

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.002

大型水生植物的资源化利用

杨柳燕^{1,2}, 张文^{1,2}, 陈乾坤^{1,2}, 李丽^{1,2}, 孙一宁^{1,2}, 肖琳^{1,2}, 宋晓骏^{1,2}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏南京 210023; 2. 南京大学环境学院, 江苏南京 210023)

摘要:为了更好地利用大型水生植物,防止二次污染,在分析大型水生植物传统资源化利用途径的基础上,提出了大型水生植物资源化利用的新途径,即利用大型水生植物厌氧发酵生产有机酸和制备生物质炭,用于污水处理的脱氮除磷,以利于碳素循环。

关键词:水生植物; 资源化利用; 厌氧发酵; 生物质炭

中图分类号: X17 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)05-0005-06

Resources utilization of macrophytes

YANG Liuyan^{1,2}, ZHANG Wen^{1,2}, CHEN Qiankun^{1,2}, LI Li^{1,2},
SUN Yining^{1,2}, XIAO Lin^{1,2}, SONG Xiaojun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Nanjing 210023, China;
2. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to properly utilize macrophytes and prevent secondary pollution, based on analysis of the traditional disposal and resources utilization pathways of macrophytes, we propose new methods for resources utilization of macrophytes. In the methods, we use anaerobic fermentation of macrophytes to produce organic acid and prepare biochars, which we then use to remove nitrogen and phosphorus in sewage treatment. Such methods are helpful for carbon recycling.

Key words: macrophyte; resources utilization; anaerobic fermentation; biochar

河流湖泊和湿地生态系统中的大型水生植物是水资源的重要组成部分,可用于水体生态修复,在污染水体治理中得到了广泛应用。但是,由于河流湖泊、人工湿地等生态修复工程缺乏长效运行的管理机制,水生植物管理滞后,特别是沉水植物、浮叶植物、挺水植物等水生植物腐败,严重影响人工湿地可持续性 & 生态环境健康,引起了社会各界的普遍关注^[1-3]。水生植物生长具有一定的季节性,冬天低温导致大部分水生植物枯死,若不及时收割,其腐烂后氮磷、有机物等释放入水体将造成二次污染,而对大型水生植物进行修剪、收割,也会产生大量水生植物残体^[4-5],因此,大型水生植物及其残体的有效处理成为当前亟须解决的问题。如何实现大型水生植物的资源化利用成为近年来的研究热点之一。

1 资源化利用的传统途径

已报道的传统水生植物资源化利用途径主要有作饲料^[6]、食用、药用和厌氧发酵制沼气^[7]等。水生植物经过烘干后作为动物饲料带来的经济收益能够平衡收割水生植物所耗用的成本^[8]。大型水生植物还能够用来生产沼气、生物肥料和生物乙醇^[9],具有广阔的发展前景。目前,大型水生植物及其残体的资源化利用传统途径主要有作肥料、饲料、生物质、能源燃料及其他用途。

1.1 作为肥料

大型水生植物体内含有较高的氮、磷、钾等矿物质元素和有机质,是一种天然的肥料来源。目前常用的肥料加工方式有厌氧发酵、沤制堆肥和粉碎成

基金项目:国家水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07101006);江苏省科技厅课题(BE2012736)

作者简介:杨柳燕(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事环境污染生物修复和污染物生物处理技术研究。E-mail: yangly@nju.edu.cn

液体浆液肥料^[10]。陈专专^[11]以伊乐藻、水葫芦、淤泥和稻草为原料,好氧堆肥制备堆腐料,将堆腐料施入土壤后,发现伊乐藻和水葫芦堆腐料所含的有机物更容易分解,其养分矿化量和矿化速率均高于淤泥堆腐料;以上述堆腐料为基质栽培双孢菇,结果表明,伊乐藻添加淤泥处理的氮素利用率是对照组稻草堆腐料的6.8倍。黄东风等^[6]以水葫芦为原料通过好氧发酵堆肥化制备有机肥料,有机质含量为49.88%,氮磷钾营养元素含量为11.42%,远高于农业部的相关标准。Mekhail等^[12]研究发现,将水葫芦与化学肥料混合后施用于沙质土壤中,与单独使用化学肥料相比,混合肥料能提高小麦和大麦的产量,且提升蛋白质的含量。喜旱莲子草的含钾量为2.3%~9.9%,含磷量0.3%,含氮量超过2.0%,是一种良好的钾肥资源^[13]。陈斌等^[14]研究表明,喜旱莲子草与2%~4%的碳铵沤制后作麦、稻基肥,没有再生形成草害;喜旱莲子草还田,能增加土壤有机质含量,其腐殖化系数约为0.18,提高了土壤有效钾及缓效钾含量。水葫芦经粉碎压榨后的汁液含有较高的氮、磷、钾元素,且养分利用率高,汁液经厌氧发酵后所产生的沼液是一种良好的有机肥料。研究表明,追施此有机肥料比施化学肥料更能促进莴苣的生长和营养吸收,并缩短莴苣的生长期,且沼液替代75%化肥氮是最佳使用比例^[15]。邓春芳等^[16]研究发现,5%的水葫芦沼液能促进大白菜种子的发芽与生长。可见,大型水生植物经处理后是一种优质的肥料。

1.2 作为动物饲料

大型水生植物富含各种蛋白质、氨基酸、矿物质元素等营养物,可作为禽畜和水产动物的饲料原料,如浮萍、眼子菜、伊乐藻、水葫芦是重要的动物饲料。研究表明:大型水生植物通过固体发酵,能大大提高其蛋白质含量,其中苦草固体发酵后蛋白质含量最高,可以作为禽畜饲料^[17]。研究报道将眼子菜茎叶切成约3.5 cm长,按1:1比例拌米糠作饲料喂猪,与全喂米糠对照,发现猪的生长速度和体质量均较接近^[18]。浮萍是良好的猪饲料、鸭饲料,也是草鱼的饵料,是禽类饲料的营养补充。Dewanji等^[19]采用水浮莲、喜旱莲子草、浮萍饲养白鼠,发现将3%浮萍和水浮莲叶片蛋白提取物作为饲料添加剂,能够显著提高面粉的营养价值。水葫芦含粗蛋白质1.19%、纤维素1.11%、粗脂肪0.24%,还含有钙、磷无机盐类以及畜禽生长发育所需的各种氨基酸,将其切碎、粉碎或打浆,拌入糠麸,可制成混合饲料或青贮饲料^[20]。水葫芦经过挤压脱水仍保持较高的营养价值,喂水葫芦复合青贮的山羊的采食量

为2152 g/d,平均日增122 g,饲料转化效率为6.6。将水葫芦挤压脱水,与其他底物、添加剂复合青贮发酵,作为粗饲料喂养山羊,可达到中等以上生产水平^[21]。但是,水葫芦作为饲料应用也有其不足之处:水葫芦所含的木质素通过各种化学键与纤维素、半纤维素结合,形成木质纤维素,将阻碍多糖与瘤胃细菌及其酶接触^[22],因而降低了饲料的营养价值。Mukhejee等^[23]将水葫芦发酵,然后利用两种白腐真菌对发酵产物进行脱木质素处理,从而提高了水葫芦的营养价值。孙丽萍^[24]研究表明,东太湖的5种沉水植物(伊乐藻、苦草、马来眼子菜、金鱼藻和轮叶黑藻)营养成分丰富,其中矿物质元素种类齐全,重金属含量均符合渔用饲料安全标准;按15%的添加量将这5种沉水植物添加到基础饲料来饲养中华绒螯蟹,结果能增加中华绒螯蟹的肌肉与肝胰腺中的游离氨基酸及呈味氨基酸的含量。可见大型水生植物是常规饲料的有益补充。

1.3 作为生物质能源燃料

大型水生植物有机质含量高,是一种具有巨大开发潜力的能源。目前大型水生植物作为能源燃料主要有3种。一是制备固体燃料。大型水生植物中含有木质素和纤维素,经过气化、高温分解和碳化后可制得木炭^[25]。吴创之等^[26]利用固化成型技术,将水葫芦压榨后固液分离,残渣经晒干粉碎制成颗粒燃料,其热值比木炭高。二是制备液体燃料。Nigam等^[27-29]将水葫芦、水白菜经酸预处理水解和厌氧发酵来制备生物燃料乙醇。不同的研究表明,水生植物发酵乙醇产量有一定的差异,但是总的来说,与其他纤维素原料的产量相似^[30],每克水葫芦干物质的乙醇产量范围为0.05~0.19 g。Mishima等^[28]研究表明,水浮莲叶水解产物中的糖类含量是水葫芦的1.8倍,更适合作为生物质燃料;其后续的研究发现,以水浮莲为原料制备的乙醇产量与水葫芦差不多。薛慧敏等^[31]筛选出高淀粉浮萍品种,经酸水解前处理后,利用其上清液进行发酵,乙醇发酵效率最高达91.83%。尹艺冉等^[32]利用菹草厌氧发酵制备乙醇,发现稀酸处理能够有效提高乙醇的产率,最优的预处理条件为硫酸2%,温度125℃、时间2 h,乙醇产率达75.7 mg/g,比对照组提高92.25%。三是生产气态燃料。沼气是有机物质在厌氧条件下经过微生物的发酵作用而生成的一种混合气体,一般含甲烷50%~70%,其余为二氧化碳和少量的氮、氢和硫化氢等。关于利用水生植物生产沼气的研究很多,大部分集中于水葫芦产沼气^[33],还有关于苦草^[34]、菱^[35]、水浮莲、满江红和睡莲生产沼气的报道^[36]。以大型水生植物为原料进行厌氧发酵,

所产生的沼气能够替代化石燃料,副产物残渣还可用作有机肥料^[37]。以水葫芦为原料制备沼气主要在发酵前段 30 d 左右,产气潜力为 0.34 L/g TS(总固体含量),沼气中 CH₄ 含量 60%^[38]。由于水生植物中木质素、纤维素、半纤维素含量相对较高,厌氧发酵过程中比多糖类物质难降解,因而产沼气能力相对较弱。香根草的 TS 产气潜力为 471 mL/g, VS(挥发性固体含量)产气潜力 512 mL/g,比糖类含量丰富的马铃薯皮、香菠萝皮的产气量低^[39],故常将水生植物与畜禽粪便或活性污泥混合发酵,以增加水生植物发酵的产气量与产气效率。查国君等^[7]将水葫芦经压榨预处理,水葫芦汁厌氧发酵产气潜力为 2 192 mL/g,向水葫芦渣添加牲畜粪便进行厌氧发酵,其产气率达 504.04 L/g TS, CH₄ 含量达 65%。随后的研究发现,当水葫芦与猪粪混合比例为 2:1 时,厌氧发酵得到的沼气产量与质量较高^[40]。Koyama 等^[41]将金鱼藻、水蕴草、伊乐藻、微齿眼子菜和马来眼子菜 5 种沉水植物作为原料接种活性污泥,进行厌氧发酵实验,发现这 5 种沉水植物发酵产物甲烷产量分别为 249、361、287、161 和 278 mL/g VS。

1.4 其他用途

许多大型水生植物具有食用或药用价值,如菱角含有丰富的淀粉、蛋白质、葡萄糖、不饱和脂肪酸及多种维生素。菱角皮脆肉美,煮熟后剥壳食用,亦可熬粥食。莲藕微甜而脆,可生食,也可做菜,而且药用价值相当高,用莲藕制成粉食用,能消食止泻,开胃清热,滋阴养性。茭白主要含较高的蛋白质、维生素 B1、维生素 B2、维生素 E、微量胡萝卜素和矿物质等,营养价值较高,容易为人体所吸收,且能清湿热解毒,利尿止渴,解酒毒,补虚健体,其中的豆甾醇能清除体内活性氧,抑制酪氨酸酶的活性,从而阻止黑色素生成;它还能软化皮肤表面的角质层,使皮肤润滑细腻,肉质鲜嫩。水芹全草可以清热解毒,凉血降压。菖蒲根茎可以化痰利湿,利尿消肿。鱼腥草全草清热利尿,消肿解毒^[42]。还有研究表明,水生植物菹草、荇菜的总次生代谢产物具有一定的肿瘤抑制活性^[43]。但是,由于水生植物对污染物尤其重金属具有吸收和富集作用,因此将污染水体生长的水生植物用作动物饲料,特别是食用、药用时,要考虑是否符合国家食用药用相关的安全标准,如《农产品安全质量 无公害蔬菜安全要求》,相关的标准还需进一步探索研究。此外,一些大型水生植物也可以作为编织物、造纸、调制香水等的原料。香蒲、芦苇茎叶可用于编制蒲席、坐垫、提篮等,其纤维含量高,极其适宜造纸。鸢尾花香气淡雅,可以调制香水。香根草油可用于制备香精、香水,同时香根草

油可用作生物杀虫剂。总之,大型水生植物是一种宝贵的资源,可大力开发利用。

2 资源化利用新途径

2.1 厌氧发酵生产有机酸

厌氧发酵是指在与空气隔绝的条件下,依赖兼性厌氧菌和专性厌氧菌的生物化学作用,对有机物进行生物降解的过程,也称厌氧生物处理法或厌氧消化法,主要是用来处理高浓度有机工业废水、城镇污水中的污泥、动植物残体及粪便等。传统的水生植物资源化厌氧发酵方式集中于水葫芦发酵产沼气、乙醇及绿肥。本课题组以大型水生植物再力花、菹草、苦草和香蒲作为厌氧发酵产酸的原料,进行水生植物发酵产酸研究,并研究其发酵液作为污水反硝化脱氮外加碳源的可行性。研究表明,碳释放量及 VFAs 总量由大到小排序为菹草、苦草、再力花、香蒲。不同水生植物类型对产酸类型的影响不大。4 种大型水生植物发酵液中,乙酸是最主要酸化产物,其次是丁酸和丙酸,甲酸产量相对较低。相比于挺水植物,沉水植物更适合作为发酵产酸的基质。粉碎程度对菹草氮、磷、碳的释放速率和释放量以及产酸速率和产酸量均有极显著的影响。粉碎后水生植物的氮、磷、碳的释放速率和释放量以及产酸速率和产酸量均显著提高。

构建小型缺氧脱氮反应器和水平潜流人工湿地系统,分析菹草发酵液作为外加碳源对污水脱氮处理系统和人工湿地净化系统的脱氮效果影响潜力。结果表明,菹草发酵液能够显著提高两种工艺的反硝化脱氮效果,在进水 COD 与 N 之比为 16、水力停留时间(HRT)为 4 h 时,缺氧脱氮反应器和潜流人工湿地系统的总氮去除率分别由不添加碳源时的 5.3%、4.3% 提高至 84.0%、79.6%, NO₃⁻-N 去除率分别由 12.0%、4.9% 提高至 98.7%、100%;两种工艺较适宜的进水 COD 与 N 之比均为 16:1,较适宜的 HRT 分别为 4~8 h 和 4 h。可见,大型水生植物发酵产生的有机酸,可以作为污水处理厂污水处理的补充碳源,以提高污水处理系统和人工湿地的脱氮效果。

2.2 制备生物质炭

生物质炭是一种应用废弃生物质在绝氧或部分缺氧条件下经高温热解产生的含碳物质。废弃生物质指农业废弃物,如玉米秸秆、水稻秸秆、小麦秸秆、甘蔗渣、花生壳等^[44],也有其他材料如果壳、木材等。目前有很多关于生物质炭作为吸附剂去除土壤、水体中的重金属、有机物以及其他污染物的报道。Tong 等^[45]以花生秸秆、大豆秸秆、油菜秸秆为

原料在 400℃ 下热解制备生物炭, 研究其吸附水体中 Cu^{2+} 的效果, 结果表明, 花生秸秆生物炭对 Cu^{2+} 吸附能力最强。Mohan 等^[46] 比较了以松树、橡树、松树皮、橡树皮为原料制备的生物炭对水体 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的去除效果, 结果表明, 橡树皮生物炭对 Cd^{2+} 的去除效果最显著。Chun 等^[47] 以小麦秸秆废弃物为原料在不同温度下热解制备生物炭, 研究其比表面积对水体中苯和硝基苯的去除效果。Yang 等^[48] 研究表明, 竹炭对水体中的酸性黑 172 染料有显著的去除效果, 其最大吸附量达 401.88 mg/g。

目前对于应用大型水生植物制备生物炭吸附水体氮磷污染物的研究还比较少。植物生长本身积累了部分氮磷, 生产的生物炭直接投入水体, 由于植物本身释放部分可溶性磷, 因而往往会导致水中磷含量增加。Yao 等^[49-50] 以厌氧发酵的甜菜渣 (DSTC) 和未厌氧发酵的甜菜渣 (STC) 作为原料在 600℃ 下热解制备生物炭, 研究吸附水体中磷的能力, 发现 STC 生物炭几乎没有去除磷, 而 DSTC 生物炭的磷去除率高达 73%, 这是由于 DSTC 生物炭表面含有大量的胶态和纳米态的 MgO , 因而能有效吸附水体中磷。

本课题组选取 3 种常见大型水生植物芦苇、菖蒲、香蒲, 制备前改性生物炭, 来研究热解温度 (400℃、500℃、600℃)、改性剂种类 (钙、镁、铁) 对生物炭除磷能力的影响。结果表明, 峰值温度为 500℃、改性剂为镁的水生植物生物炭对磷的去除效率最高。利用以镁前改性芦苇为原料制备的生物炭对不同浓度的磷溶液进行吸附试验, 结果表明, 对磷酸根-磷最大理论吸附容量为 86.21 mg/g; 利用 Langmuir、Freundlich、Temkin 3 种方程拟合, 得到 3 种方程中 Langmuir 拟合结果的相关系数 R^2 最高 (0.9867), 因此, 拟合效果最好, 因而推断这可能是一种单分子层吸附。这一吸附量显著高于其他生物炭材料对磷的吸附容量, 是铁改性小麦秸秆炭 (后改性) 的 93 倍。

利用修复富营养化水体的空心莲子草为原材料制备生物炭, 并用 MgCl_2 对其进行前改性, 研究改性前后生物炭对氮磷的吸附效果, 发现未改性空心莲子草生物炭 (APB) 和改性空心莲子草生物炭 (MAPB) 对硝态氮的吸附等温线均更符合 Freundlich 等温吸附方程, 吸附过程属于多层吸附。改性后 MAPB 对硝态氮的吸附能力增大, MAPB 的最大吸附量为 5.66 mg/g; 而改性前后生物炭对磷的吸附机制发生了变化, 改性前 APB 对磷为单层吸附, 最大吸附量为 14.8 mg/g; 而磷在改性后的生物炭上则发生了多层吸附现象, 最大吸附量为

90.92 mg/g, 是 APB 的 6 倍左右, 表明改性可大大提高生物炭对磷的吸附能力。APB 对氨态氮的吸附能力基本为零, 而改性后吸附量大大增加, MAPB 对氨态氮的吸附更符合 Freundlich 模型, 最大吸附量为 62.53 mg/g, 吸附过程为多层吸附。因此, 采用大型水生植物制备生物炭, 可有效吸附水体中氮磷, 实现大型水生植物资源化利用。

笔者研究发现, 沉水植物菹草、苦草的碳素释放量明显大于挺水植物再力花、香蒲。植物体在发酵过程中释放的碳素主要来源于纤维素和半纤维素的水解, 沉水植物的纤维素和半纤维素含量高于挺水植物, 而微生物难分解的木质素含量远低于挺水植物, 且沉水植物体结构疏松, 更易被微生物分解, 因此, 沉水植物更适合厌氧发酵产生有机酸, 可作为污水处理厂污水处理的补充碳源, 以提高污水处理系统和人工湿地脱氮处理的效果。相反, 挺水植物 (如芦苇、菖蒲、香蒲) 茎叶高大, 含水率相对较低, 木质素含量高, 适合制备生物炭来去除水体中的氮磷。

3 展望

全球水体氮磷不断增加, 导致湖泊、水库、河流富营养化现象加剧。为了控制水体富营养化, 开发低成本高效的水体处理技术尤为重要。应用大型水生植物进行生态工程修复被认为是一种非常有发展前景的技术。笔者提出了大型水生植物资源化利用的 2 种新途径和方法, 即通过大型水生植物的厌氧发酵产生有机酸, 为污水反硝化脱氮补充碳源, 从而提高污水处理厂脱氮效率; 利用湖泊、湿地中大型水生植物生产改性生物炭, 再利用改性生物炭去除水体中氮磷, 从而实现大型水生植物的综合利用, 这对修复受损的湖泊、湿地环境, 提升地表水水环境质量, 具有重要的意义。

未来的研究中, 优化大型水生植物厌氧发酵产酸工艺, 提高有机酸产量, 为污水处理厂污水脱氮处理和尾水的深度脱氮处理提供低成本、高效率、可控性强的新型反硝化外加碳源, 减轻氮磷污染排放量; 采用水生植物制备生物炭, 并与微生物、电化学等联用, 以提高水体脱氮除磷的能力, 并用于湖泊、湿地的生态修复, 实现大型水生植物的资源化和生态工程系统的长效运行, 从而有效保护水环境, 这是未来研究热点和方向。

参考文献:

- [1] HILL D T, PAYTON J D. Influence of temperature on treatment efficiency of constructed wetlands [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(2): 393.

- [2] JING S R, LIN Y F, LEE D Y, et al. Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76(2): 131-135.
- [3] VERHOEVEN J T A, ARHEIMER B, YIN C, et al. Regional and global concerns over wetlands and water quality [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(2): 96-103.
- [4] BRIX H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 11-17.
- [5] DALE P E R, CONNELLY R. Wetlands and human health: an overview [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2012, 20(3): 165-171.
- [6] 黄东风, 李清华, 陈超. 水葫芦有机肥料的研制与应用效果 [J]. *中国土壤与肥料*, 2007(5): 48-52. (HUANG Dongfeng, LI Qinghua, CHEN Chao. Research to development of organic fertilizer made from common water hyacinth and effect of applying it [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(5): 48-52. (in Chinese))
- [7] 查国君, 张无敌, 尹芳, 等. 滇池水葫芦固液分离后的沼气发酵研究 [J]. *中国野生植物资源*, 2008, 27(1): 36-38. (ZHA Guojun, ZHANG Wudi, YIN Fang, et al. Separating solid and liquid of Dianchi's *Eichhornia crassipes* for biogas generation [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2008, 27(1): 36-38. (in Chinese))
- [8] BOYD C E. Vascular aquatic plants for mineral nutrient removal from polluted waters [J]. *Economic Botany*, 1970, 24(1): 95-103.
- [9] WILKIE A C, EVANS J M. Aquatic plants: an opportunity feedstock in the age of bioenergy [J]. *Biofuels*, 2010, 1(2): 311-321.
- [10] 王艳丽, 肖瑜, 潘慧云, 等. 沉水植物苦草的营养成分分析与综合利用 [J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(4): 45-47. (WANG Yanli, XIAO Yu, PAN Huiyun, et al. Analysis of nutrient composition and comprehensive utilization of submersed aquatic macrophytes (*Vallisnerianatans*) [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(4): 45-47. (in Chinese))
- [11] 陈专专. 水生植物混合堆腐料养分矿化规律及农业利用途径 [D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [12] MEKHAIL M M, ABDEL-MOULA S E, ZANOUNI I. The application of waterhyacinth as a supplemental source of K for wheat and barley grown on a sandy soil [J]. *Assiut Journal of Agricultural Sciences (Egypt)*, 1999, 30(2): 73-82.
- [13] 刘伟. 喜旱莲子草的生物防治技术、机理及资源化利用研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [14] 陈斌, 吉训风, 季应明, 等. 沤制水花生作麦稻基肥的效应研究 [J]. *土壤通报*, 2000, 31(4): 180-182. (CHEN Bin, JI Xunfeng, JI Yingming, et al. Utilization of decomposed water peanuts as basal manure for wheat and rice [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(4): 180-182. (in Chinese))
- [15] 汪吉东, 马洪波, 高秀美, 等. 水葫芦发酵沼液对紫叶莴苣生长和品质的影响 [J]. *土壤*, 2011, 43(5): 787-792. (WANG Jidong, MA Hongbo, GAO Xiumei, et al. Effects of different ratios of biogas slurry of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) substitute chemical nitrogen fertilizers on growth and quality of lettuce (*L. sativa*) [J]. *Soils*, 2011, 43(5): 787-792. (in Chinese))
- [16] 邓春芳, 张映兰, 赵兴玲, 等. 发酵水葫芦汁液对大白菜种子发芽的影响 [J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(6): 23-28. (DENG Chunfang, ZHANG Yinglan, ZHAO Xingling, et al. The effect of germination of Chinese cabbage seeds soaking with bio-slurry of water hyacinth sap [J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2012, 32(6): 23-28. (in Chinese))
- [17] 杨柳燕, 张奕, 肖琳, 等. 固体发酵提高水生植物发酵产物蛋白含量的研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(1): 35-39. (YANG Liuyan, ZHANG Yi, XIAO Lin, et al. Improvement of crude prote in content in aquatic macrophyte by solid-state fermentation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1): 35-39. (in Chinese))
- [18] 张克胜. 眼子菜属水草的利用 [J]. *中国野生植物资源*, 1999(3): 31-32. (ZHANG Kesheng. The utilization of potamogeton sp [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 1999(3): 31-32. (in Chinese))
- [19] DEWANJI A, MATAI S. Nutritional evaluation of leaf protein extracted from three aquatic plants [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(8): 2162-2166.
- [20] 卢隆杰, 苏浓, 岳森. 低投入、高产、多用途的凤眼莲 [J]. *吉林畜牧兽医*, 2003(4): 23-25. (LU Longjie, SU Nong, YUE Sen. Low input, high output, multi-purpose water hyacinth [J]. *Jilin Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2003(4): 23-25. (in Chinese))
- [21] 白云峰, 周卫星, 严少华, 等. 水葫芦青贮条件及水葫芦复合青贮对山羊性能的影响 [J]. *动物营养学报*, 2011, 23(2): 330-335. (BAI Yunfeng, ZHOU Weixing, YAN Shaohua, et al. Ensilaging water hyacinth effects of water hyacinth compound silage on the performance of goats [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2011, 23(2): 330-335. (in Chinese))
- [22] KARUNANANDAA K, VARGA G A, AKIN D E, et al. Botanical fractions of rice straw colonized by white-rot fungi: changes in chemical composition and structure [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1995, 55(3): 179-199.
- [23] MUKHERJEE R, NANDI B. Improvement of in vitro digestibility through biological treatment of water hyacinth biomass by two pleurotus species [J]. *International*

- [24] 孙丽萍. 东太湖常见沉水植物作为中华绒螯蟹饲料源的可行性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [25] 徐祖信, 高月霞, 王晟. 水葫芦资源化处置与综合利用研究评述[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 201-205. (XU Zuxin, GAO Yuxia, WANG Sheng. Review on comprehensive disposal and utilization of water hyacinth[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(2): 201-205. (in Chinese))
- [26] 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [27] NIGAM J N. Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast [J]. Journal of Biotechnology, 2002, 97(2): 107-116.
- [28] MISHIMA D, KUNIKI M, SEI K, et al. Ethanol production from candidate energy crops: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes L.*) [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(7): 2495-2500.
- [29] KUMAR A, SINGH L K, GHOSH S. Bioconversion of lignocellulosic fraction of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to ethanol by *Pichia stipitis* [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13): 3293-3297.
- [30] RAPOSO S, PARDÃO J M, DIAZ I, et al. Kinetic modelling of bioethanol production using agro-industrial by-products[J]. Int J of Energy Env, 2009, 3(1): 8.
- [31] 薛慧玲, 董志红, 方杨, 等. 水生能源植物浮萍生产燃料乙醇[J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 55-59. (XUE Huiling, DONG Zhihong, FANG Yang, et al. Producing fuel ethanol from energy hygrophyte duckweed [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(7): 55-59. (in Chinese))
- [32] 尹艺冉, 王进, 彭书传, 等. 酸处理菹草制备生物乙醇和甲醇过程研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(1): 103-108. (YIN Yiran, WANG Jin, PENG Shuchuan, et al. Research on preparation process of bioethanol and methane with acid pretreated curly-leaf pondweed[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 38(1): 103-108. (in Chinese))
- [33] KIVAIISI A K, MTILA M. Production of biogas from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) (Mart) (Solms) in a two-stage bioreactor[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1997, 14(1): 125-131.
- [34] SINGHAL V, RAI J P N. Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents[J]. Bioresource Technology, 2003, 86(3): 221-225.
- [35] VERMA V K, SINGH Y P, RAI J P N. Biogas production from plant biomass used for phytoremediation of industrial wastes[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(8): 1664-1669.
- [36] ABBASI S A, NIPANEY P C, SCHAUMBERG G D. Bioenergy potential of eight common aquatic weeds[J]. Biological Wastes, 1990, 34(4): 359-366.
- [37] WILKIE A C, WALL J D, HARWOOD C S, et al. Biomethane from biomass, biowaste, and biofuels in Bioenergy[M]. Washington D C: ASM Press, 2008: 195-205.
- [38] 刘海琴, 宋伟, 高运强, 等. 水葫芦与蓝藻厌氧发酵产沼气的研究[J]. 江苏农业科学, 2008(3): 254-256. (LIU Haiqin, SONG Wei, GAO Yunqiang, et al. Water hyacinth and cyanobacteria anaerobic fermentation biogas research [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2008(3): 254-256. (in Chinese))
- [39] 胡晓明, 张建萍, 张无敌, 等. 香根草中温发酵产沼气的试验研究[J]. 科技信息, 2008, 27: 8-9. (HU Xiaoming, ZHANG Jianping, ZHANG Wudi, et al. Experimental study on mesophilic biogas fermentation with vetiveria zizanioides[J]. Science & Technology Information, 2008, 27: 8-9. (in Chinese))
- [40] 魏世清, 覃文能, 李金怀, 等. 水葫芦与猪粪混合厌氧发酵产沼气研究[J]. 广西林业科学, 2008, 37(2): 80-83. (WEI Shiqing, QIN Wenneng, LI Jinhui, et al. Biogas generated by anaerobic fermentation of *Eichhornia crassipes* and swine feces[J]. Guangxi Forestry Science, 2008, 37(2): 80-83. (in Chinese))
- [41] KOYAMA M, YAMAMOTO S, ISHIKAWA K, et al. Anaerobic digestion of submerged macrophytes: chemical composition and anaerobic digestibility [J]. Ecological Engineering, 2014, 69: 304-309.
- [42] 李秀, 胡桂忠. 云南普洱市药用水生植物资源[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2012, 32(5): 75-78. (LI Xiu, HU Guizhong. Aquatic plants in Yunnan Puer drug resources [J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2012, 32(5): 75-78. (in Chinese))
- [43] 杜远达. 南四湖流域典型人工湿地植物资源化研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [44] KAMEYAMA K, MIYAMOTO T, SHIONO T, et al. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1131-1137.
- [45] TONG X, LI J, YUAN J, et al. Adsorption of Cu (II) by biochars generated from three crop straws [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(2): 828-834.
- [46] MOHAN D, PITTMAN C U, BRICKA M, et al. Sorption of arsenic, cadmium, and lead by chars produced from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 310(1): 57-73.

数、径流模数和地下径流比例均增加,峰现时间提前。研究成果可为拓展新安江模型在淮河流域水土流失模拟方面的应用取得理论和方法上的突破,同时也将为淮河流域水土资源的开发利用和管理决策奠定科学基础。研究方法对其他湿润半湿润地区也具有借鉴作用。

参考文献:

[1] 夏军,谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7. (XIA Jun, TAN Ge. Hydrological science towards global change: progress and challenge[J]. Resource Science, 2002, 24(3): 1-7. (in Chinese))

[2] 许有鹏,于瑞宏,马宗伟. 长江中下游洪水灾害成因及洪水特征模拟分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 638-643. (XU Youpeng, YU Ruihong, MA Zongwei. Analysis on the cause of for formation of flood disaster and flood characteristics in the middle and lower reaches of the Yangtze river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 638-643. (in Chinese))

[3] BRONSTERT A. Rainfall-runoff modelling for assessing impacts of climate and land-use change[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(3): 567-570.

[4] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5-8. (HAO Fanghua, CHEN Liqun, LIU Changming, et al. Impact of land use change on runoff and sediment yield [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 5-8. (in Chinese))

[5] YU Meixiu, REN Liliang, LI Qiongfang, et al. Hydrologic response to land use and land cover changes within the context of catchment-scale spatial information[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1539-1548.

[6] LI Qiongfang, CAI Tao, YU Meixiu, et al. Investigation into the impacts of land-use change on runoff generation characteristics in the upper Huaihe River Basin, China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1464-1470.

[7] 张乾,包为民,陈伟东,等. 大坡岭流域土地利用变化的径流特征响应研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 49-52. (ZHANG Qian, BAO Weimin, CHEN Weidong, et al. Parameter estimation method based on parameter function surface to evaluate runoff changes in response to land use changes in Dapoling Watershed [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 49-52. (in Chinese))

[8] 蔡涛,李琼芳,宋秀民,等. 基于空间信息平台的土地利用变化径流响应模拟[J]. 淮海大学学报(自然科学版), 2009, 37(5): 563-567. (CAI Tao, LI Qiongfang, SONG Xiumin, et al. Influence of land use change on runoff response simulation based on spatial information platform [J]. Journal of Hohai University (Natural

Sciences), 2009, 37(5): 563-567. (in Chinese))

[9] 陆志刚,张旭辉,霍金兰,等. 1960—2008年淮河流域极端降水演变特征[J]. 气象科学, 2011, 31(增刊1): 74-80. (LU Zhigang, ZHANG Xuhui, HUO Jinlan, et al. The evolution characteristics of the extreme precipitation in Huaihe River Basin during 1960-2008 [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31 (sup1): 74-80. (in Chinese))

[10] 赵人俊. 流域水文模拟-新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984.
(收稿日期: 2016-01-03 编辑: 徐娟)

.....
(上接第10页)

[47] CHUN Y, SHENG G, CHIOU C T, et al. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(17): 4649-4655.

[48] YANG Y, LIN X, WEI B, et al. Evaluation of adsorption potential of bamboo biochar for metal-complex dye: equilibrium, kinetics and artificial neural network modeling [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(4): 1093-1100.

[49] YAO Y, GAO B, INYANG M, et al. Removal of phosphate from aqueous solution by biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1): 501-507.

[50] YAO Y, GAO B, INYANG M, et al. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: characterization and phosphate removal potential [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 6273-6278.
(收稿日期: 2016-07-26 编辑: 彭桃英)

.....
· 信息播报 ·

2016(第四届)中国水生态大会圆满落幕

2016(第四届)中国水生态大会由国际水生态安全中国委员会、河海大学环境学院、中国疏浚协会、浙江省生态经济促进会和浙江省水利学会联合主办,《水资源保护》编辑部与北京沃特咨询有限公司共同承办,于2016年9月7—10日在浙江省海宁市圆满召开。本次大会战略合作伙伴宁波天韵控股集团有限公司、协办单位嘉兴五丰水泥制品制造有限公司给予了大会极大支持。

本次大会邀请了夏军院士、王浩院士、周建军教授、崔广柏教授、吴时强教授、朱伟教授、辛沛教授、赵敏华副总工、满莉副教授等,就水生态文明建设、海绵城市建设与城市水系规划、河湖健康管理及保护、长江水生态保护、城市滨水景观规划与生态优化、小流域治理、河湖水系连通、河湖黑臭水体整治、河湖清淤疏浚、泥资源综合利用、水环境治理与水生态系统修复、PPP模式与水利现代化建设等问题进行大会主旨报告。专家们的精彩报告吸引了600多名来自全国各地的参会人员,大会取得了圆满成功。

(本刊编辑部 供稿)