

城市果蔬垃圾处理现状及再利用对策

张军文^{1,2}, 沈建^{1,2}

(1. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要 介绍了果蔬垃圾的特性, 阐述了城市果蔬垃圾的处理方式, 包括焚烧、好氧堆肥、卫生填埋、厌氧消化、固体发酵、生产饲料蛋白。鉴于几种果蔬垃圾处理方式的优点和不足, 单一的堆肥化处理、厌氧发酵或固体发酵生产饲料蛋白处理不符合城市果蔬垃圾处理需要的现实情况, 设计了一套以厌氧发酵、好氧堆肥和固体发酵生产饲料蛋白技术处理果蔬垃圾系统, 该系统在实际使用过程中对果蔬垃圾减量化等作用显著。

关键词 果蔬垃圾; 资源化; 减量化; 蛋白饲料

中图分类号 X705 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)36-0041-03

Present Situation of Waste Treatment of Fruits and Vegetables in Cities and Countermeasures for Reuse

ZHANG Jun-wen^{1,2}, SHEN Jian^{1,2} (1. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai 200092)

Abstract The characteristics of fruits and vegetables garbage were introduced. The treatment methods of urban fruits and vegetables garbage were described, including incineration, aerobic composting, sanitary landfill, anaerobic digestion, solid fermentation production of feed protein. In view of advantages and disadvantages of some fruit and vegetable waste disposal methods, single composting treatment, anaerobic fermentation and solid fermentation production of feed protein processing did not accord with the reality of city garbage disposal to fruits and vegetables, feeding protein production technology of fruit and vegetable waste treatment system by anaerobic fermentation and aerobic composting and solid fermentation were introduced. The system has a significant effect on reducing fruits and vegetables waste in practical use.

Key words Fruit and vegetable garbage; Resource; Reduction; Protein feed

近年来, 随着农村产业结构的不断优化和调整, 我国果蔬产业发展迅速, 果蔬作物的种植在农业中所占比例也逐年扩大。2007年全国蔬菜播种面积占农作物总播种面积的11.3%, 达1.73亿hm², 总产量约5.65亿t, 人均占有量420余kg^[1]。据联合国粮农组织(FAO)统计, 2007年我国蔬菜播种面积和产量分别占世界的43%、49%, 均居世界第一^[2]。2013年全国果园面积为1280万hm², 同比增长4.1%, 产量为1.50亿t, 同比增长3.7%^[3]。果蔬加工中会产生很多副产物, 果蔬产量的庞大也就决定了加工副产物的增多^[3]。据统计, 我国每年有1亿余t的水果和蔬菜废弃物被丢弃^[4]。这种状况每年都会继续恶化, 废弃的果蔬垃圾均未得到很好的利用就被直接随意丢弃或者填埋, 给人们的生活环境带来了风险^[5]。因此, 应对果蔬垃圾的处理方式引起足够的重视。国外发达国家城市果蔬垃圾收集、运输和处理技术经过多年的发展和沉淀, 已经走向成熟阶段。在收集方面几乎都采用分类收集; 在运输方面都是密封压缩运输; 在

处理方面采用厌氧发酵技术、好氧堆肥、好氧-厌氧联合处理法^[6-7]。

解决果蔬垃圾的根本出路在于按照“减量化、无害化、资源化”的原则^[8], 目前国内城市几乎都将果蔬垃圾当作一般生活垃圾进行处理, 处置方法有焚烧、好氧堆肥和填埋等^[9]。笔者分析了果蔬垃圾的特性, 总结了国内对果蔬垃圾的处理方式, 以期对果蔬废弃物的资源化和减量化利用提供借鉴。

1 果蔬垃圾的特性

蔬菜废弃物的含水率通常在90%左右, 以干基计算含氮量为3%~4%, 总磷含量为0.3%~0.5%, 钾含量为1.8%~5.3%, 其营养成分与常用的天然有机肥料相当^[10]。果蔬废弃物的固体含量为8%~19%, 总挥发固体的含量占总固体的80%以上, 其中包括75%的糖类和半纤维素, 9%的纤维素及5%的木质素^[11]; 正常种植的蔬菜废弃物除了部分发生病虫害的蔬菜组织之外, 还含其他有毒有害物质^[12]。不同果蔬垃圾主要化学成分含量见表1。

表1 不同果蔬垃圾主要化学成分含量比较

Table 1 Comparison of the contents of main chemical components in different fruits and vegetables

g/kg

果蔬名称 Name of fruit and vegetable	总固体 TS	挥发性固体 VS	总化学需氧量 TCOD	磷化学需氧量 PCOD	总悬浮性固体 MLSS	总凯氏氮 TKN	纤维素 Cellulose	参考文献 Reference
马铃薯 Potato	190.00	180.50	—	—	—	2.85	—	[13]
甜菜 Beet	110.00	92.40	—	—	—	3.30	—	[13]
苹果 Apple	384.00	365.00	370.00	244.20	305.00	—	—	[14]
生菜 Lettuce	79.40	72.10	97.80	39.30	39.00	—	13.50	[14]
豌豆和胡萝卜混合物 A mixture of peas and carrots	179.40	171.00	185.00	123.90	145.00	2.00	16.00	[14]

基金项目 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所重点实验室项目(2017HX006)。

作者简介 张军文(1983—), 男, 安徽合肥人, 助理研究员, 硕士, 从事水产加工和厨余垃圾减量化研究。

收稿日期 2017-10-18

果蔬垃圾的产地尤其集中在各类果园、蔬菜种植基地和一些菜市场, 因此果蔬垃圾不易与生活垃圾等城市固体垃圾混合, 可实现单独收集处理^[15]。但是目前国内很多城市都是将果蔬垃圾和一般生活垃圾进行混合处理, 不仅成本高

昂,且在某种程度上是对自然资源的一种浪费。因此,需要针对果蔬垃圾的特性探索其污染的解决方案,以更低廉的成本达到较好的处理效果。

2 城市果蔬垃圾的处理方式

2.1 常用处置方法

2.1.1 焚烧。焚烧是一种对垃圾进行高温热化学处理的技术,将垃圾作为固体燃料送入炉膛内燃烧,在 800 ~ 1 000 °C 的高温条件下,垃圾中的可燃组分与氧气进行剧烈化学反应,释放出热量并转化为高温燃烧和少量性质稳定的固定残渣^[16]。热量可回收利用发电,实现垃圾资源化,性质稳定的残渣可直接填埋进行处理^[9]。经过焚烧处理,垃圾中的细菌、病菌等有害微生物能被彻底消灭,各种恶臭气体被高温分解,烟气中的有害气体处理达标后排放^[17]。目前很多国家都采用这种方法来处理果蔬垃圾等废弃物。

焚烧处理垃圾有减量化、彻底化等优点,但是易产生二次污染^[15]。在焚烧过程中会产生粒状污染物,硫化物、NO_x等致霾气体和毒性有机氯化物,如二噁英和多氯代二苯并呋喃^[18-19]。除此之外,焚烧处理废弃物不仅投资大,而且运行费用高,因此很难推广实行。近年来,我国的垃圾焚烧已经得到很大程度的发展,许多城市已经开始用焚烧来处理垃圾,但由于焚烧不是资源化的方法,因此只有对没有回收利用价值、可以回收具备热值的废物进行焚烧比较合理^[20]。

2.1.2 好氧堆肥。好氧堆肥是将用于堆肥的填充物料与有机物料按一定比例混合,在适宜的条件下使微生物(主要有细菌、真菌、放线菌、纤维素分解菌和木质分解菌等)繁殖并使有机物质进行降解,同时产生高温^[21],杀死其中的有害物质的稳态有机过程。好氧堆肥堆体温度高,一般在 50 ~ 65 °C,故亦称为高温堆肥^[22]。好氧堆肥产生的高温用来杀死其中的病原体,对于处理果蔬废弃物非常便捷。

同时由于果蔬垃圾含水量高达 90% 左右,若采取单一果蔬垃圾进行好氧堆肥处理,易产生大量污水,从而造成堆肥体塌陷,物料黏连,容易导致厌氧状态^[23]。因此,添加相应的膨松性填充物质有助于调节堆体的含水量和孔隙度,从而增加好氧反应的氧气含量^[23]。好氧堆肥还需要不断地通气和翻堆,除此之外还应在初始物料中混入已经腐熟的堆肥产品作为微生物接种剂,以加速高温启动阶段^[10]。

由此可见,对果蔬垃圾进行好氧堆肥处理是处理有机废弃物的有效方法,所要求的设备也较简单,经堆肥产生的高温(50 ~ 65 °C)可有效去除病虫害,产品是非常好的有机肥料。缺点就是单一的果蔬垃圾含水率较高(>90%),须添加相应的膨松剂填充物来调节含水率,导致生产成本增加,堆肥效率降低。堆肥处理难以解决不易腐烂的无机物和有机物,垃圾中的金属、玻璃、石块、塑料等废弃物难以被微生物降解,这些垃圾必须分捡出来进行处理,因此减量、减容及无害化程度不高^[24]。堆肥周期长,卫生条件差;堆肥处理后产生的肥料肥效低、成本高,与化肥比,销售困难、经济效益差;许多有毒、有害物质会进入堆肥,农田长期大量使用堆肥,可能会造成潜在污染^[25]。

2.1.3 卫生填埋。卫生填埋是一种应用广泛的垃圾处理方式,即选定一定的场所,填埋一定厚度的废弃物后,覆盖一层材料使其经历一段时间的物化和生物作用,最终使有机物分解,以达到无害化目的^[26]。

卫生填埋是所有垃圾处理工艺剩余物的最终处理方式,也是目前我国现阶段主要的垃圾处理方式,其工艺在城市生活垃圾处理上必不可少也至关重要^[27],其处理量大,运行技术也相对较成熟,但这并非是一种无害的垃圾处理方式。这种处理方法存在着很多问题,如很多土地资源被占用;垃圾渗滤液难收集、难处理,会对土壤、地下水和周边环境造成二次环境污染。

2.2 其他处理方法

2.2.1 厌氧消化。厌氧消化是指在无氧或缺氧条件下,通过专性厌氧及兼性厌氧微生物分解生物质中的有机成分,将有机物转化成稳定无机物的过程,与此同时合成微生物细胞物质^[28]。其最大的优点之一就是能回收沼气,减少温室气体的排放。对含水率高、易降解的果蔬垃圾而言,其符合一般厌氧处理的固体含量要求(10%左右)^[29]。果蔬垃圾被消化后产生的残渣数量少,减量化效果明显,使其后续处理成本也相对降低,还能得到高质量的有机肥料和土壤改良剂^[15]。此外,与好氧堆肥相比,厌氧消化过程几乎不需要消耗氧气便可以降低动力消耗,成本也相应地降低^[15]。厌氧消化技术具有很大的优越性,可有效实现垃圾处理的无害化、减量化和资源化^[30],因此,厌氧消化处理可能会成为果蔬垃圾处理的理想途径。

2.2.2 固体发酵生产饲料蛋白。随着我国畜牧业的快速发展,家畜必需的蛋白饲料越来越匮乏,据 FAO 统计,20 世纪末,全球蛋白质短缺量约为 2 500 万 t^[31]。果蔬垃圾经微生物固体发酵产生的微生物蛋白饲料营养丰富,生物效益高,是动物体所必需的各种氨基酸,特别是植物饲料中缺乏的赖氨酸、蛋氨酸和色氨酸含量较高,生物学价值大大优于植物蛋白饲料^[32]。

张继等^[33]通过平板点种刺激圈及混合菌种发酵试验,利用高山娃娃菜废弃物和麸皮(比例为 85:15),于 27 °C 下发酵 96 h,产物蛋白质含量高达 15.97%,营养成分平衡后,易作为饲料^[34]。徐抗震等^[35]通过单因素试验,获得了苹果渣混合菌发酵生产饲料蛋白的适宜条件,即接种比 4.5:3:1,接种量 10%,发酵温度 30 ~ 34 °C,发酵时间 96 h,自然 pH,尿素与无机盐分 2 次添加,不灭菌。发酵产物中的粗蛋白含量由 16.28% 提高到 28.43%,真蛋白含量由 10.02% 提高到 26.59%,而粗纤维则由 16.68% 降低到 10.84%^[36]。利用果蔬垃圾发酵生产饲料蛋白可为处理城市废弃物提供新的处理思路和发展方向,具有长远的开发利用价值。

3 案例分析

果蔬垃圾的处理技术各有特点,如厌氧发酵工艺最大优点的是能产生沼气,但与此同时需要大量投资作保证,也存在最终废水和废渣的再处理问题;好氧堆肥需要降低其含水率,添加必要的膨松性填充物质以增加孔隙率,同时也需要

人工进行不断翻堆。厌氧发酵和好氧堆肥都需要一定的设施建设和人力成本,对于具体的操作和管理有相对应的技术要求,但我国目前尚缺乏针对果蔬废弃物处理的专门技术规范和要求,而且对于此类环境效益和社会效益大于经济效益的工程设施来说,要实现大规模的推广应用还需要政府的扶持和相应的资助^[5]。在选择处理果蔬废弃物的方式时,要根据当地的实际情况和需求选择适合的处理技术,综合考虑各方面因素才能够有效实现消除污染和节约资源^[5]。鉴于上述几种果蔬垃圾处理方式都有各自的优点和不足,单一的堆肥化处理、厌氧发酵或固体发酵生产饲料蛋白处理都不符合城市果蔬垃圾处理的需求。笔者采用厌氧发酵、好氧堆肥和固体发酵生产饲料蛋白技术处理果蔬垃圾,具体方案流程图 1 所示。

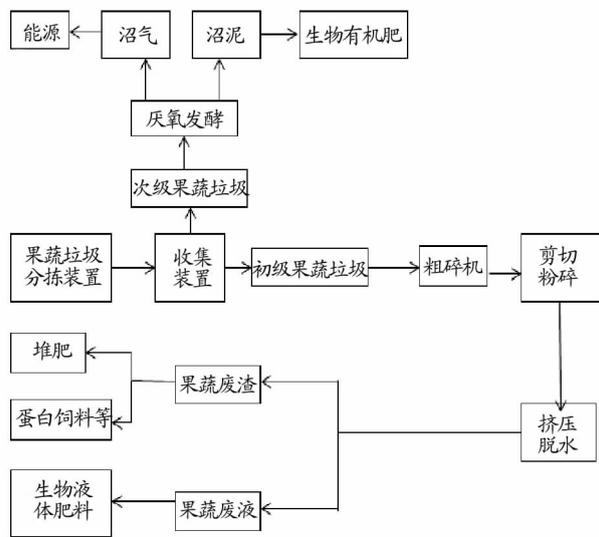


图 1 果蔬垃圾处理流程

Fig. 1 Treatment process of fruits and vegetables waste

先对果蔬垃圾进行简单的分拣,对初级废弃物进行粉碎和脱水处理,加工成脱水果蔬废渣和果蔬废液。对于初级果蔬垃圾生产的果蔬废渣可以经过简单高温好氧发酵处理后,送生物厂堆肥处理;也可以当作产品卖给蚯蚓饲养厂家,蚯蚓无害化处理果蔬垃圾产生的蚯蚓粪作为一种高效有机肥料,营养成分全面,并且有利于土壤中的有益微生物繁殖生长,对于防止土壤板结,提高土壤的保肥保水能力,提高作物的抗病能力和营养利用率具有重要作用。更重要的是,施用后能提高果品、蔬菜的品质和口感。果蔬废液可以用于农林浇灌,也可以经过生物肥厂生产液体生物肥。对于次级果蔬垃圾进行厌氧发酵,产生的沼气可以用作能源,沼泥亦可以用作生物有机肥料。

对于以果蔬种植地和果蔬垃圾较多的菜市场 and 大型超市,采用上述工艺,1.0 t 果蔬垃圾(含水率 90% 左右)处理后变成 0.2 t 左右一级堆肥(含水率 60%),这就大大减轻了后续处理(转运、处置)压力与费用。设计处理能力 50~80 t/d (8 h 计),产生的堆肥可在果蔬种植地循环使用,沼气可以发电用于提供机械脱水动力。该方法经实际使用后,客户反映

效果良好。

4 结语

在国内外低碳减排的生态发展需求下,寻求低投入、低能耗、无害化、高收益、高效能的果蔬垃圾资源化利用技术,是实现低碳经济和废弃物资源化循环利用的发展方向。果蔬垃圾的有效资源化循环利用既消除了农业污染,又保护了环境,实现了“变废为宝”^[5]。我国城市果蔬垃圾产生量巨大,随着人们生活水平的提高和农业结构的调整,果蔬垃圾产量还将继续增大,笔者提出了适合我国城市果蔬垃圾处理利用方案,可为城市果蔬垃圾处理提供思路和参考。

参考文献

- [1] 毛菁菁. 蔬菜废物中温单相厌氧消化性能研究[D]. 北京:北京化工大学,2010.
- [2] 农业部办公厅. 农业部茶、蔬菜、梨重点区域规划(2009-2015)[EB/OL]. (2009-04-27)[2017-09-15]. www.moa.gov.cn/zwlm/tzgg/tz/200905/20090520_1276683.htm.
- [3] 杨文晶,许泰百,冯叙桥,等. 果蔬加工副产物的利用现状及发展趋势研究进展[J]. 食品工业科技,2015,36(14):379-383.
- [4] 刘广民,董永亮,薛建良,等. 果蔬废弃物厌氧消化特征及固体减量研究[J]. 环境科学与技术,2009,32(3):27-30.
- [5] 杨鹏,乔汪砚,赵润,等. 果蔬废弃物处理技术研究进展[J]. 农学学报,2012(2):26-30.
- [6] WEILAND P. One-and two-step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues[J]. Water science and technology,1993,27(2):145-151.
- [7] CECCHI F, VALLINI G, MATAALVAREZ J. Anaerobic digestion and composting in an integrated strategy for managing vegetable residues from agro-industries or sorted organic fraction of municipal solid waste[J]. Water science and technology,1990,22(9):31-44.
- [8] 陈天安. 基于绿色农业背景下的城市果蔬垃圾处理利用模式思考:城市果蔬垃圾资源化循环利用对策分析[J]. 安徽农学通报,2014,20(6):97-99.
- [9] 庞建峰. 我国城市生活垃圾的处理与管理对策探讨[J]. 环境研究与监测,2007,20(4):21-23.
- [10] 黄鼎曦,陆文静,王洪涛. 农业蔬菜废物处理办法研究进展和探讨[J]. 环境污染治理技术与设备,2002,3(11):38-42.
- [11] 傅云龙,丘锦荣,彭海君,等. 果蔬废弃物厌氧消化技术研究进展[J]. 广东农业科学,2013(20):185-187.
- [12] 宋楠. 蔬菜废弃物简易沤制效果及小白菜肥效研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2014.
- [13] PARAWIRA W, MURTO M, ZVAUYA R, et al. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves[J]. Renewable energy,2004,29(11):1811-1823.
- [14] RAYNAL J, DELGENÈS J P, MOLETTA R. Two-phase anaerobic digestion of solid wastes by a multiple liquefaction reactors process[J]. Biore-source technology,1998,65(1/2):97-103.
- [15] 董永亮. 果蔬废弃物厌氧处理产能实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [16] 刘静,王慧婷,李莉,等. 广州白云国际机场航空垃圾焚烧处理方案探讨[J]. 环境工程,2012,30(S2):293-295.
- [17] 吴克明,陈新丽. 城市生活垃圾处理现状及发展趋势[J]. 安全与环境学报,2004,4(S1):79-82.
- [18] 毕德纯,任于翎,杨翔华,等. 城市垃圾处理技术分析与发展[J]. 辽宁城乡环境科技,2004,24(2):55-56.
- [19] 屈志云,王敬民,刘涛,等. 我国城市生活垃圾处理技术方式的选择[J]. 环境卫生工程,2006,14(3):58-60.
- [20] 陈毅. 我国城市生活垃圾处置现状及能源再利用对策[J]. 资源节约与环保,2015(1):20.
- [21] 祖丽胡玛尔·赛买提. 苦豆子沤肥养分含量分析及其生物有效性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [22] 李艳霞,王敏健,王菊思,等. 固体废弃物的堆肥化处理技术[J]. 环境污染治理技术与设备,2000,1(4):39-45.
- [23] 徐瑞,于安芬,李瑞琴,等. 蔬菜废弃物堆肥研究进展[J]. 甘肃农业科技,2014(7):44-47.
- [24] 王海英. 城市垃圾处理及综合利用问题研究[J]. 企业导报,2012(18):261.

- ods[J]. Atmospheric research,2011,102(1/2):30-48.
- [44] CORNELL S E, JICKELLS T D, CAPE J N, et al. Organic nitrogen deposition on land and coastal environments: A review of methods and data[J]. Atmospheric environment, 2003, 37(16): 2173-2191.
- [45] SOLOMON C M, COLLIER J L, BERG G M, et al. Role of urea in microbial metabolism in aquatic systems: A biochemical and molecular review[J]. Aquatic microbial ecology, 2010, 59(1): 67-88.
- [46] CRANDALL J B, TEECE M A. Urea is a dynamic pool of bioavailable nitrogen in coral reefs[J]. Coral reefs, 2012, 31(1): 207-214.
- [47] THERKILDSEN M, LOMSTEIN B. Seasonal variation in sediment urea turnover in a shallow estuary[J]. Marine ecology progress, 1994, 111(1): 77-82.
- [48] LOMSTEIN B, BLACKBURN T H, HENRIKSEN K. Aspects of nitrogen and carbon cycling in the northern Bering Shelf sediment. I. The significance of urea turnover in the mineralization of NH_4^+ [J]. Marine ecology progress, 1989, 57(3): 237-247.
- [49] EPPLEY R W, RENGGER E H, VENRICK E L, et al. A study of plankton dynamics and nutrient cycling in the central gyre of the North Pacific Ocean[J]. Limnology & oceanography, 1973, 18(4): 534-551.
- [50] CONOVER R J, GUSTAVSON K R. Sources of urea in arctic seas: Zooplankton metabolism[J]. Marine ecology progress, 1999, 179(3): 41-54.
- [51] WALSH P J, GROSELL M, GOSS G G, et al. Physiological and molecular characterization of urea transport by the gills of the Lake Magadi tilapia (*Alcolapia grahami*) [J]. Journal of experimental biology, 2001, 204(3): 509-520.
- [52] GOMA R H, AIZAKI M, FUKUSHIMA T, et al. Significance of zooplankton grazing activity as a source of dissolved organic nitrogen, urea and dissolved free amino acids in a eutrophic shallow lake: Experiments using outdoor continuous flow pond systems[J]. Japanese journal of limnology, 1996, 57(1): 1-13.
- [53] RODELA T M, ESBAUGH A J, MCDONALD M D, et al. Evidence for transcriptional regulation of the urea transporter in the gill of the Gulf toadfish, *Opsanus beta* [J]. Comparative biochemistry & physiology part B, 2011, 160(2): 72-80.
- [54] HIRST A G, LILLEY M K S, GLAZIER D S, et al. Ontogenetic body-mass scaling of nitrogen excretion relates to body surface area in diverse pelagic invertebrates[J]. Limnology and oceanography, 2017, 62(1): 311-319.
- [55] TWOMEY L, PIEHLER M, PAERL H. Phytoplankton uptake of ammonium, nitrate and urea in the Neuse River Estuary, NC, USA [J]. Hydrobiologia, 2005, 533(1/2/3): 123-134.
- [56] 胡章喜, 徐宁, 段舜山, 等. 尿素对中国近海 3 种典型赤潮藻生长的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(6): 1265-1270.
- [57] GLIBERT P M, TERLIZZI D E. Cooccurrence of elevated urea levels and dinoflagellate blooms in temperate estuarine aquaculture ponds [J]. Applied & environmental microbiology, 1999, 65: 5594-5596.
- [58] DONALD D B, BOGARD M J, FINLAY K, et al. Comparative effects of urea, ammonium, and nitrate on phytoplankton abundance, community composition, and toxicity in hypertrophic freshwaters [J]. Limnology and oceanography, 2011, 56(6): 2161-2175.
- [59] 杨柳, 章铭, 刘正文. 太湖春季浮游植物群落对不同形态氮的吸收[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 605-611.
- [60] SOLOMON C M, ALEXANDER J A, GLIBERT P M. Measuring urease activity in aquatic environmental samples [J]. Limnology & oceanography methods, 2007, 5(9): 280-288.
- [61] SATOH Y, OKINO T, AOYAMA K. Correlation between urea and other chemical and biological parameters in waters of Lake Suwa, Japan [J]. Internationale revue der gesamten hydrobiologie und hydrographie, 1980, 65(3): 445-454.
- [62] JØRGENSEN N O G. Uptake of urea by estuarine bacteria [J]. Aquatic microbial ecology, 2006, 42(3): 227-242.
- [63] BOER W D, LAANBROEK H J. Ureolytic nitrification at low pH by *Nitrospira*, spec [J]. Archives of microbiology, 1989, 152(2): 178-181.
- [64] BURTON S A, PROSSER J I. Autotrophic ammonia oxidation at low pH through urea hydrolysis [J]. Applied and environmental microbiology, 2001, 67(7): 2952-2957.
- [65] MARSH K L, SIMS G K, MULVANEY R L. Availability of urea to autotrophic ammonia-oxidizing bacteria as related to the fate of ^{14}C - and ^{15}N -labeled urea added to soil [J]. Biology and fertility of soils, 2005, 42(2): 137-145.
- [66] KOPER T E, EL-SHEIKH A F, NORTON J M, et al. Urease-encoding genes in ammonia-oxidizing bacteria [J]. Applied and environmental microbiology, 2004, 70(4): 2342-2348.
- [67] VITÒRIA L, OTERO N, SOLER A, et al. Fertilizer characterization: Isotopic data (N , S , O , C , and Sr) [J]. Environmental science & technology, 2004, 38(12): 3254-3262.
- [68] CHOI W J, ARSHAD M A, CHANG S X, et al. Grain ^{15}N of crops applied with organic and chemical fertilizers in a four-year rotation [J]. Plant and soil, 2006, 284(1): 165-174.
- [69] 宁加佳, 刘辉, 古滨河, 等. 流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1502-1509.
- [70] LEHMANN M F, BERNASCONI S M, MCKENZIE J A, et al. Seasonal Variation of the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of particulate and dissolved carbon and nitrogen in Lake Lugano: Constraints on biogeochemical cycling in a eutrophic lake [J]. Limnology & oceanography, 2004, 49(2): 415-429.
- [71] XU J, LI S, XIE P. Differences in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of particulate organic matter from the deep oligotrophic Lake Fuxian connected with the shallow eutrophic Lake Xingyun, People's Republic of China [J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2005, 74(2): 281-285.
- [72] TORRES I, INGLETT P, BRENNER M, et al. Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) values of sediment organic matter in subtropical lakes of different trophic status [J]. Journal of paleolimnology, 2012, 47(4): 693-706.
- [73] MAO Z G, GU X H, ZENG Q F, et al. Seasonal and spatial variations of the food web structure in a shallow eutrophic lake assessed by stable isotope analysis [J]. Fisheries science, 2014, 80(5): 1045-1056.
- [74] LEE J, KIM J, OWEN J S, et al. Variation in carbon and nitrogen stable isotopes in POM and zooplankton in a deep reservoir and relationship to hydrological characteristics [J]. Journal of freshwater ecology, 2013, 28(1): 47-62.
- [75] KUMAR S, FINLAY J C, STERNER R W. Isotopic composition of nitrogen in suspended particulate matter of Lake Superior: Implications for nutrient cycling and organic matter transformation [J]. Biogeochemistry, 2011, 103(1): 1-14.
- [76] FOUILLET H, JUILLET B, BOS C, et al. Urea-nitrogen production and salvage are modulated by protein intake in fed humans: Results of an oral stable-isotope-tracer protocol and compartmental modeling [J]. American journal of clinical nutrition, 2008, 87(6): 1702-1714.
- [77] NAKATSUKA T, HANDA N, WADA E, et al. The dynamic changes of stable isotopic ratios of carbon and nitrogen in suspended and sedimented particulate organic matter during a phytoplankton bloom [J]. Journal of marine research, 1992, 50(2): 267-296.
- [78] CHECKLEY D M JR, MILLER C A. Nitrogen isotope fractionation by oceanic zooplankton [J]. Deep sea research part A, 1989, 36(10): 1449-1456.
- [79] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 24.

(上接第 43 页)

- [25] 刘丽丽, 付伟. 试论我国城市生活垃圾处理现状及对策 [J]. 中国商界, 2009(9): 211.
- [26] 张玉海. 二恶英类物质去除降解研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
- [27] 杨锋. 关于城市生活垃圾处理的论述 [J]. 科技促进发展, 2010(S1): 252.
- [28] 江志坚. 果蔬与餐厨垃圾混合两相厌氧消化性能的试验研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [29] 刘荣厚, 王远远. 以蔬菜废弃物为原料发酵制备沼气的办法: 200710046930 [P]. 2008-04-02.
- [30] RAO M S, SINGH S P, SINGH A K, et al. Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW: Assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage [J]. Applied energy, 2000, 66(1): 75-87.
- [31] 秦蓉. 利用苹果渣发酵生产奶牛蛋白饲料及应用的研究 [D]. 西安: 西北大学, 2004.
- [32] 董晓丽, 张乃锋, 穆立田, 等. 生物技术在养猪生产中的应用: 现代生物技术在饲料资源开发中的应用进展 [J]. 猪业科学, 2011, 28(8): 28-30.
- [33] 张继, 武光朋, 高义霞, 等. 蔬菜废弃物固体发酵生产饲料蛋白 [J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 85-89.
- [34] 武光明. 蔬菜废弃物的开发利用研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2007.
- [35] 徐抗震, 宋纪容, 黄洁, 等. 苹果渣混合菌发酵生产饲料蛋白的研究 [J]. 饲料工业, 2003, 24(7): 35-37.
- [36] 陈皎皎. 苹果渣发酵饲料不同形态蛋白质、氨基酸及酶活性影响研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.