

网络出版时间:2020-11-26 11:34 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2021.05.009
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20201125.1505.018.html

2 种吸附剂对鸡粪厌氧发酵产气特性的影响

曾瑞媛^{1,2}, 冉薛伶^{1,2}, 王彦博^{1,2}, 王晓娇^{1,2}, 冯永忠^{1,2},
韩新辉^{1,2}, 杨改河^{1,2}, 任广鑫^{1,2}

(1 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100; 2 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] **【目的】**研究生物炭和纳米零价铁(nano zero-valent iron, nZVI) 2 种吸附剂对鸡粪中温厌氧发酵产气特性的影响,以寻求适宜的吸附剂及其添加量。**【方法】**采用中温(35±1)℃恒温批次试验,以鸡粪为发酵原料,分别添加不同质量分数(0%(对照),2.5%,5%,7.5%和10%)的生物炭和不同质量分数(0%(对照),0.25%,0.5%,0.75%和1%)的 nZVI,探索添加生物炭和 nZVI 对鸡粪厌氧发酵产气特性动态的影响。**【结果】**添加生物炭后,鸡粪厌氧发酵累积沼气产量随着时间的延长总体不断增加;试验结束时,添加生物炭各处理的累积沼气产量显著高于对照($P<0.05$),其中添加 5%生物炭处理的累积沼气产量最高,达到 21 532 mL。添加 nZVI 后,累积沼气产量随着时间的延长呈增加趋势;试验结束时,未添加 nZVI 的累积沼气产量最高,达到 11 101 mL。随着生物炭添加量的增加,平均沼气产量呈单峰变化趋势,其中添加 5%生物炭处理的平均沼气产量最高,达到 414 mL/d;随着 nZVI 添加量的增加,平均沼气产量呈先降后增再降的变化趋势。与对照相比,添加生物炭均能显著提高甲烷含量,而添加 nZVI 的各处理仅 1% nZVI 才能显著提高甲烷含量。随着发酵时间的增加,添加生物炭后 pH 总体呈上升-下降-上升趋势,添加 nZVI 后 pH 总体呈逐渐上升趋势。添加生物炭和 nZVI 的各处理后发酵过程中挥发性脂肪酸质量浓度均呈上升-下降-上升-下降的变化趋势,氨态氮质量浓度发酵初期快速增加,之后总体呈降低的趋势。与对照相比,添加生物炭处理的总固体和挥发性固体的产气效率均显著增加($P<0.05$),其中添加 5%生物炭的处理总固体和挥发性固体产沼气效率最高;而添加 nZVI 的总固体和挥发性固体产气效率均降低。**【结论】**添加生物炭对鸡粪厌氧发酵有促进作用,在以 250 g 干鸡粪为发酵原料、发酵总体积 700 mL、发酵温度(35±1)℃的条件下,当生物炭添加量为 15.32 g 时,累积沼气产量最高为 21 844.75 mL;添加 nZVI 对鸡粪厌氧发酵产沼气无促进作用。

[关键词] 生物炭;纳米零价铁;鸡粪;厌氧发酵;发酵特性

[中图分类号] S216.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2021)05-0065-09

Effects of two types of adsorptive additives on biogas production characteristics of chicken manure in anaerobic fermentation

ZENG Ruiyuan^{1,2}, RAN Xueling^{1,2}, WANG Yanbo^{1,2}, WANG Xiaojiao^{1,2},
FENG Yongzhong^{1,2}, HAN Xinhui^{1,2}, YANG Gaihe^{1,2}, REN Guangxin^{1,2}

(1 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】**The effects of biochar and nZVI on gas production characteristics of chicken manure in medium temperature anaerobic fermentation were studied to obtain appropriate adsorbent and its addition amount. **【Method】**Chicken manure was used as raw material for batch fermentation at medium

[收稿日期] 2020-05-15

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51508467,41871205);中国博士后基金项目(2016T90950,2015M582708);陕西省循环农业工程技术研究中心项目(2019HBGC-13)

[作者简介] 曾瑞媛(1994—),女,四川成都人,硕士,主要从事农业区域发展与循环农业研究。E-mail:zengruiyuan@outlook.com

[通信作者] 任广鑫(1969—),男,甘肃庆阳人,副教授,博士,主要从事植物资源高效利用与农业生态、农业区域发展及规划研究。E-mail:rengx@nwsuaf.edu.cn

temperature (35 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ with addition of biochar (0% (contrast), 2.5%, 5%, 7.5% and 10%) and nZVI (0% (contrast), 0.25%, 0.5%, 0.75% and 1%). Then, the effects on gas production characteristics of the anaerobic fermentation of chicken manure were analyzed. **【Result】** With biochar addition, cumulative biogas production of chicken manure anaerobic fermentation increased with time. At the end of experiment, cumulative biogas production and methane content of chicken manure were significantly higher than the control ($P < 0.05$). The optimal amount of biochar was 5%. Under this condition, cumulative biogas output was 21 532 mL. With nZVI addition, cumulative biogas yield increased with time as well. Cumulative biogas yield with 0% nZVI was the highest of 11 101 mL at the end of experiment. With the increase of biochar addition, average biogas production showed a unimodal trend. The highest average biogas production was 414 mL/d with 5% biochar. With the increase of nZVI amount, average biogas production decreased first followed by increase and subsequent decrease. Compared with the control, biochar addition can significantly increase methane content, while only 1% nZVI can significantly increase methane content. With the increase of fermentation time, pH showed increase-decrease-increase trend with biochar addition, while it increased gradually with nZVI addition. Mass concentration of volatile fatty acids in fermentation process showed a trend of increase-decrease-increase-decrease. Concentration of ammonia nitrogen increased rapidly at the beginning of fermentation, followed by a general decreasing trend. Compared with the control, total solid mass and gas production efficiency of volatile solids treated with biochar were significantly increased ($P < 0.05$) with the highest in 5% biochar treatment. Gas production efficiency of total solids and volatile solids reduced with nZVI addition. **【Conclusion】** Biochar addition can promote anaerobic fermentation of chicken manure. The maximum cumulative biogas output of 21 844.75 mL was obtained with dry chicken manure 250 g, total fermentation volume 700 mL, fermentation temperature (35 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, and biochar addition 15.32 g. Adding nZVI had no effect on anaerobic fermentation of chicken manure.

Key words: biochar; nano zero-valent iron (nZVI); chicken manure; anaerobic fermentations; fermentation characteristics

随着强农惠农政策的实施, 畜禽养殖业得到快速发展, 呈现集约化、规模化的发展态势^[1-2], 规模化的畜禽养殖业满足了人民对肉蛋奶产品的需求, 但同时也产生了大量畜禽养殖废弃物。据统计, 一个年出栏 10 万羽鸡的规模化养鸡场, 每天产鲜粪可达 10 t, 累积年产鸡粪达 0.36 万 t^[3]。由于鸡饲料养分含量高, 而鸡无牙齿咀嚼且消化道短, 消化能力弱, 对饲料消化吸收率低, 有 40%~70% 未被吸收的营养物随鸡粪排出体外, 因此鸡粪中含有丰富的营养物质^[4]。如果大量鸡粪未处理或不合理处理将会带来许多问题, 不仅对生态环境造成极大威胁, 而且会导致鸡肉及相关产品的污染, 增加疾病传播机会^[5-6]。

厌氧发酵又称厌氧消化, 指在厌氧环境中, 各种大分子有机物被微生物分解, 最后形成沼气的过程, 是畜禽粪便资源化循环利用、无害化处理广泛使用的技术^[7-9]。鸡粪是富氮性原料的代表, 在厌氧发酵过程中易对发酵系统形成氨态氮抑制^[5, 10-11]。Abouelenien 等^[12]研究表明, 降低鸡粪中的氨态氮

浓度, 可以增加鸡粪厌氧发酵沼气产量。大量研究表明, 外源添加剂能促进厌氧发酵体系中养分的平衡, 并通过增加酶活性等来加强厌氧发酵过程, 常见的添加剂类别有菌类、水解酶类、微量元素类、吸附剂、螯合剂以及营养元素等^[13-14]。常见的吸附剂有以下优点: (1) 对于有害物质, 如色素、重金属、有害气体和抗生素等具有吸附解吸作用, 降低环境中有害物质带来的毒害; (2) 吸附剂内部具有较大孔隙结构, 其不仅能吸附大量微生物, 提高微生物密集度, 而且这种结构提供了有利于微生物生长发育的环境, 可加快微生物水解有机物质的进程, 提升系统对抗负效应的缓冲能力; (3) 能够提供碳源和其他营养元素, 平衡原料碳氮比, 从而提高厌氧发酵沼气产量和产气效率^[15-16]。生物炭和纳米零价铁 (nano zero-valent iron, nZVI) 为污水处理中常见的 2 种吸附剂, 其中生物炭具有孔隙结构发达、比表面积较高、表面含有丰富元素成分和活性官能团、吸附结合能力强等特征, 可有效提升对厌氧发酵系统酸、氨等抑制物质的缓冲能力^[17-19]; nZVI 具有粒径小、比表面

积大(比表面积为 33.5 m²/g,而普通铁粉的比表面积仅为 0.9 m²/g)的特殊结构,以及反应活性高、还原能力强和吸附活性高的特性,并且在氧化还原反应过程中易于被氧化成 Fe₂O₃ 或 Fe₃O₄ 氧化物,因此 nZVI 在去除厌氧发酵过程中的污染物方面得到应用^[20-21]。

目前,关于生物炭和 nZVI 在厌氧发酵上的研究还较少,因此本研究以鸡粪为原料,分别添加不同质量分数的生物炭和 nZVI 进行中温批式厌氧发酵,探索生物炭和 nZVI 对鸡粪厌氧发酵过程产气特性的影响,寻求生物炭和 nZVI 促进厌氧发酵的最佳添加量,旨在为富氮原料底物鸡粪的高效厌氧

发酵提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

鸡粪取自陕西杨凌某蛋鸡养殖场,手工剔除新鲜鸡粪中肉眼可见的杂物。发酵接种物取自杨凌示范区崔西沟村常年稳定运行发酵池中的沼液。生物炭购自南京智融联科技有限公司,裂解温度 400 ℃。nZVI 购自北京德科岛金科技有限公司,平均粒径 80~100 nm,纯度大于 99.99%。发酵原料鸡粪、接种物及生物炭的特性如表 1 所示。

表 1 发酵原料鸡粪和接种物及生物炭的特性

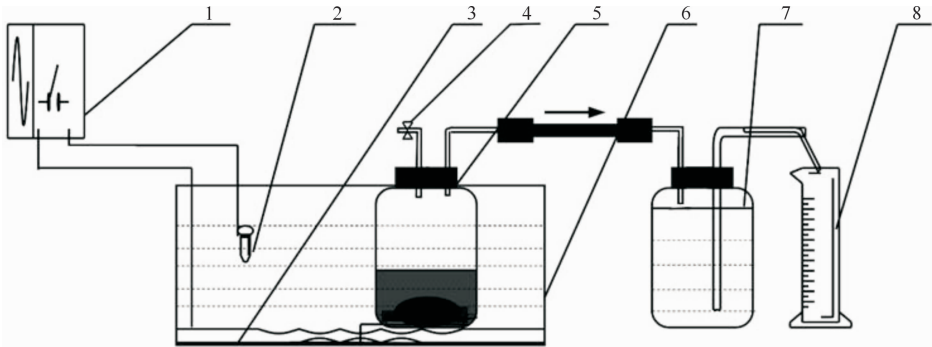
Table 1 Fermentation characteristics of raw materials and biochar

原料 Feed	总固体含量/ (g·kg ⁻¹) Total solids	挥发性固体含量/ (g·kg ⁻¹) Volatile solids	碳含量/% C	氮含量/% N	碳氮比 C:N
鸡粪 Chicken manure	207.8	147.6	36.20	3.69	9.81
接种物 Inoculum	9.2	3.7	35.16	1.75	20.09
生物炭 Biochar	/	/	53.25	0.50	106.50

1.2 试验装置

试验装置为自制的可控恒温厌氧发酵装置,主要由控温仪、发酵瓶和集气瓶等组成,其结构示意图见图 1。本试验选用 1 000 mL 三角瓶作为发酵装置,顶部橡胶塞上设有导气孔和取样孔,导气孔通过橡

胶管连接集气装置。发酵瓶放置于恒温水槽内,水槽底部有 1 000 W 的电热丝,可以加热以提高水温。加热丝由智能温度控制仪(型号:PC-1000)和继电器控制,可显示发酵温度,以保证发酵瓶内温度恒定在(35±1)℃。



1. 温控仪 Temperature controller; 2. 传感器 Sensor; 3. 加热丝 Heating wire; 4. 取样口 Sample hole; 5. 发酵瓶 Substrate; 6. 恒温水槽 Constant temperature tank; 7. 集气瓶 Gas collector; 8. 量筒 Burette

图 1 恒温厌氧发酵装置

Fig. 1 Constant temperature anaerobic fermentation device

1.3 试验方法

以鸡粪为发酵原料进行中温(35±1)℃恒温批次试验。在发酵瓶中分别加入质量分数为 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10% 的生物炭和质量分数为 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1% 的 nZVI, 分别记为 B₀、B_{2.5}、B₅、B_{7.5}、B₁₀ 和 N₀、N_{0.25}、N_{0.5}、N_{0.75}、N₁, 其中 B₀ 和 N₀ 为对照。试验设计如表 2 所示。每处

理 3 个重复,发酵总体积为 700 mL,底物总固体质量分数为 8%,发酵周期 51 d,总固体质量和挥发性固体质量于试验开始前测定,发酵开始后每天测定沼气产量和甲烷含量(体积分数);发酵第 1, 7, 14, 21, 31, 41 和 51 天取样并进行 pH、挥发性脂肪酸(VFAs)和氨态氮质量浓度的测定。为保证底物混合均匀,每天定时手动摇晃所有发酵瓶 1~2 min。

表 2 鸡粪厌氧发酵产气试验设计

Table 2 Experimental design of anaerobic fermentation of chicken manure

处理 Treatments	添加物占鸡粪干物质质量比/% Ratio of additives to dry chicken manure	生物炭添加量/g Amount of biochar	nZVI 添加量/g Amount of nZVI	发酵总体积/mL Total volume	鸡粪干物质质量/g Dry chicken manure
B ₀	0	0	0	700	250
B _{2.5}	2.5	6.250	0	700	250
B ₅	5.0	12.500	0	700	250
B _{7.5}	7.5	18.750	0	700	250
B ₁₀	10.0	25.000	0	700	250
N ₀	0	0	0	700	250
N _{0.25}	0.25	0	0.625	700	250
N _{0.5}	0.50	0	1.250	700	250
N _{0.75}	0.75	0	1.875	700	250
N ₁	1.00	0	2.500	700	250

1.4 测定项目及方法

发酵体系中的总固体(TS)质量:将样品放入(105±5)℃的烘箱中烘至质量恒定,冷却后称质量^[22];挥发性固体(VS)质量:将测定完 TS 质量后的样品在(550±20)℃的马弗炉中烘至质量恒定,冷却后称质量,用 TS 减去冷却后质量即得 VS 质量^[22];pH 值使用便携式 pH 计(PHB-4,杭州)测定;挥发性脂肪酸(VFAs)质量浓度采用分光光度计法测定;氨态氮质量浓度采用溴甲酚绿-甲基红指示剂滴定法测定;沼气产量采用排水集气法测定,甲烷含量(体积分数)使用沼气气体成分分析仪(Gas-board-3200p,武汉)测定;TS 产气效率计算方法:沼气总产气量除以总固体质量;VS 产气效率计算方法:沼气总产气量除以总挥发性固体质量。

1.5 数据处理与分析

用 Excel 2019 和 SPSS 26 软件进行数据处理与分析,用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 吸附剂对鸡粪厌氧发酵累积沼气产量的影响

由图 2-A 可知,添加不同质量分数生物炭后,鸡粪厌氧发酵累积沼气产量随着发酵时间的延长总体不断增加,变化趋势基本相同。试验结束时,添加生物炭各处理的累积沼气产量显著高于对照($P < 0.05$),其中添加 5%生物炭(B₅)处理的累积沼气产量最高,达到 21 532 mL,对照组(B₀)累积沼气产量最低,为 11 101 mL,B_{2.5}、B₅、B_{7.5}、B₁₀ 处理与对照(B₀)相比累积沼气产量分别提高了 64%,94%,89%和 60%。这可能是因为生物炭为富氮底物鸡粪提供了有机碳源,平衡了鸡粪厌氧发酵碳氮比,并且生物炭巨大的比表面积能够吸附微生物及其所需的多种营养物质,为厌氧发酵微生物提供了良好的栖息环境,富集了微生物群落^[17,23-24],从而提高了鸡粪厌氧发酵的沼气产量。

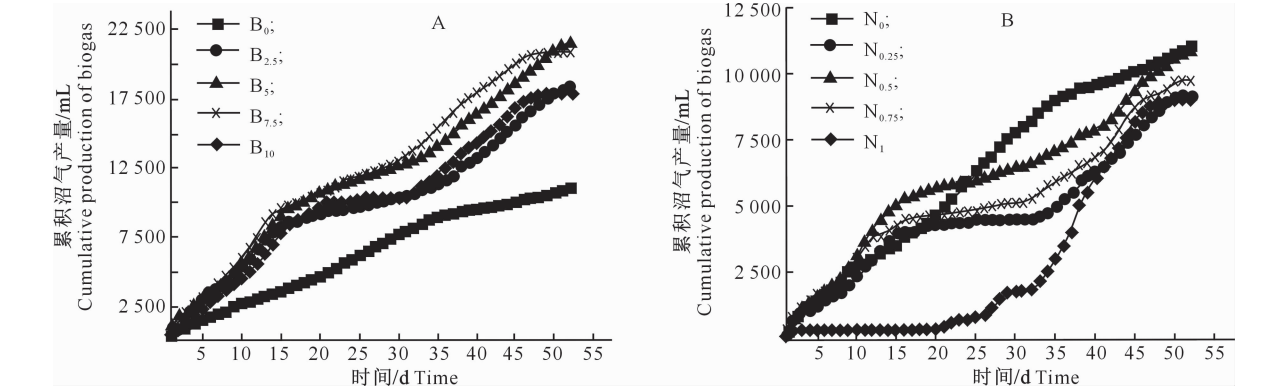


图 2 生物炭(A)及 nZVI (B)对鸡粪厌氧发酵过程中累积沼气产量的影响

Fig. 2 Cumulative production of biogas during anaerobic fermentation with biochar (A) and nZVI (B)

由图 2-B 可知,添加不同质量分数 nZVI 后,鸡粪厌氧发酵累积沼气产量随发酵时间的延长呈增加趋势。试验结束时,N₀、N_{0.25}、N_{0.5}、N_{0.75} 和 N₁ 处理

间累积沼气产量无显著差异($P > 0.05$),其中 N₀ 的累积沼气产量最高,达到 11 101 mL。可知添加 nZ-VI 对鸡粪厌氧发酵产气没有提高作用。

2.2 吸附剂对鸡粪厌氧发酵平均沼气产量及甲烷含量的影响

不同吸附剂对鸡粪发酵过程中平均沼气产量和甲烷含量(体积分数)的影响如图3所示。由图3可知,随着生物炭添加量的增加,平均沼气产量呈单峰变化趋势,添加5%生物炭(B₅)处理的平均沼气产量最高,达到414 mL/d,较对照(B₀)提高了94%,可知在鸡粪厌氧发酵过程中添加5%生物炭的产气效率最高。与对照相比,添加生物炭处理能显著提高甲烷含量($P<0.05$),这可能是由于生物炭中裸露的-OH与发酵所产生的CO₂结合,这使得溶液中部分CO₂转化成了甲烷,从而使气体中甲烷含量

提高^[25-26];此外,由于生物炭具有较大孔隙,有利于甲烷菌富集,促进丙酸盐向乙酸盐转化,间接促进了甲烷的生成^[27]。

添加nZVI后,平均沼气产量随着nZVI添加量的增加呈先降后增再降的变化趋势。与其他处理相比,添加1% nZVI处理显著提高了厌氧发酵甲烷含量,这是因为nZVI快速与混入发酵瓶中的氧气进行了氧化还原反应,降低了氧气分压,使发酵更快速达到厌氧环境,从而更有利于甲烷生成;并且nZVI本身氧化生成的Fe₃O₄能够降低丙酸分解产生的吉布斯自由能,促进同型产乙酸反应降低氢分压,使丙酸更易向乙酸转变,从而提高了甲烷含量^[28]。

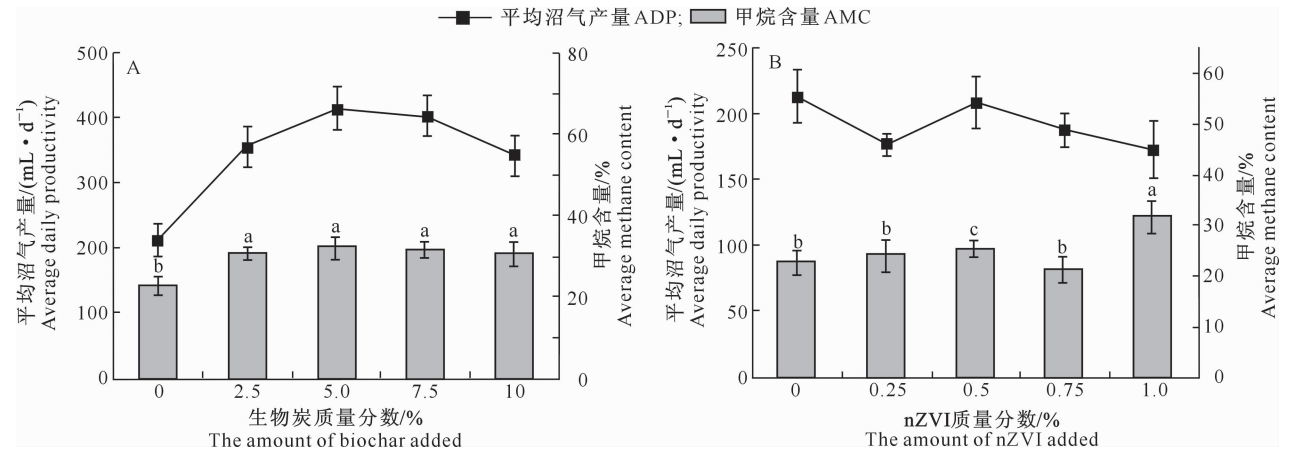


图3 生物炭(A)和nZVI(B)对鸡粪厌氧发酵过程中平均沼气产量和甲烷含量的影响

Fig. 3 Effect of biochar (A) and nZVI (B) on average biogas production and methane content during anaerobic fermentation

2.3 吸附剂对鸡粪厌氧发酵过程中pH值和VFAs的影响

厌氧发酵体系酸碱性受复杂的微生物代谢和生物化学过程的控制,并且受气相与液相间CO₂平

衡、液相内酸碱平衡以及固相与液相间溶解平衡等共同作用的影响^[29]。图4显示了不同质量分数生物炭和nZVI对鸡粪厌氧发酵过程中pH和VFAs质量浓度的影响。

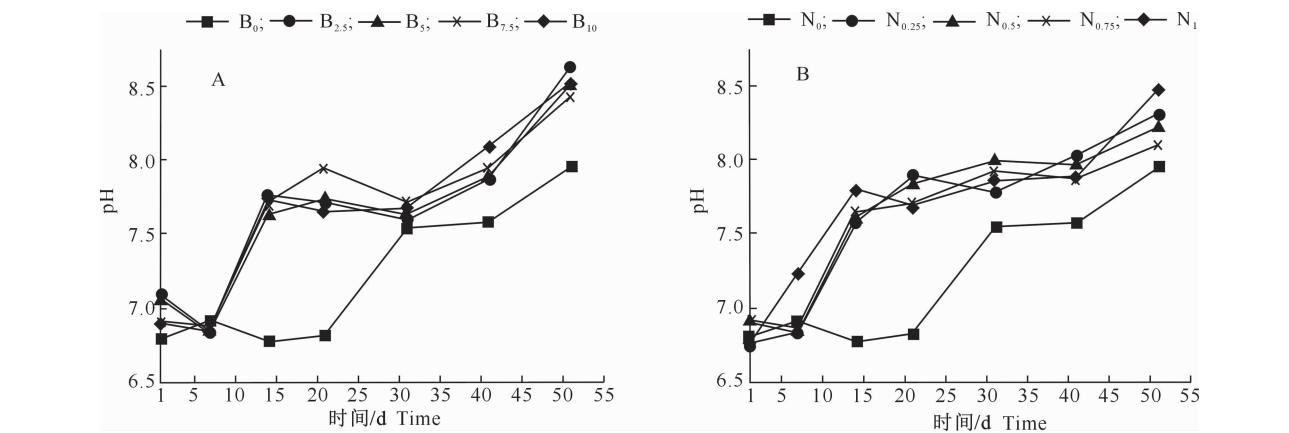


图4 生物炭(A)和nZVI(B)对鸡粪厌氧发酵过程中pH值的影响

Fig. 4 Effect of biochar (A) and nZVI (B) on pH during anaerobic fermentation of chicken manure

图4显示,B_{2.5}、B₅、B_{7.5}和B₁₀处理在厌氧发酵过程中的pH值在6.78~8.64,随着发酵时间的增加,

pH 总体呈上升-下降-上升的趋势。 $N_{0.25}$ 、 $N_{0.5}$ 、 $N_{0.75}$ 和 N_1 处理在厌氧发酵过程中的 pH 值为 6.76~8.48,随着发酵时间增加,pH 总体呈逐渐上升趋势。在发酵初期(1~7 d),各处理的 pH 值均较低,这是因为此时水解酶活性高,提高了发酵系统内 VFAs 质量浓度,导致厌氧发酵溶液内的 pH 值均下降^[30]。随着厌氧发酵的进行(7 d 以后),添加生物炭处理的 pH 值先迅速升高后接着小幅下降最后再次攀升直到 8.0 以上;而添加 nZVI 处理的 pH 值快速上升后逐渐平稳上升到 8.0 以上,且发酵结束时各处理的 pH 值均高于对照,这说明加入吸附剂后提高了体系 pH 值,减少了系统酸化的可能性。一般认为,适宜产甲烷微生物生存的 pH 值为 6.8~7.8,低于 6.5 或高于 8.0 都会对其产生明显的产气抑制^[31],虽然本试验 pH 值高出理论适宜值,但发酵过程中并未出现产气抑制现象,说明 2 种吸附剂平衡了高 pH 的负效应。

在厌氧发酵过程中,发酵微生物对原料进行分解并释放多种有机化合物,其中 VFAs 是厌氧发酵重要的中间产物或最终产物^[32],其浓度高低影响着厌氧发酵过程,是衡量水解酸化和产甲烷过程是否平衡的重要指标^[33]。如图 5 所示,随着发酵时间的延长,添加生物炭和 nZVI 后,发酵过程中 VFAs 质量浓度呈上升-下降-上升-下降的变化趋势。在发酵初期(1~7 d),各处理 VFAs 为升高趋势,除了 $B_{2.5}$ 处理以外,其余处理均在第 7 天时 VFAs 质量浓度达到最大值。7 d 之后,VFAs 质量浓度迅速下降,这表明产甲烷菌开始大量利用积累的 VFAs。在发酵中期(14~31 d),各处理 VFAs 质量浓度总体上升,这是因为随着发酵时间的增加及总固体质量的逐渐减少,发酵微生物不断繁殖使得发酵液中生成大量酸性物质,从而导致 VFAs 质量浓度有所升高^[34]。

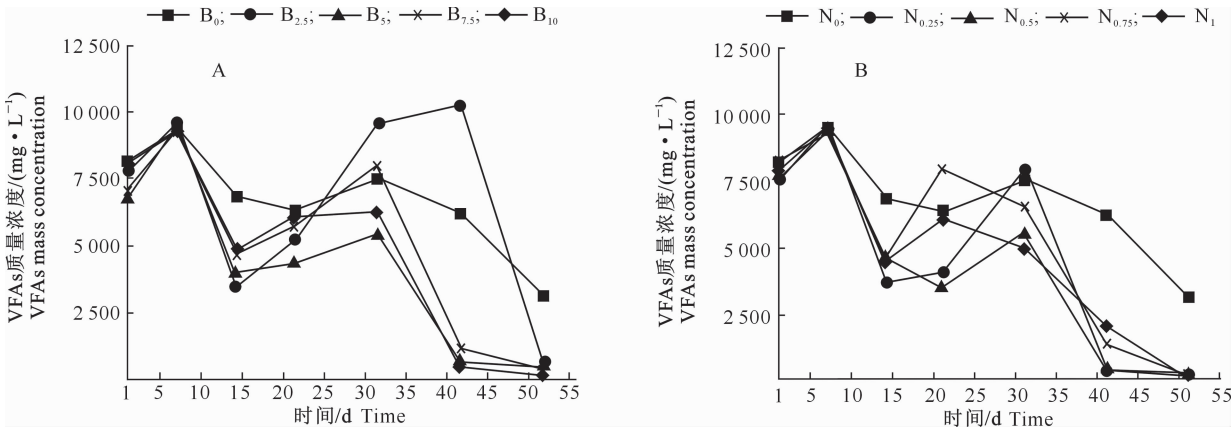


图 5 生物炭(A)和 nZVI(B)对鸡粪厌氧发酵过程中 VFAs 质量浓度的影响

Fig. 5 Effects of Biochar (A) and nZVI (B) on VFAs of anaerobic fermentation of chicken manure

2.4 吸附剂对鸡粪厌氧发酵体系中氨态氮质量浓度的影响

氨态氮主要是由大分子、可降解有机氮在厌氧发酵过程中被微生物降解形成的水解产物,主要以 NH_4^+-N 和游离 NH_3 形式存在,其中对产甲烷起抑制作用的主要是游离 NH_3 ^[35]。有研究表明,氨态氮可以通过抑制参与厌氧发酵的微生物活性,进一步抑制整个厌氧发酵进程^[36]。

由于鸡粪为富氮原料底物,因此鸡粪厌氧发酵过程中氨态氮质量浓度较高,本试验中各处理氨态氮质量浓度为 1 469.89~2 609.60 mg/L。图 6 显示,添加生物炭后,在发酵前期(1~14 d),有机物大量水解导致氨态氮质量浓度快速增加;之后随着时间的推移,大量微生物繁殖并且利用了水解的氨态

氮,因此发酵溶液中氨态氮质量浓度开始下降,20~40 d 后由于厌氧发酵系统运行稳定,对 N 需求降低,氨态氮质量浓度基本保持动态稳定状态;40 d 之后各处理氨态氮质量浓度略有升高。添加 nZVI 之后,在发酵前期(1~14 d)氨态氮质量浓度总体升高,并于第 14 天达到峰值;之后随着时间的推移氨态氮质量浓度总体呈下降趋势。在本试验中,即使生物炭和 nZVI 处理的氨态氮质量浓度分别高达 2 508.80 和 2 609.60 mg/L 时,厌氧发酵产气也并未出现抑制,这可能是因为 2 种吸附剂对溶液中氨态氮等抑制性物质有一定吸附性,因此提升了发酵系统的缓冲能力,保证了厌氧发酵过程的动态平衡^[34]。

2.5 吸附剂对鸡粪厌氧发酵效率的影响

表 3 显示,与对照相比,添加生物炭处理的 TS

和 VS 产气效率均显著增加($P<0.05$),其中 5%生物炭处理(B_5)的 TS 和 VS 产沼气效率最高,分别为 384.50 和 558.98 mL/g。添加 5%生物炭处理组各项产气参数最优,且发酵产气效率最高。与对

照相比,添加 nZVI 的 TS 和 VS 产气效率均降低,表明 nZVI 对于鸡粪厌氧发酵的产气效率没有促进作用。

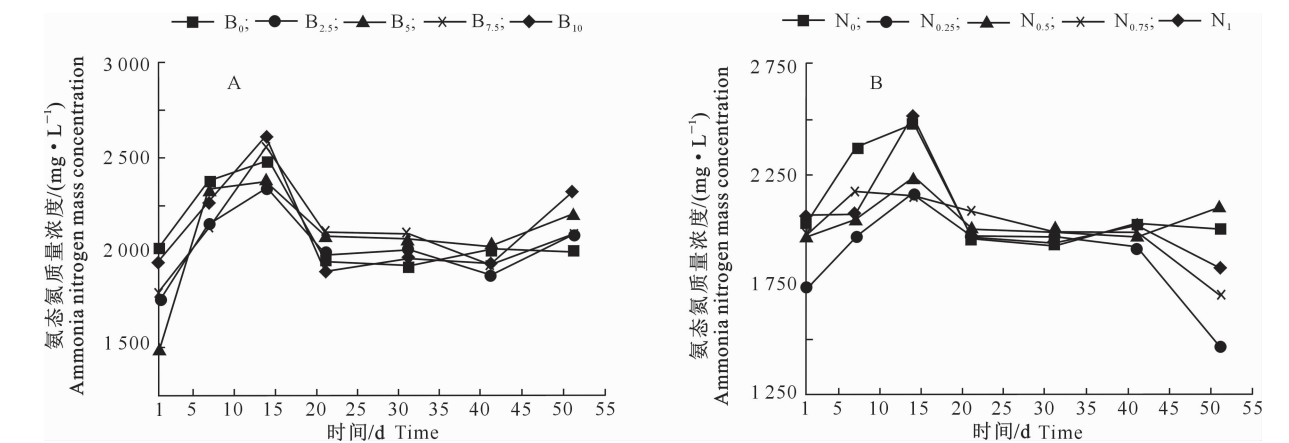


图 6 生物炭(A)和 nZVI(B)对鸡粪厌氧发酵氨态氮质量浓度的影响

Fig. 6 Effects of biochar (A) and nZVI (B) on ammonia nitrogen of anaerobic fermentation of chicken manure

表 3 添加生物炭和 nZVI 之后鸡粪厌氧发酵产气效率的比较

Table 3 Comparison of gas production efficiency of anaerobic fermentation of chicken manure after adding biochar and nZVI

处理 Treatments	TS 产气效率 TS production efficiency	VS 产气效率 VS production efficiency	处理 Treatments	TS 产气效率 TS production efficiency	VS 产气效率 VS production efficiency
B ₀	198.23±13.8 c	288.19±20.1 c	N ₀	198.23±13.8 c	288.19±20.1 c
B _{2.5}	329.52±25.7 b	479.05±37.4 b	N _{0.25}	164.34±9.1 cd	238.91±13.3 cd
B ₅	384.50±29.2 a	558.98±42.5 a	N _{0.5}	193.84±17.1 cd	281.80±24.9 cd
B _{7.5}	373.88±15.0 a	543.54±21.8 a	N _{0.75}	174.73±10.9 cd	254.02±15.8 cd
B ₁₀	318.02±35.3 b	462.33±51.3 b	N ₁	160.96±16.6 d	234.01±24.2 d

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

2.6 生物炭在厌氧发酵体系中基于数学模型的最优添加量

用 SPSS 软件对试验结果进行分析,利用二次曲线模型进行非线性回归,得出累积沼气产量($f(x)$)与生物炭添加量(x)的回归方程为:

$$f(x) = -45.045x^2 + 1\,280.526x + 11\,267.257.$$

从方差分析结果可以看出,方程中的一次项、二次项和常数项均达到显著水平($P<0.05$),模型的 R^2 为 0.996。由回归方程拟合结果得出,当生物炭添加量(x)为 15.32 g 时,累积沼气产量最高可达 21 844.75 mL。

3 结 论

添加生物炭对鸡粪厌氧发酵有促进作用,其不仅能稳定系统环境,而且能提高累积沼气产量,在以 250 g 干鸡粪为发酵原料,发酵总体积 700 mL,发酵温度(35 ± 1) °C 的条件下,当生物炭添加量为 15.32

g 时,累积沼气产量最高为 21 844.75 mL;添加 nZVI 对鸡粪厌氧发酵产沼气影响无促进作用。

[参考文献]

[1] 黄美玲,夏颖,范先鹏,等. 湖北省畜禽养殖污染现状及总量控制 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 209-219.
Huang M L, Xia Y, Fan X P, et al. Pollution status and total amount control of livestock and poultry breeding in Hubei province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2): 209-219.
[2] 王建华,陶君颖,陈璐. 养殖户畜禽废弃物资源化处理方式及影响因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 127-137.
Wang J H, Tao J Y, Chen L. Resource utilization method and influencing factors of farmers' behaviors towards livestock and poultry waste [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(5): 127-137.
[3] 韩俊霞,桂吉生. 鸡场废弃物的科学处理与合理利用 [J]. 畜禽业, 2017(3): 32, 34.

- Han J X, Gui J S. The scientific treatment and rational utilization of chicken farm waste [J]. *Livestock and Poultry Industry*, 2017(3): 32-34.
- [4] 张淑芬. 统筹城乡视角下的农村生态环境建设研究 [J]. *农业工程技术*, 2016, 36(26): 40-43.
- Zhang S F. Research on rural eco-environment construction from the perspective of overall urban and rural development [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2016, 36(26): 40-43.
- [5] 王国强, 路文华, 常 娟, 等. 复合微生物制剂在鸡粪无害化处理中的应用研究 [J]. *中国畜牧杂志*, 2018, 54(2): 113-117.
- Wang G Q, Lu W H, Chang J, et al. Study on compound probiotics application in chicken excreta innocent treatment [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2018, 54(2): 113-117.
- [6] 李玉秀, 高 瑜, 王洪娟. 规模鸡场的环境净化及综合利用 [J]. *农村百事通*, 2013(19): 53-54.
- Li Y X, Gao Y, Wang H J. Environmental purification and comprehensive utilization of large-scale chicken farms [J]. *Agriculture Knowledge*, 2013(19): 53-54.
- [7] 张全国. 沼气技术及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 201.
- Zhang Q G. Biogas technology and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 201.
- [8] Appels L, Degrève J, Bruggen B V D, et al. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(15): 5743-5748.
- [9] 吴浩玮, 孙小洪, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1168-1176.
- Wu H W, Sun X Q, Liang B W, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1168-1176.
- [10] 杜连柱, 杨继东, 张克强, 等. 厌氧消化过程氨抑制研究进展 [J]. *可再生能源*, 2012, 30(4): 75-79.
- Du L Z, Yang J D, Zhang K Q, et al. A review on research of ammonia inhibition in anaerobic digestion [J]. *Renewable Energy Resources*, 2012, 30(4): 75-79.
- [11] Ye C, Cheng J J, Creamer K S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(10): 4044-4064.
- [12] Abouelenien F, Fujiwara W, Namba Y, et al. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6368-6373.
- [13] 田 菲, 邱 凌, 井良霄, 等. 不同外源添加剂对牛粪厌氧发酵的影响 [J]. *西北农业学报*, 2012, 21(7): 190-194.
- Tian F, Qiu L, Jin L X, et al. Influences of different extraneous source supplements on cow dung anaerobic fermentation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(7): 190-194.
- [14] 何荣玉, 闫志英, 刘晓风, 等. 秸秆发酵沼气增产研究 [J]. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(4): 583-585.
- He R Y, Yan Z Y, Liu X F, et al. Enhancement of biogas production by dry fermentation with straws [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2007, 13(4): 583-585.
- [15] 杜婷婷, 云斯宁, 黄欣磊, 等. 功能复合添加剂对牛粪厌氧发酵的影响 [J]. *可再生能源*, 2016, 34(6): 936-942.
- Du T T, Yun S N, Huang X L, et al. Effect of the functional composite additives of dairy manure on anaerobic fermentation [J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(6): 936-942.
- [16] 谢祖彬, 刘 琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向 [J]. *土壤*, 2011, 43(6): 857-861.
- Xie Z B, Liu Q, Xu Y P, et al. Advances and perspectives of biochar research [J]. *Soils*, 2011, 43(6): 857-861.
- [17] Pietikäinen J, Kiikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus [J]. *Oikos*, 2003, 89(2): 231-242.
- [18] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1173.
- [19] 冯 晶, 荆 勇, 赵立欣, 等. 生物炭强化有机废弃物厌氧发酵技术研究 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(12): 256-264.
- Feng J, Jin Y, Zhao L X, et al. Research progress on biochar enhanced anaerobic fermentation technology of organic wastes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(12): 256-264.
- [20] 李钰婷, 张亚雷, 代朝猛, 等. 纳米零价铁颗粒去除水中重金属的研究进展 [J]. *环境化学*, 2012, 31(9): 1349-1354.
- Li Y T, Zhang Y L, Dai C M, et al. The advance on removal of heavy metals in water by nanoscale zero-valent iron [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(9): 1349-1354.
- [21] He C, He P, Yang H, et al. Impact of zero-valent iron nanoparticles on the activity of anaerobic granular sludge: From macroscopic to microcosmic investigation [J]. *Water Research*, 2017, 127: 32-40.
- [22] Mary A H. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edition [M]. Washington DC: American Public Health Association, 2005.
- [23] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents [J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 577.
- [24] Linville J L, Shen Y, Leon I D, et al. In-situ biogas upgrading during anaerobic digestion of food waste amended with walnut shell biochar at bench scale [J]. *Waste Management & Research*, 2017, 35(6): 669-679.
- [25] Mao J-D, Johnson R L, Lehmann J, et al. Abundant and stable char residues in soils: implications for soil fertility and carbon sequestration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(17): 9571-9576.
- [26] 郑 戈, 张全国. 沼气提纯生物天然气技术研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 1-8.

- Zheng G,Zhang Q G. Review on biogas upgrading technologies for producing biomethane [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(17):1-8.
- [27] Yang Y,Zhang Y,Li Z,et al. Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition [J]. Journal of Cleaner Production,2017,149:1101-1108.
- [28] Zhao Q B,Yu H Q. Fermentative H₂ production in an upflow anaerobic sludge blanket reactor at various pH values [J]. Bioresource Technology,2008,99(5):1353-1358.
- [29] 买文宁,杨 明,曾令斌. 抗生素废水处理工程的设计与运行 [J]. 给水排水,2002,28(4):42-45.
- Mai W N,Yang M,Zeng L B. Design and operation of antibiotics wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering,2002,28(4):42-45.
- [30] Jiang J,Zhang Y,Li K,et al. Volatile fatty acids production from food waste: Effects of pH, temperature, and organic loading rate [J]. Bioresource Technology,2013,143:525-530.
- [31] 李 杰,李文哲,许洪伟,等. 牛粪湿法厌氧消化规律及载体影响的研究 [J]. 农业工程学报,2007,23(3):186-191.
- Li J,Li W Z,Xu H W,et al. Rules of anaerobic digestion of cow manure by wet method and the effect of carriers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-ing,2007,23(3):186-191.
- [32] Weiland P. Biogas production: current state and perspectives [J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2010,85(4):849-860.
- [33] 李 东,孙永明,袁振宏. 固体浓度对水分选有机垃圾中温厌氧消化启动的影响 [J]. 过程工程学报,2009,9(5):987-992.
- Li D,Sun Y M,Yuan Z H. Rules of anaerobic digestion of cow manure by wet method and the effect of carriers [J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2009,9(5):987-992.
- [34] 张 彤,李 伟,李文静,等. 粪秆结构配比厌氧发酵中 pH、VFA 与产气效果的关系 [J]. 农业环境科学学报,2010,29(12):2425-2430.
- Zhang T,Li W,Li W J,et al. The relationship among pH, VFA and biogas production in anaerobic fermentation of mixed manure and straw with different ratios [J]. Journal of Agro-Environment Science,2010,29(12):2425-2430.
- [35] Chen Y,Cheng J J,Creamer K S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review [J]. Bioresource Technology,2008,99(10):4044-4064.
- [36] Bonmatí A,Flotats X,Mateu L,et al. Study of thermal hydrolysis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry [J]. Bioresour Technol,2001,44(4):109.

(上接第 64 页)

- [31] Six J,Elliott E T,Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems [J]. Soil Science Society American Journal,1999,63:1350-1358.
- [32] Dungait J A J,Hopkins D W,Gregory A S,et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance [J]. Global Change Biology,2012,18(6):1781-1796.
- [33] 石 玲,戴万宏. 宣城红壤微生物量碳含量及其与土壤有机碳矿化的关系 [J]. 土壤通报,2009,40(3):547-551.
- Shi L,Dai W H. Microbial biomass carbon content and its relations to soil organic carbon mineralization in red soils in Xuancheng, Anhui Province [J]. Chinese Journal of Soil Science,2009,40(3):547-551.
- [34] Wu L,Zhang W,Wei W,et al. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization [J]. Soil Biology & Biochemistry,2019,135:383-391.
- [35] 李 晶,刘玉荣,贺纪正,等. 土壤微生物对环境胁迫的响应机制 [J]. 环境科学学报,2013,33(4):959-967.
- Li J,Liu Y R,He J Z,et al. Insights into the responses of soil microbial community to the environmental disturbances [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(4):959-967.