light efficiency and biomass productivity of microalgae. In this paper, the baffles were introduced into the traditional flat plate photobioreactor so as to enhance the flashing light effect of microalgae. Making *Chlorella* sp. as the model microalgae, the effect of light intensity and inlet

Received: April 23, 2014; **Accepted:** June 9, 2014

Supported by: Key Projects in the National Science and Technology Pillar Program during the Twelfth Five-Year Plan Period (No. 2011BAD14B02), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2013AA065801).

Corresponding author: Qinghua Zhang. Tel: +86-10-82627074; Fax: +86-10-82627066; E-mail: qhzhang@ipe.ac.cn

“十二五”国家科技支撑计划 (No. 2011BAD14B02), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (No. 2013AA065801) 资助。

网络出版时间: 2014-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13345/j.cjb.140233.html>

velocity on the biomass concentration of *Chlorella* sp. and light efficiency were evaluated. The results showed that, when the inlet velocity was 0.16 m/s, with the increase of light intensity, the cell dry weight of *Chlorella* sp. increased and light efficiency decreased. With increasing the inlet velocity, the cell dry weight of *Chlorella* sp. and light efficiency both increased under the condition of 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ light intensity. The cell dry weight of *Chlorella* sp. cultivated in the novel flat plate photobioreactor was 39.23% higher than that of the traditional one, which showed that the flashing light effect of microalgae could be improved in the flat plate photobioreactor with inclined baffles built-in.

Keywords: microalgae, flat plate photobioreactor, light intensity, inlet velocity, light efficiency

微藻细胞富含氨基酸、蛋白质、维生素、不饱和脂肪酸等多种高附加值的生物物质, 已经成为人类食品、医药、染料、精细化工领域的重要材料来源。随着石油、煤炭等化石能源的日益枯竭, 基于生物质的生物炼制引起了人们的高度重视。微藻能够提供大量的生物质(油脂、淀粉、纤维素), 在生物炼制领域, 具有广阔的应用前景^[1-5], 是一种重要的可再生能源。

光生物反应器是微藻大规模培养的核心, 目前主要有开放式培养和封闭式培养两种方式。开放式培养是开发最早、应用最为普遍的一种方式, 目前世界各国、特别是中国仍然将其作为微藻工业化培养的主要方式。相比于开放式培养, 封闭式培养条件稳定, 培养密度高, 藻的生长速度快, 生产周期短, 缺点是投资成本高^[6]。为了克服封闭式培养成本高的缺陷, 一方面需要降低培养所需的材料、能耗成本; 另一方面需要大幅度提高产率。虽然封闭式培养的产率要高于开放式培养, 但是微藻的光能利用率(光效率)还很低。设法提高微藻细胞对光能的利用率是提高产率、降低成本的重要途径。

微藻的光合作用过程可分为两个阶段, 称为光反应和暗反应。在光反应阶段, 藻细胞接受光子并转换为化学能; 在暗反应阶段, 藻细胞利用化学能合成细胞组分。在暗反应阶段, 藻细胞

不需要光照甚至光照反而有害。因此, 对单个藻细胞而言, 持续的光照意味着光量子的浪费。在规模培养的光生物反应器内以及通常的细胞密度下, 光线在培养液内传播时会迅速衰减, 光的穿透距离为几毫米, 在高细胞密度下只有 1 mm 左右。因此, 光生物反应器内事实上可分为靠近光照面内壁面的光区与之外的暗区两部分。如果藻细胞以特定频率在光生物反应器的光区与暗区频繁置换时, 会产生“闪光效应”, 光能的利用率会得到很大提高^[7-13]。文献中针对封闭式光生物反应器内微藻闪光效应的报道多为管式^[14-15]和气升板式^[16-17]两种, 对于泵驱动水平放置板式光生物反应器的闪光效应鲜有报道。本文通过在传统的泵驱动水平放置板式光生物反应器中加入斜挡板, 使流体在反应器内流动时形成螺旋运动, 从而增强微藻的闪光效应。以小球藻为模型藻种, 考察了新型板式光生物反应器内不同光强和进口流速对小球藻生物产量的影响。

1 材料与方法

1.1 新型光生物反应器单流道结构

新型光生物反应器单流道的结构如图 1 所示。挡板在光照面和无光面上交错设置, 当培养液在反应器内流动时, 会形成近似的螺旋运动, 从而增强微藻的闪光效应。

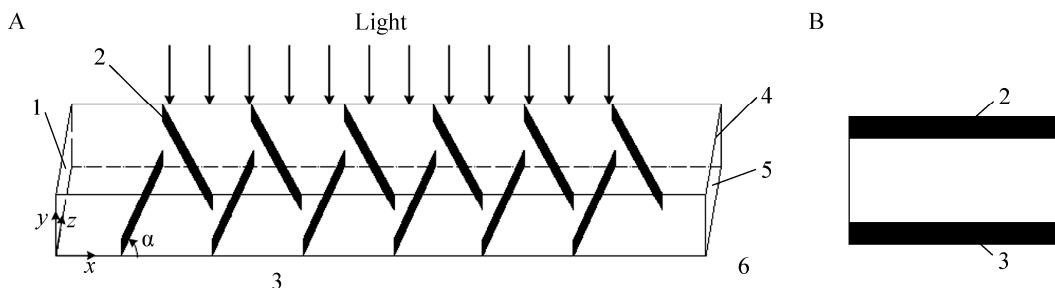


图1 新型板式光生物反应器结构

Fig. 1 Sketch of the novel flat plate photobioreactor. (A) Main view. (B) Right view. 1: inlet; 2: upper baffle; 3: nether baffle; 4: luminous surface; 5: outlet; 6: nonluminous surface.

1.2 藻种和培养基

实验藻种为中国科学院水生生物研究所提供的淡水小球藻。使用BG11培养基,组成为: NaNO_3 1.5 g/L, K_2HPO_4 0.04 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.075 g/L, 柠檬酸 0.006 g/L, 柠檬酸铁铵 0.006 g/L, Na_2EDTA 0.001 g/L, CaCl_2 0.027 2 g/L, Na_2CO_3 0.02 g/L, H_3BO_3 0.002 86 g/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.001 81 g/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.000 22 g/L, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.000 39 g/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.000 08 g/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.000 04 g/L。

1.3 方法

实验用的新型光生物反应器由图1所示的10个流道串联组成,整个反应器的长、宽、高分别为1.0 m, 0.55 m和0.025 m。斜挡板长为0.064 m,高为0.005 m,厚为0.002 m,与流体流动方向成 45° 角。光源由一特制LED光源板提供,光强可调,培养过程中持续光照。培养液由蠕动泵驱动,实验过程中出口处流出的培养液经料液桶后再次循环到反应器入口,培养液总体积18 L。温度由恒温水浴进行控制(26 ± 0.5) $^\circ\text{C}$),通过pH控制仪控制二氧化碳气体的通入,以维持培养液pH值恒定。用于对照

的传统板式光生物反应器尺寸与新型光生物反应器相同,反应器内无斜挡板。

1.4 分析方法

1.4.1 光强测定

光强通过光合有效辐射光量子计(波长范围400–700 nm,英国Hansatech仪器公司)测定。

1.4.2 干重曲线

取某一浓度的小球藻溶液,稀释成5种不同浓度,然后经过离心、洗涤、干燥、称重,获得藻细胞浓度与吸光度之间的关系。

$$X = 0.29OD_{680} + 0.005, R^2 = 0.999 \quad (1)$$

其中, X 为藻细胞浓度(g/L), OD_{680} 为680 nm波长下的吸光度。

1.4.3 光效率

培养过程中的光效率(Light efficiency, LE)的计算公式如下:

$$LE = \frac{(X_2 - X_1) \times H_G \times 10^6}{E_m \times (t_2 - t_1)} \times 100\% \quad (2)$$

其中, X_1 、 X_2 分别为 t_1 、 t_2 (s) 时刻的藻细胞浓度(g/L); H_G 为生物质热焓(kJ/g),小球藻的 H_G 为23.587 kJ/g; E_{in} 为培养过程单位体积光

能输入 (W/m^3)。本文 LE 的数值为整个培养过程的平均值。

2 结果与讨论

2.1 新型板式光生物反应器与传统板式比较

小球藻在新型板式光生物反应器与传统板式光生物反应器内的对照培养结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 小球藻在新型板式光生物反应器内培养 7 d 的细胞浓度可达到 2.91 g/L, 而传统板式光生物反应器内小球藻的细胞浓度只有 2.09 g/L, 新型板式光生物反应器内小球藻的细胞浓度比传统反应器内的提高了 39.23%。分析原因主要有两个方面: 一方面, 斜挡板的加入使板式反应器内的湍流强度增加, 促进了培养液中的气液交换; 另一方面, 通过进行新型和传统板式光生物反应器内光效率计算发现, 传统光生物反应器内的平均光效率为 2.29%, 而新型板式光生物反应器内的光效率为 3.38%, 光效率比传统反应器提高了 47.6%, 这可能是导致小球藻细胞浓度大幅提高的主要原因。

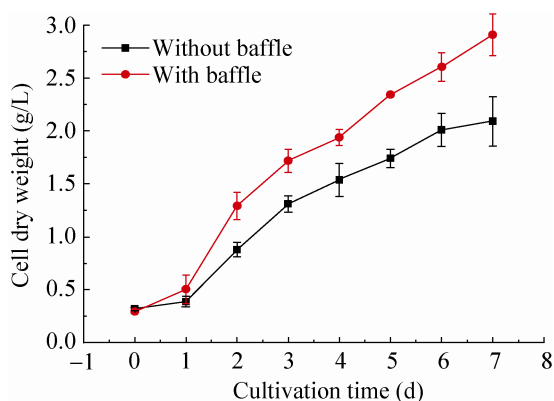


图 2 加入斜挡板前后小球藻细胞浓度对比
Fig. 2 Comparison of cell dry weight of *Chlorella* sp. with and without baffle.

2.2 光强对小球藻细胞浓度和光效率的影响

光强是影响微藻生长快慢的重要因素之一。在流速为 0.16 m/s 的状况下, 考察了 3 个不同光照强度 ($200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $1\ 000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 下小球藻的生长状况, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在实验考察范围内, 随着光强的增加, 小球藻的生物量逐渐增加。欧阳峥嵘等^[18]利用测定净光合放氧速率的方法研究了光照强度对小球藻光合作用的影响, 研究发现, 在 $100\text{--}1\ 400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光强范围内, 小球藻的净光合放氧速率随光强的增加而增加, 即光强越高, 小球藻生长越快, 这与本文的结果相一致。图 4 考察了光强对小球藻光效率的影响, 从图中可以看出, 光效率随着光强的提高逐渐降低。

2.3 进口速度对小球藻细胞浓度和光效率的影响

反应器的进口速度也是影响微藻生长状态的因素之一。Muller-Feuga 等^[19]研究了入口流速

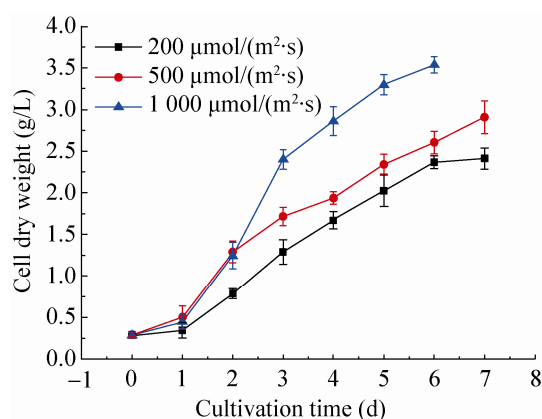


图 3 光强对小球藻细胞浓度的影响
Fig. 3 Effect of light intensity on cell dry weight of *Chlorella* sp..

对紫球藻面积产率的影响,发现当入口流速从 0.1 m/s 增加到 0.2 m/s 时,紫球藻的面积产率提高了 7%。但是,当流速达到 0.45 m/s 时,紫球藻的面积产率反而降低了 9%。这主要是因为过高的流速带来的高剪切会破坏藻细胞。Carvalho 等^[20]通过研究也发现过高的混合速率引起的剪切会损害藻细胞的活性,影响藻细胞的正常生长。因此,在进行微藻培养过程中应选用适宜的进口流速。本文考察了光强为 $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时 3 个不同进口速度 (0.13、0.16、0.21 m/s) 对小球藻生长和光效率的影响,结果如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出,随着进口流速的增加,小球藻的细胞浓度和光效率逐渐增加。小球藻在反应器内培养 7 d 时,进口流速为 0.21 m/s 的小球藻细胞浓度比进口流速为 0.13 m/s 时小球藻的细胞浓度高 34.98%。这主要是因为当光强相同时,影响微藻生长快慢的主要因素是光暗频率的高低,光暗频率越高,微藻的生长速度越快^[7,21]。

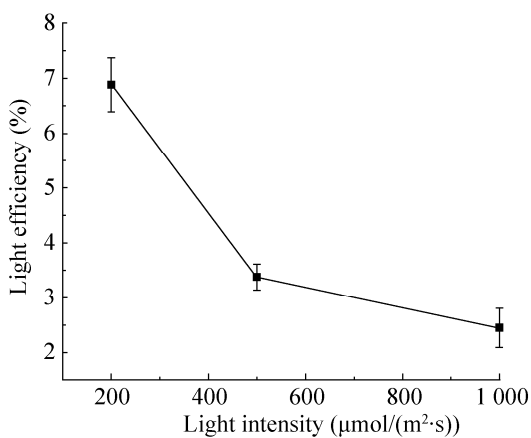


图 4 光强对光效率的影响

Fig. 4 Effect of light intensity on light efficiency.

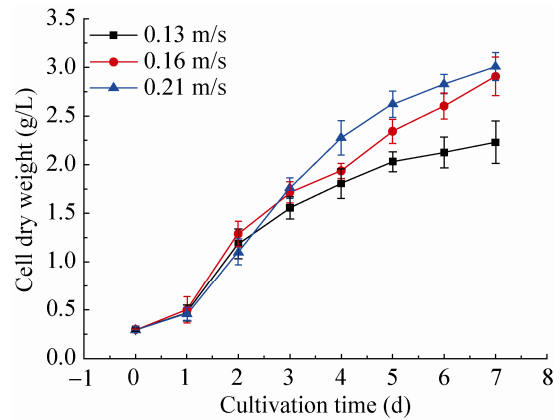


图 5 进口流速对小球藻细胞浓度的影响

Fig. 5 Effect of inlet velocity on cell dry weight of *Chlorella* sp..

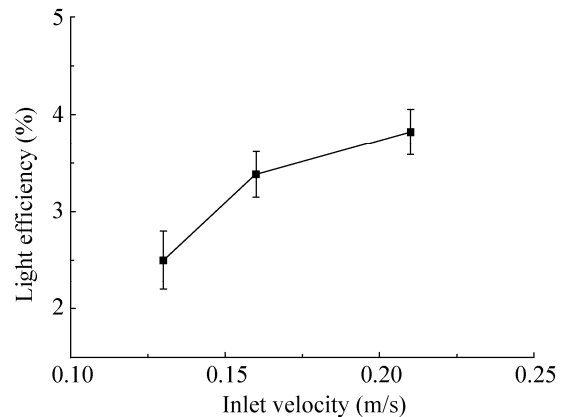


图 6 进口流速对光效率的影响

Fig. 6 Effect of inlet velocity on light efficiency.

3 结论

本文设计了一种能实现微藻闪光效应的板式光生物反应器,并以小球藻为模型藻种,考察了不同光强和进口速度对小球藻细胞浓度和光效率的影响。研究发现,新型板式光生物反应器内小球藻的细胞浓度比传统板式光生物反应器提高了 39.23%。在实验考察范围内,随着

光强和进口流速的提高, 小球藻的细胞浓度均增加。光效率随光强的提高而降低, 随进口流速的提高而增加。

从长远看, 沙漠和海洋是我国发展微藻产业的理想地点。与管式、气升板式和传统泵驱动板式光生物反应器相比, 新型板式光生物反应器能充分利用微藻的闪光效应, 提高微藻产量, 且易于放大。因此, 新型板式光生物反应器具有非常广阔的应用前景。

REFERENCES

- [1] Raja R, Hemaiswarya S, Kumar NA, et al. A perspective on the biotechnological potential of microalgae. *Crit Rev Microbiol*, 2008, 34(2): 77–88.
- [2] Dhup S, Dhawan V. Effect of nitrogen concentration on lipid productivity and fatty acid composition of *Monoraphidium* sp. *Bioresource Technol*, 2014, 152: 572–575.
- [3] Amaro HM, Guedes AC, Malcata FX. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Appl Energy*, 2011, 88(10): 3402–3410.
- [4] Terigar BG, Theegala CS. Investigating the interdependence between cell density, biomass productivity, and lipid productivity to maximize biofuel feedstock production from outdoor microalgal cultures. *Renew Energ*, 2014, 64: 238–243.
- [5] Rajkumar R, Yaakob Z, Takriff MS. Potential of the micro and macro algae for biofuel production: a brief review. *Bioresources*, 2014, 9(1): 1606–1633.
- [6] Pulz O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl Microbiol Biot*, 2001, 57(3): 287–293.
- [7] Janssen M, Janssen M, de Winter M, et al. Efficiency of light utilization of *Chlamydomonas reinhardtii* under medium-duration light/dark cycles. *J Biotechnol*, 2000, 78(2): 123–137.
- [8] Vejrazka C, Janssen M, Streefland M, et al. Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in attenuated, flashing light. *Biotechnol Bioeng*, 2012, 109(10): 2567–2574.
- [9] Kong B, Shanks JV, Vigil RD. Enhanced algal growth rate in a Taylor vortex reactor. *Biotechnol Bioeng*, 2013, 110(8): 2140–2149.
- [10] Kong B, Vigil RD. Light-limited continuous culture of *Chlorella vulgaris* in a Taylor vortex reactor. *Environ Prog Sustain*, 2013, 32(4): 884–890.
- [11] Yoshioka M, Yago T, Yoshie-Stark Y, et al. Effect of high frequency of intermittent light on the growth and *Isochrysis galbana*. *Aquaculture*, 2012, 338: 111–117.
- [12] Lunka AA, Bayless DJ. Effects of flashing light-emitting diodes on algal biomass productivity. *J Appl Phycol*, 2013, 25(6): 1679–1685.
- [13] Xue SZ, Zhang QH, Wu X, et al. A novel photobioreactor structure using optical fibers as inner light source to fulfill flashing light effects of microalgae. *Bioresource Technol*, 2013, 138: 141–147.
- [14] Perner-Nochta I, Posten C. Simulations of light intensity variation in photobioreactors. *J Biotechnol*, 2007, 131(3): 276–285.
- [15] Zhang QH, Wu X, Xue SZ, et al. Study of hydrodynamic characteristics in tubular photobioreactors. *Bioproc Biosyst Eng*, 2013, 36(2): 143–150.
- [16] Degen JA, Uebele A, Retze A, et al. A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *J Biotechnol*, 2001, 92(2): 89–94.
- [17] Lin C, Li YG, Wang WL, et al. Numerical and experimental investigation of a novel flat-photobioreactor with multistage-separator. *J Chem Eng Chin Univ*, 2009, 23(2): 263–269 (in Chinese).
林晨, 李元广, 王伟良, 等. 一种新型多节隔板-

- 平板式光生物反应器的数值和实验研究. 高校化学工程学报, 2009, 23(2): 263-269.
- [18] Ouyang ZR, Wen XB, Geng YH, et al. The effects of light intensities, temperatures, pH and salinities on photosynthesis of *Chlorella*. J Wuhan Botan Res, 2010, 28(1): 49-55 (in Chinese).
欧阳峥嵘, 温小斌, 耿亚红, 等. 光照强度、温度、pH、盐度对小球藻(*Chlorella*)光合作用的影响. 武汉植物学研究, 2010, 28(1): 49-55.
- [19] Muller-Feuga A, Pruvost J, Le Guedes R, et al. Swirling flow implementation in a photobioreactor for batch and continuous cultures of *Porphyridium cruentum*. Biotechnol Bioeng, 2003, 84(5): 544-551.
- [20] Carvalho APL, Meireles A, Malcata FX. Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. Biotechnol Prog, 2006, 22(6): 1490-1506.
- [21] Vejrazka C, Janssen M, Streefland M, et al. Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in flashing light. Biotechnol Bioeng, 2011, 108(12): 2905-2913.

(本文责编 陈宏宇)



《科学》公布 2014 年十大科学突破

新华社电美国《科学》杂志2014年12月18日公布了其评出的2014年十大科学突破,这是对全球科学研究每年一度的年终盘点,人造探测器首次登陆彗星被选为本年度最重要的科学突破。

欧洲“罗塞塔”探测器在飞行10年约64亿公里后,2014年8月成功追上“丘留莫夫-格拉西缅科”彗星,然后又于2014年11月释放着陆器“菲莱”登陆彗星表面。“菲莱”着陆是一个惊人壮举,它吸引了全世界的关注”《科学》杂志新闻编辑蒂姆·阿彭策勒在一份声明中说,“而整个‘罗塞塔’使命就是突破,它使得科学家们得以近距离观察彗星的变暖、呼吸和演化。”

《科学》杂志评选的今年另外9个重大科学突破分别是:

——从恐龙到鸟的转变:一系列论文揭示了恐龙如何进化成鸟类,以及这些鸟类祖先如何在6 500万年前恐龙大灭绝事件中存活下来。

——年轻血液有“返老还童”功效:研究表明,高龄小鼠体内注射年轻小鼠的血液可以“返老还童”,而原因可能在于血液中一种叫GDF11的蛋白。科学家据此启动一项临床试验,给早老性痴呆症患者注射年轻捐赠者的血液。

——机器人“自主”合作:受白蚁启发,科学家开发出新型机器人,可在无人监督的情况下一同工作,完成搭积木式的简单结构搭建工作。

——仿人脑芯片:IBM领导的一项研究首次推出大规模“神经形态”芯片,它们以类似人脑的方式来处理信息。

——可治糖尿病的细胞:β细胞是胰脏中产生胰岛素的细胞,今年两个研究小组用两种不同方法在实验室中培养出酷似β细胞的细胞,为研究糖尿病提供了新的途径。

——印尼洞穴艺术:印度尼西亚某洞穴中的手模印和动物绘画曾被认为只有1万年历史,但实际上已存在3.5万至4万年。该发现表明,人类在亚洲制作的象征性艺术与最早的欧洲洞穴画家的作品一样早。

——操纵记忆:研究人员利用光遗传学技术操纵小鼠的特定记忆,如删除记忆或植入虚假记忆。

——立方体卫星:这种长宽高均为10厘米的廉价微型卫星在2014年真正获得成功,已经开始进行一些真正的科学工作。

——生命基因密码“添丁”:自然界的DNA(脱氧核糖核酸)只有4种碱基:G、T、C和A,但科学家设计制造的一种大肠杆菌的DNA新添两个成员:X和Y。

(摘自 羊城晚报)