



陈金洁,程瑶,章昕颖,等.桑基鱼塘陆面子系统物质循环利用研究进展[J].黑龙江农业科学,2022(2):99-106.

桑基鱼塘陆面子系统物质循环利用研究进展

陈金洁^{1,2},程瑶^{1,2},章昕颖¹,谢湘¹,张池³,戴军³,刘科学^{1,2}

(1.广州新华学院 资源与城乡规划学院,广东 广州 510520;2.广东华南空间规划研究院,广东 广州 510642;3.华南农业大学 资源环境学院,广东 广州 510642)

摘要:为揭示桑基鱼塘生态系统内部潜在的科学规律,从而促进桑基鱼塘的传承和保护。本文通过系统梳理桑基鱼塘陆面子系统的基本模式、物质来源与归趋、物质循环过程,通过分析桑叶的矿物元素和营养物质含量、桑树产量质量的影响因素、桑叶活性成分含量的影响因素、用桑量水平对蚕种产量质量的影响、蚕对桑叶营养物质消化率的影响因素来揭示桑叶对桑基鱼塘生态系统的影响特征。并通过分析蚕沙营养物质的分布特征、蚕沙对桑基鱼塘系统水质的影响、蚕沙的资源化利用,总结了蚕沙对桑基鱼塘生态系统的影响特征及资源化利用情况。通过分析池塘底泥的物质分布特征、堆肥对底泥理化性状的影响、底泥的资源化利用,综述了池塘底泥对陆面生态系统的影响。

关键词:桑基鱼塘;陆面子系统;氮;磷;物质循环

桑基鱼塘是一种传承了 2 500 多年的农业生产经营模式,被誉为良性经济循环的典范^[1]。在我国的长三角和珠三角地区,由于两地地势低洼且雨量充沛,人们便利用低洼的水泽围堤筑堰,养殖鱼虾,鱼塘中肥沃的底泥运到四周的塘基用于种植桑树的肥料,陆面桑基土壤中的营养物质随着雨水的冲刷流进鱼塘,桑蚕的蚕沙成为鱼塘养

鱼的鱼饲料,形成栽桑、养蚕、养鱼三位一体的地方农业生产模式^[2-3]。

近年来,随着社会经济的快速发展,桑蚕的产业效益趋于动荡,农民又片面追求桑蚕养殖中的经济效益,造成桑基鱼塘生态系统不稳定,系统内部的物质循环和资源化利用失去平衡,首当其冲的就是作为桑基鱼塘生态系统基础的桑基子系统。目前对于桑基鱼塘陆面子系统的理论研究主要聚焦在 5 个方面:(1)桑基鱼塘的历史发展及时代变迁;(2)桑基鱼塘系统水陆相互作用过程与机理;(3)生态系统内部物质循环与能量流动;(4)桑基鱼塘技术体系与模式;(5)基塘时空演变格局^[4]。

收稿日期:2021-10-11

基金项目:广东省教育科研项目(2020GXJK116)。

第一作者:陈金洁(1994—),女,硕士,从事农业资源与环境研究。E-mail:1369113867@qq.com。

通信作者:刘科学(1980—),男,博士,高级工程师,从事土壤学研究。E-mail:28257448@qq.com。

Research Progress on Entomogenous Fungi Insecticidal Synergistic Ways

JIANG Xi-feng

(Plant Protection Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pest in Harbin, Ministry of Agriculture, Harbin 150086, China)

Abstract: In order to promote the application of entomogenous fungi in production, the research history of entomogenous fungi in China and abroad were consulted in this paper. The various methods which were used by domestic and foreign researchers to improve the virulence of entomogenous fungi by compounding entomogenous fungi with chemical insecticides, chemical substances, surfactants, biological insecticides, and constructing engineering strains were reviewed and summarized, to provide a basis for further research and application. It is concluded that when chemical pesticides, nutrients, and surfactants were compatible with entomogenous fungi, adding a certain proportion could enhance the virulence of entomogenous fungi. The insecticidal spectrum of entomogenous fungi was broadened by the mixture of strains and the application of its metabolites. The virulence of entomogenous fungi was enhanced after highly pathogenic genes been highly expressed in entomogenous fungi.

Keywords: entomogenous fungi; engineering strain; toxin synergistic pathway; pathogenicity

桑叶作为桑蚕主要的食物来源,桑叶的高蛋白含量和其他活性营养物质可促进桑蚕的生长发育。桑叶的质量和施用量显著影响桑蚕体内的活性物质成分和含量,合理的用桑量能提高桑蚕的结茧率及收茧量,进而提高养蚕的经济效益。桑蚕经过不充分的摄食、吸收及消化生命活动后快速排出蚕粪,使得由蚕粪和未吞食完全的桑叶组成的蚕沙仍含有丰富的营养物质,具有广泛的应用价值。为了降低蚕沙中有毒有害物质的含量,往往需要对其进行堆沤处理。蚕沙的堆沤方式主要分为开放式堆沤和发酵式堆沤^[5],不同的堆沤方式对蚕沙的理化性质如 pH、堆沤前后质量的变化等产生影响^[6]。

桑基鱼塘系统中桑树所需养分主要通过鱼塘中的底泥供给,底泥中富含大量的营养物质,同时也存在着大量病原菌、寄生虫、有毒重金属和有机污染物。过厚的底泥会沉积大量的氮、磷元素,造成水体富营养化和水体含氧浓度不足等潜在风险。底泥堆肥包括好氧堆肥和厌氧堆肥。与厌氧堆肥相比而言,好氧堆肥可以最大限度地去除底泥中的寄生虫、病菌等有害微生物。此外,堆肥处理还能够显著降低底泥中重金属的生物可利用性和有机污染物的含量。底泥经过堆肥处理后用作桑树肥料,可以明显提高营养盐的利用率,获得较高的经济效益。

本文通过梳理近年来桑基鱼塘的相关理论研究,从微观角度揭示其陆面子系统物质循环机制,并总结其陆面子系统废弃物资源化利用研究进展,从而为桑基鱼塘的传承与保护提供参考依据。

1 桑基鱼塘生态系统陆面子系统基本特征

1.1 桑基鱼塘生态系统陆面子系统基本模式

桑基鱼塘生态系统是一种高效的农业物质循环利用模式,直到今天仍蕴藏着巨大的价值。它由陆面子系统和鱼塘子系统两部分构成,而桑基鱼塘陆面子系统包含桑基子系统和蚕子系统,桑基子系统是桑基-蚕-鱼塘生态系统中 3 个子系统的首要支柱,是整个生态系统生产力的物质和能量基础;而蚕子系统是桑基-蚕-鱼塘生态系统中 3 个子系统的连接枢纽,在整个生态系统中发挥重要作用。

由于我国长三角和珠三角地区地形低洼、多雨,极易发生内涝。人们便将低洼处挖成池塘用于养殖鱼虾,挖出的塘泥垫高成塘基,塘基上种植

桑树、花卉等,基面上的副产物又投入塘中作为饲料,同时实现防洪蓄水和增加收入的目的,这便是传统的桑基鱼塘陆面子系统的基本模式^[7]。

在漫长的社会发展过程中,桑基鱼塘生态系统不断完善塘基种养方式,推动其陆面子系统农业生产技术的持续发展。在当前的新型基塘农业模式下,“花基鱼塘”“油基鱼塘”“杂基鱼塘”等新型模式也逐渐繁荣起来,在保持原有生态效益的同时,经济效益也十分显著。以湖州菱湖镇为例,新型基塘随着季节变化更新塘基作物,冬天在塘基上种植油菜、夏天则种植芝麻或黄豆。厂家收购塘基上的油料作物,其他副产品用于生产鱼饲料。研究表明,油基鱼塘上塘基油菜籽的产量与水田相比增加了 $40 \text{ kg} \cdot (667 \text{ m}^2)^{-1}$,鱼塘的生产力也有所提高,且能够节约鱼塘换水的劳动力和经济成本的投入^[8]。刘少慧^[9]研究发现,桑基-蚕-鱼塘-大球盖菇新型基塘农业系统模式有效地平衡了基塘的产出结构,与桑基-蚕-鱼塘传统模式相比,新型基塘农业系统模式的陆面子系统的桑枝等废弃物可以用于大球盖菇等食用菌培养料。

1.2 桑基鱼塘生态系统陆面子系统的物质来源与归趋

桑基鱼塘陆面子系统的物质来源由内部来源及外部来源共同组成。桑基子系统通过桑树的光合作用合成有机物,形成初级生产力,是整个生态系统生产力的物质来源基础;其次,由于桑基鱼塘规模的扩大,往往需要添加外源养分,如农家肥和化肥来补充桑基鱼塘陆面子系统的营养供应。桑树的生长发育需要大量的氮肥供应,施加足够的氮肥、磷肥、钾肥以及适量的硼、锌微肥能显著提高桑叶的经济产量^[10]。

桑葚、蚕沙、蚕茧以及蚕蛹则是桑基鱼塘陆面子系统最终的物质归趋。桑树在生长发育过程中所结的果实为桑葚;另一方面,在桑蚕的养殖过程中,桑蚕通过喂食桑叶产生排泄物,桑蚕的排泄物以及残留桑叶的混合物构成了蚕沙,达到五龄期的桑蚕开始吐丝作茧得到蚕茧,并在蚕茧中蜕皮化蛹产生蚕蛹。蚕茧和蚕蛹具有很大的经济和药用价值。蚕茧可以缫丝,茧衣及缫制后的废丝可作丝棉和绢纺原料;蚕蛹不仅味道鲜美,营养丰富,还是极宝贵的动物性蛋白质来源,更是提取多种化学药品的原料。

1.3 桑基鱼塘生态系统陆面子系统的物质循环过程

桑基鱼塘陆面子系统的物质循环大致经历以

下过程:陆面子系统的副产物及地表流失的养分随降雨输出至鱼塘子系统,而鱼塘子系统的塘泥、水及肥分等又输入到陆面子系统,两者之间的物质循环使陆面子系统拥有良好的资源循环利用体系。桑基子系统通过桑树对太阳能、雨势能以及吸收化肥中的营养元素等多种资源的利用合成有机物,桑树产生的桑葚、桑枝及桑叶用途多样,桑枝可用于造纸和编织,桑葚具有极高的营养价值和医药价值,用于鲜食与制作果酒等,而桑叶是蚕子系统的重要食物来源^[11]。蚕子系统产生的蚕蛹同样具有丰富的营养价值,用途广泛,其制成的蛹肽蛋白比普通鱼饲料更营养,可以促进鱼类的生长^[12];蚕茧可用于经济价值高的丝织品产业;蚕沙经过发酵后作为鱼塘子系统的鱼饲料;而每年鱼塘积累的塘泥循环进入陆面子系统,为桑树的生长提供丰富的有机肥和营养物质^[13]。

2 桑叶对桑基鱼塘生态系统的影响特征

2.1 桑叶的矿物元素和营养物质含量

桑树因其产出优质桑叶用于养蚕,蕴含巨大的经济价值。桑叶作为桑树主要的物质输出,具有多种矿物元素和营养物质。研究表明,桑叶中含有氮(0.8%~1.2%)、磷(0.175%~0.240%)和钾(0.51%~0.56%),以及一定量的中量和微量元素。一般而言,桑树植株体内总氮含量分布为叶片>根>枝条,而总磷含量分布为根≈叶>枝条^[14]。此外,桑叶中的蛋白质含量高、种类丰富,桑叶蛋白质含有多达18种氨基酸,总含量占桑叶干物质的10%以上,而且桑叶的必需氨基酸和非必需氨基酸占到其氨基酸总量的一半以上,尤其是赖氨酸、蛋氨酸、胱氨酸、谷氨酸含量较高,桑叶还含有6种维生素、8种矿物质,还含有多种功能活性物质,如黄酮类化合物、生物碱、多糖类等,是一种具有较高开发利用价值的优质植物蛋白质资源^[15-16]。

吴婧婧等^[17]研究发现不同品种桑叶间的差异并不大,含水量均在65.95%~81.38%;其次,桑叶中的粗蛋白、总氨基酸含量也较为丰富,粗蛋白的平均质量分数为22.19%,最高可达32.97%,总氨基酸的平均质量分数为17.94%,最高可达20.8%。任超^[18]研究结果表明,北方品种桑树的含水率远低于南方品种;总糖含量在南北品种间的差异明显,北方品种的总糖含量高于南方品种;桑叶的总糖及多酚含量都很高,黄酮含量稍低。整体而言,北方品种好于南方品种。

2.2 桑叶产量质量的影响因素

桑叶是桑蚕唯一的饲料,肥料是影响桑叶的产量和质量的重要因素。不同施肥品种、施肥量和施肥方法将直接影响桑树对矿质营养物质的吸收效率,进而影响桑树的生长发育和桑叶的产量和品质^[19]。杨贵明等^[20]研究发现,供氮水平可以调控桑树的生长发育情况,对桑树产量和质量产生影响。随着供氮水平的上升,桑树品种的叶、枝条、根中总氮浓度及其累积量显著增加;相较而言,磷素供应不足易在植物体内产生稀释效应,导致植物体总磷浓度明显下降^[20];此外,不同桑树品种对氮、磷的吸收效率不同,反过来氮肥的施用也会影响桑树对氮、磷的吸收运转。尚二凤等^[21]同样发现不同品种桑树在施用氮肥后,根、枝、叶中总氮的含量、氮素的累积量都存在显著的增加,在不同氮素水平供应下,桑树植株各部位氮素累积状况及磷素累积状况都为叶片>根>枝条,而根、枝、叶中磷素含量在施氮处理中都存在比低氮处理显著降低的情况,磷素在各部位的累计量比低氮处理的累积量表现为根>枝条>叶片^[22]。许振羽等^[23]研究发现,施加较低的氮肥可以促进总氮和总磷在桑叶部位的积累。随着施氮量的增加,桑树叶片中的叶绿素、可溶性蛋白和可溶性糖的含量也随之增加,这直接表明施加适量的氮肥能够促进桑树的光合作用,增加有机物在桑叶部位的积累。值得一提的是,过高的施氮量反而会抑制桑树对氮和磷的吸收。

一般而言,桑叶的矿物元素和营养成分含量受不同环境因素共同控制,会随着桑品种、采收季节、产地、桑树营养状况的不同发生明显变化^[24]。

2.3 桑叶活性成分含量的影响因素

桑叶中不仅含有丰富的蛋白质、脂肪等营养物质,还含有多种功能活性物质,如黄酮类化合物、生物碱和多糖类等。研究表明,黄酮类化合物具有降血压^[25]、清除自由基、抑制血清脂质增加和抑制动脉粥样硬化形成等作用^[26];生物碱具有消炎镇痛、清除自由基、抗氧化、抗菌、抗肿瘤、抗炎症和免疫等多种生物活性及药理等作用,在食品、医药和保健等领域得到广泛的应用^[27];其中1-脱氧野尻霉素(1-DNJ)是桑叶特有的生物碱,具有较强的降血糖、抗病毒、抗肿瘤转移等作用^[28];桑叶中的多糖类物质也是具有明显降血糖作用的活性成分之一^[29]。不同的桑树品种、施肥处理、采摘季节和叶位的桑叶活性成分含量具有

明显差异。梁贵秋等^[30]对广西蚕区 21 个桑树品种的桑叶营养品质的研究表明,桑叶中多糖含量最高,其次是多酚、总黄酮、总生物碱和 1-DNJ。金超等^[31]对华东蚕区桑叶营养品质的研究表明,不同桑树品种的活性物质含量有较小的差异;春秋两季同一桑树品种及其不同叶位的活性物质有较明显的差异,含量由高到低依次为上位叶、中位叶、下位叶;秋季除中位叶中的总生物碱含量略高于上位叶外,不同叶位桑叶中的 1-DNJ 和总黄酮含量变化趋势同春季桑叶。此外,研究发现春季桑叶上、中位叶片中 1-DNJ 及总黄酮含量略高于秋季叶片,而总生物碱含量均为秋季桑叶高于春季桑叶。毛晓瑜^[32]研究发现, NH_4^+ 和 NO_3^- 两种氮素对桑叶中 1-DNJ 的影响基本相同,随着施加的氮素含量的增加桑叶中的 1-DNJ 的含量均呈现出先升高后降低的趋势。杨昌敏等^[33]通过研究氮磷钾肥不同施用量对川 826 桑树品种的桑叶 1-DNJ、总黄酮、可溶性糖含量的影响表明,合理施用氮磷钾肥能有效提高桑叶 1-DNJ、总黄酮、可溶性糖的含量,其中氮肥对 1-DNJ 含量和总黄酮含量的影响最显著,而过量施用钾肥会显著降低桑叶中可溶性糖的含量。

2.4 用桑量水平对蚕种产量质量的影响

合理的用桑量水平能有效促进桑树生长发育,增加其干物质积累量,过高过低的用桑量水平都不利于桑蚕的生长发育。在桑蚕饲养的实际生产中,采取过少用桑量来降低生产成本,或采取过多的用桑量来增加蚕种的繁育系数,均会导致蚕种的产量质量下降。过少的用桑量水平会造成桑蚕体内营养物质含量不够;而过多的用桑量则容易引起蚕座残桑堆积、湿度大、病原物滋生和各种蚕病诱发等风险,其结果既降低了产量又降低了蚕种质量,不利于生产效益的提高。张金祥等^[34]研究发现,用桑量水平过少会引起桑蚕营养不良及其体内营养物质积累不够等问题,用桑量过多则会增加饲养成本并导致饲养效率下降。一般而言,科学养蚕需要注意均匀用桑,缩短桑蚕的发育周期,从而提高桑蚕结茧的数量和质量。

2.5 蚕对桑叶营养物质消化率的影响因素

蚕通过取食桑叶满足自身生长、发育等生命活动,各种营养物质被桑蚕摄取后,通过消化、吸收、利用及同化等作用逐渐转化为桑蚕自身成长所需的能量,另一方面又在其体内积累蛋白质而获得蚕丝^[35-36]。张丽丽等^[37]研究了蚕对桑叶中

常规营养物质的消化利用规律,结果表明 5 龄幼虫对桑叶中粗蛋白和粗脂肪的利用率较高,消化率分别为 61.1% 和 58.0%,而粗纤维的消化率仅为 8.2%。由于蚕是变温动物,其受外部环境因子的影响较大,有研究表明光照会影响桑蚕生长发育、饲料效率与蚕茧质量等。苏琳瑛^[38]研究发现,光照周期会影响桑蚕生长发育过程,持续光照能提高桑蚕的全茧量与茧层量。然而,光照时间提前能显著降低桑蚕 5 龄的食下量、消化量、消化率,但对桑蚕的饲料效率却没有明显的影响。

3 蚕沙对桑基鱼塘生态系统的影响特征及资源化

3.1 蚕沙营养物质的分布特征

蚕沙由桑蚕的排泄物和残桑中的桑枝桑叶组成,桑蚕通过采食大量桑叶满足其自身的生长、发育等生命活动。桑叶在蚕体内消化时间较短而被快速排出体外,导致桑叶中大量的营养成分及活性成分没有被桑蚕及时充分吸收,因此蚕沙中含有丰富的营养活性物质。蚕沙是一种营养价值很高的饲料,其中的粗蛋白含量比米糠和青草高得多。蚕沙干物中含有粗蛋白、粗脂肪、无氮浸出物、粗纤维等营养物质。每 100 kg 的蚕沙中含有氮、磷和钾的质量分别为 1.28、0.48 和 0.21 kg^[39-40]。

蚕沙含有丰富的营养活性物质以及促进鱼类生长所需要的多种维生素,其氮素和磷酸的含量分别为 1.45% 和 0.25%。蚕沙中无氮浸出物是主要的物质组成,达到了 36.2%^[41]。蚕沙的质量受外部环境的影响,与土壤环境、施肥情况、养蚕习惯的影响密不可分,不同地区蚕沙的营养元素存在明显差异。李秀汉等^[42]研究发现,化州、云安、罗定和遂溪 4 个地区的蚕沙的氮、磷和总养分($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$)含量分别在 16~23 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 1.7~2.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 37~64 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,地区之间氮含量的差异显著。

3.2 蚕沙对桑基鱼塘系统水质的影响

蚕沙因其具有成本低且市场广阔的优势被广泛用作养殖池塘的饵料。饵料投入量盲目增多,投饵方法不当等容易造成池塘水质下降、水体富营养化等问题。

刘诗雨^[43]将鱼塘水质的降低归因于过量投施有机肥料,池塘底泥的清理不彻底以及水生植物过度繁殖等。众所周知,鱼塘水质变差会引起

池塘水体缺氧以及引发鱼病,进而造成鱼类中毒甚至死亡。因此蚕沙的投放要适量,减少蚕沙营养成分在水体中的流失及腐烂,提高蚕沙的利用率。塘鱼及其他水生生物的生长发育过程受鱼塘水质环境影响,同时其生命活动对鱼塘产生反馈作用。鱼塘成为其分泌物和排泄物的活动空间,高密度养殖区会导致塘鱼的粪便、残饵等有机物质沉积于鱼塘底泥。

有机质是水体的主要污染物之一,并能在水体底泥中进行累积和存储。姚树峰^[44]将鱼塘水质恶化归因于投施了未发酵完全的粪肥以及池塘底泥厚度大等因素;氮和磷是引起水体富营养化的主要因子,进入水体的氮磷元素由于重力沉降累积于底泥中,在一定的条件下又再释放出来造成了水体富营养化。因此,当鱼塘中投施未发酵好的蚕沙后,蚕沙中氮和磷等有机物沉积于鱼塘底泥中,与底泥中氮、磷在水体理化性质发生变化时,共同释放引起了鱼塘系统水质恶化。对于累积年限较长的底泥来说,底泥中的氮、磷向水体的释放量较多,造成底泥表层的氮、磷含量较少^[45]。因此,底泥中粪便、残饵对水体水质具有较大影响,尤其当水体处于缺氧状态下,沉积在底泥中的粪便、残饵会发酵出有害物质(如 NH_4^+ 、 H_2S 和 CH_4 等)。

3.3 蚕沙的资源化利用

未经处理的蚕沙往往含有害微生物和有毒物质,直接暴露在空气中不仅会对周围环境造成污染,还会使隐藏在蚕沙中的病原微生物大量繁殖,从而影响到桑基鱼塘路面子系统正常的物质循环。因此,对蚕沙进行堆沤处理,除去其中的有毒微生物或降低有害物质(如亚硝酸盐和抗生素等)的含量显得非常重要。在堆沤作用下,铵态氮、硝态氮会转化为其他含氮有机物;有效磷会转化为其他含磷有机物,氮素和磷酸能够实现营养成分最大化。杜周和等^[46]研究发现蚕沙发酵过程中总氮、总磷和有效磷的含量随着时间加长而表现出缓慢增加的趋势,而有效氮则呈现先下降后升高的现象。因此,蚕沙在堆肥发酵过程中通过微生物的作用固定蚕沙中的部分有效养分,而后又会将有效养分释放出来。

目前,蚕沙的堆沤方式主要分为开放式和封闭式两种。由于气候环境和堆肥条件等因素的变化,不同堆沤方式可能会使蚕沙的品质和营养成分存在较大的差异,开放式和封闭式的处理方式

会使蚕沙的理化指标产生不同变化。刘顺翱等^[5]研究发现,开放式的蚕沙堆沤方式发酵速度快、温度高,随着堆沤过程中堆沤总质量的下降,总磷的含量呈现先上升后下降的趋势;而总氮在堆沤期间 5~40 d 内出现了两次明显的上升;相对而言,封闭式堆沤的发酵速度慢,在堆沤过程中总氮的含量基本不变,总磷含量总体变化平缓。

同时,由于封闭式堆沤适用于氧气不足且含水量多的情况下,对堆体进行厌氧处理。由于堆沤中有机物的降解速率缓慢, NO_3^- -N 在反硝化作用下产生 N_2 、 N_2O 等含氮气体,易造成有机酸的积累。其次,在厌氧条件下堆体没有升温的过程,总磷基本呈现平缓的状态,很难达到消除致病微生物的要求,因此,蚕沙的堆沤最适宜的方式是开放式堆沤。

pH 是衡量好氧堆沤中微生物环境状况的一个主要指标,适宜的 pH 能提升微生物在堆肥中的作用。具体表现在升温阶段时,开放式堆沤在氧气的参与下,随着发酵温度的升高,微生物分解有机氮等物质,含氮有机物在氨化作用下转化为 NH_4^+ -N,使得发酵过程中 pH 升高,当温度降低时, NH_4^+ -N 又经过硝化作用转化为 NO_2^- -N 继而被氧化为 NO_3^- -N,降温使得 pH 下降趋于平稳并稳定在 9.9 左右^[47]。

蚕沙堆肥发酵结束后,蚕沙会转变成黑色的块状物或粉状物^[48]。经无害化堆肥处理后的蚕沙是一种绿色健康的有机肥,富含有机质和氮磷钾等养分。该有机肥用于桑树的培育中,能显著增加土壤有机质含量,提升土壤肥力,促进桑树的生长发育。总而言之,蚕沙理化性质的变化要实现稳定的发展,必须从实际出发,因地制宜的制定堆肥方法如堆沤完成后适量添加石灰等混合物。

4 池塘底泥对陆面生态系统的影响及资源化

4.1 底泥的物质分布特征

底泥中富含大量的营养物质,同时也存在着大量病原菌、寄生虫、有毒重金属和有机污染物。鱼塘底泥沉积物中氮元素主要分为有机氮和无机氮,有机氮包括腐殖质、蛋白质、氨基酸和尿素等,而无机氮主要包括硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、氨态氮(NH_4^+ -N);磷主要分为有机磷和无机磷^[49]。王秋君等^[50]研究表明,堆肥过程由于微生物作用(氨化作用、硝化作用和反硝化作

用),使得底泥中有机氮含量总体降低,导致无机氮(氨态氮、硝态氮)含量总体升高;然而由于有机质的分解,水分的蒸发以及底泥体积和总量的下降,使得底泥总磷含量明显升高,但有效磷含量变化不大。

谢文平等^[51]对珠江三角洲(广州、惠州、肇庆、茂名)的14个养殖鱼塘水体和底泥中的重金属浓度进行了监测分析,研究发现水体中As、Cu、Cr、Hg和Pb的浓度分别高于渔业水质标准的21.4%、64.3%、7.1%、35.7%和14.28%;底泥中As、Cd、Cu、Cr、Hg、Pb和Zn等7种重金属元素浓度均超国家海洋沉积物质量标准1类,且Hg污染程度超国家海洋沉积物质量标准2类。鱼塘中的沉积物积累过多会引发一系列环境问题,例如养殖产量降低、池塘缺氧、池水老化、爆发性鱼病等^[52],进而威胁到水体中鱼类的生存与发育,对人体健康造成潜在威胁。为了保持鱼塘的水质健康,应及时清除塘底过多的底泥。

4.2 堆肥对底泥理化性状的影响

鱼塘底泥经过堆肥处理后用作桑树肥料,可明显提高营养利用率,获得较高的经济效益。若底泥不经处理直接施加在陆面上,则会导致底泥中的有害有毒物质再释放,引起土壤及周围水体发生二次污染^[53],对植物产生毒害作用^[54],并且污染物会随着食物链在生物体内富集,最终威胁到整个桑基鱼塘陆面子系统的生态安全。因此,在池塘底泥利用前进行减量化、无毒害处理是必要的,目前常采用的方法是堆肥处理,堆肥包括好氧堆肥和厌氧堆肥^[55]。与厌氧堆肥相比而言,好氧堆肥可以最大限度地去除底泥中地寄生虫、病菌等有害微生物^[54]。此外,堆肥处理还能够显著降低底泥中重金属的生物可利用性。刘莹等^[56]研究发现,堆肥处理不能降低污泥中的重金属浓度,但是会对重金属形态产生影响,能降低污泥中Cd、Cu、Cr、Pb、Ni、Zn等重金属的有效态含量,从而降低重金属的活性及其环境毒性。

4.3 底泥的资源化利用

桑基鱼塘系统中桑树所需养分主要通过鱼塘中的底泥供给。塘泥具有供肥、保肥和调节水质等重要作用,以厚度为15~20 cm为宜,过厚的底泥会沉积大量的氮、磷元素,造成水体富营养化和水体含氧浓度不足等潜在风险^[57]。陶冶等^[58]发现不同养殖模式下进入池塘的氮、磷营养盐都只有少数被养殖生物吸收利用,大部分未被吞食的

营养盐在水中溶解或者通过沉降进入底泥。潘红玺等^[59]研究表明,相当大部分的饵料不能被鱼类吸收和利用,由于生物碎屑和鱼类排泄等因素,导致淤积物越来越多,底泥中氮、磷、有机质含量随着塘龄的延长逐渐积累。底泥沉积是池塘养殖系统氮磷输出的主要形式,其输出量占总输出量的一半以上,其次是渔获输出,占了20%左右^[60]。

鱼塘底泥经过堆肥处理后用作桑树肥料,可以明显提高营养盐的利用率,获得较高的经济效益。氮、磷是桑树生长发育所需的主要营养物质,底泥中的氮、磷浓度水平和物质形态最终会影响到桑葚和桑叶的产量和质量。氮是植物体蛋白质、核酸、磷脂、叶绿素、酶等的构成要素,而磷在植物体内参与光合作用、呼吸作用、能量储存和传递、细胞分裂、细胞增大和其他一些过程。桑树通过对氮、磷的吸收满足自身的生长发育过程,并且可以大大减少桑基鱼塘系统水体中这两种营养元素富营养化主导因子氮、磷的流入。冯大兰等^[61]研究发现,桑树生长7个月后,底泥中的氨态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)和有效磷含量显著降低,这表明桑树根系通过主动运输与被动运输吸收土壤中的矿质元素,根系吸收矿质元素的主要部位是根尖的顶端区和根毛区。土壤孔隙水中或吸附在土壤胶粒表面的离子通过离子交换作用或扩散作用首先吸附在根尖细胞表面,然后经皮层和内皮层的质外体和共质体运输进入到导管,并随蒸腾作用流运向地上部,进而将无机氮、无机磷等营养元素同化为植物体内的蛋白质、磷脂等有机构成^[62]。

5 结论与展望

桑基鱼塘生态系统是一种高效的农业物质循环利用模式,蕴藏着巨大的价值。桑叶作为桑蚕主要的食物来源,桑叶的高蛋白含量和其他活性营养物质可促进桑蚕的生长发育。由蚕粪和未吞食完全的桑叶组成的蚕沙仍含有丰富的营养物质,经过堆沤处理后可用于喂鱼。随着池塘运行时间的推移,塘鱼的粪便、残饵等有机物质沉积于鱼塘底泥。底泥中富含大量的营养物质,同时也存在着大量病原菌、寄生虫、有毒重金属和有机污染物。通过定期挖掘底泥,经过堆肥处理后可用作桑树肥料,同时能够显著降低底泥中重金属的危害作用,提高生物可利用性,并明显提高营养盐的利用率,获得较高的经济效益。

桑基鱼塘农业生产模式发展至今,历经数千

年,仍具有巨大的经济、文化和科学价值。目前桑基鱼塘缺乏发展动力,面临发展困境,迫切需要更多相关专家学者的关注,并从更深层次揭示桑基鱼塘生态系统内部潜在的科学规律,从而为桑基鱼塘的传承和保护提供参考依据和解决方案。

参考文献:

- [1] 郭佑. 湖州桑基鱼塘: 穿越 2500 年的生态农业“活化石”[J]. 中国生态文明, 2016(1): 82-84.
- [2] 胡保同, 杨华祝. 种桑-养蚕-养鱼人工生态系统[J]. 农村生态环境, 1985(2): 37-40.
- [3] 钟功甫. 珠江三角洲的“桑基鱼塘”——一个水陆相互作用的人工生态系统[J]. 地理学报, 1980(3): 200-209, 277-278.
- [4] 陈彩霞, 黄光庆, 叶玉瑶, 等. 珠江三角洲基塘系统演化及生态修复策略——以佛山 4 村为例[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 328-340.
- [5] 刘顺翔, 吴昊, 胡钧铭, 等. 绿肥、蚕沙有机肥配施化肥对免耕稻田土壤碳库平衡的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(11): 2690-2696.
- [6] 廖森泰. “系列蚕沙肥料创制及产业化开发”项目通过成果评价[J]. 蚕学通讯, 2020, 40(4): 58.
- [7] 龚建周, 蒋超, 胡月明, 杨颢. 珠三角基塘系统研究回顾及展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(7): 1236-1246.
- [8] 吴怀民, 叶明儿, 楼黎静, 等. 湖州桑基鱼塘生态系统保护的现状与规划[J]. 蚕桑通报, 2017, 48(2): 40-42, 47.
- [9] 刘少慧. 湖州桑基鱼塘系统经营模式评估与选择[D]. 济南: 山东师范大学, 2018.
- [10] 王谢, 唐甜, 张建华. 桑树 13 种不同营养元素单一缺乏时生长期落叶情况的定量分析[J]. 中国蚕业, 2020, 41(3): 1-3.
- [11] 刘镜茹, 沈世伟. 全球重要农业文化遗产湖州桑基鱼塘系统保护与旅游发展研究[J]. 现代化农业, 2020(11): 57-60.
- [12] 黄龙, 韦木莲, 吴雅丽, 等. 蛹肽蛋白饲料与普通饲料对草鱼生长影响的比较分析[J]. 科学养鱼, 2019, 363(11): 67-68.
- [13] 吴怀民, 金勤生, 殷益明, 等. 浙江湖州桑基鱼塘系统的成因与特征[J]. 蚕业科学, 2018, 44(6): 947-951.
- [14] 刘围. 水肥调控及外源物输入对桑园土壤氮素循环的影响研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- [15] 任超. 桑叶的饲用价值及其饲料化利用研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(9): 146-149.
- [16] 梁璐, 黄慧学, 陈路, 马健雄. 桑叶降血脂作用的研究进展[J]. 广西中医药, 2021, 44(2): 74-76.
- [17] 吴婧婧, 陆春霞, 董桂清, 等. 广西蚕区 7 个不同桑树品种不同部位桑叶营养成分分析[J]. 广西蚕业, 2020, 57(2): 1-8.
- [18] 任超. 桑叶的饲用价值及其饲料化利用研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(9): 146-149.
- [19] 张茜, 李淑芳, 胡山林, 等. 关于夏季和秋季的桑树施肥技巧探讨[J]. 农业技术与装备, 2021(1): 135-136.
- [20] 杨贵明, 张夫道, 薛秋生, 等. 桑树体内氮、磷分布及品种间营养效率差异研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 106-111.
- [21] 尚二凤, 史书, 林晓, 等. 三峡库区紫色土坡耕地不同桑树-作物配置模式下土壤氮磷的淋溶[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1559-1564.
- [22] 袁颖. 氮、磷、钾在桑树生产中的作用[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2018(1): 13, 15.
- [23] 许振羽, 李学鹏, 杜宇, 等. 桑树根际土壤微生物对间作和施氮的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1983-1992.
- [24] 田硕. 桑树的药用价值[J]. 基层医学论坛, 2019, 23(11): 1577-1578.
- [25] 曹美琪. 新资源蛋白桑叶片主要药效成分及其体外降糖活性评价研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2020.
- [26] 黄扬玉, 浦月霞. 蚕桑资源药用价值开发与利用的探讨[J]. 广西蚕业, 2019, 56(1): 47-51.
- [27] 刘明鲁, 张建平, 张雅秋, 等. 桑树资源多元化开发与利用[J]. 蚕桑茶叶通讯, 2018(3): 13-14.
- [28] 李名洁, 李昌瑜, 王泽霞, 等. 桑不同药用部位降血糖有效成分及作用机制研究进展[J]. 广东化工, 2020, 47(9): 117-119.
- [29] 王婷婷, 马天宇, 李琪, 等. 桑叶化学成分及生物活性研究进展[J]. 食品与药品, 2018, 20(5): 390-393.
- [30] 梁贵秋, 祁广军, 何雪梅, 等. 广西蚕区 21 个桑树品种的桑叶营养与保健品质评价[J]. 蚕业科学, 2015, 41(4): 701-709.
- [31] 金超, 陈成, 李少辉, 等. 华东蚕区 5 个栽培桑品种叶片中的主要活性物质含量测定[J]. 蚕业科学, 2017, 43(2): 288-295.
- [32] 毛晓瑜. 模拟氮沉降和镉处理对不同性别桑树幼苗生理生态特性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [33] 杨昌敏, 易文裕, 王攀, 等. 四川桑园施肥技术现状及机械化需求调研[J]. 四川蚕业, 2020, 48(4): 10-12.
- [34] 张金祥, 高建华, 陈世良. 不同用桑量与蚕种产量质量关系的试验初报[J]. 北方蚕业, 2010, 31(2): 20-22, 29.
- [35] 路婧中. 桑蚕营养传输及丝织品后处理过程中轻稳定同位素变化的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [36] 王彬, 郭志强, 邝良德, 等. 饲料补充鲜桑叶对母兔繁殖性能、生殖激素和生化指标的影响[J/OL]. 中国畜牧杂志: 1-10[2021-09-03]. <https://doi.org/10.19556/j.0258-7033.20201201-01>.
- [37] 张丽丽, 章玉萍, 范涛, 等. 喂食桑叶粉对黄粉虫生长发育情况的影响[J]. 农学报, 2021, 11(8): 80-84.
- [38] 苏琳瑛. 光周期对家蚕生长发育的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
- [39] 蒋勇兵, 黄仁志, 蒋诗梦, 等. 蚕沙的多元化利用研究进展[J]. 北方蚕业, 2019, 40(1): 1-7, 12.
- [40] 李冬兵, 黄先智, 刘学锋, 等. 桑枝叶和蚕沙混合青贮前后营养变化及饲料价值评价[J]. 饲料研究, 2021, 44(10): 83-87.
- [41] 王谢, 张建华, 姚莉, 等. 蚕沙组分的计量分析及开发应用概况[J]. 蚕业科学, 2016, 42(5): 918-925.
- [42] 李秀汉, 陈芳艳, 钟杨生, 等. 粤西蚕区蚕沙堆肥及堆肥质

- 量的调查研究[J]. 广东蚕业, 2016, 50(1): 22-25.
- [43] 刘诗雨. 元阳梯田区大鱼塘小流域水质分析与模糊综合评价——以元阳梯田区大鱼塘小流域为例[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(3): 70-74.
- [44] 姚树峰. 池塘水质恶化原因及对策[J]. 黑龙江水产, 2015(3): 19-21.
- [45] 张振宇, 代俊峰, 谢晓琳, 等. 漓江上游金龟河试区氮磷浓度时空差异性分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 101-106, 112.
- [46] 杜周和, 严旭, 张智勇, 等. 家蚕的营养摄食特性及蚕沙的饲用价值[J]. 江西农业学报, 2021, 33(4): 91-97.
- [47] 李苹, 付弘婷, 张发宝, 等. 不同通风条件对蚕沙堆肥化效果的影响[J]. 广东蚕业, 2015, 49(1): 20-24.
- [48] 宾荣佩, 蓝必忠, 滕伟国, 等. 蚕沙和桑枝废菌包无害化堆肥还田对石漠化地区桑树产量及土壤改良的效果研究[J]. 中国蚕业, 2020, 41(2): 16-21.
- [49] 钟全福. 罗非鱼为主多品种混养池塘氮磷收支[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(6): 48-53.
- [50] 王秋君, 郭德杰, 马艳. 连续施用有机肥下设施土壤碳氮磷化学计量学特征及其与土壤有效磷的关系[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 893-901.
- [51] 谢文平, 余德光, 郑光明, 等. 珠江三角洲养殖鱼塘水体中重金属污染特征和评估[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 636-641.
- [52] 郭程亮. 鱼塘淤泥过多的危害及措施[J]. 渔业致富指南, 2016(16): 35-36.
- [53] 王雪纯, 白波, 胡娜, 等. 黑臭水体底泥污染评估及治理技术[J]. 应用化工, 2021, 50(5): 1439-1443, 1448.
- [54] 曾小平, 姚睿, 蔡锡安, 等. 底泥养分富集条件下 11 种水生植物的光合氮利用效率[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 4923-4931.
- [55] 刘耀. 生物炭添加对农业废物底泥混合堆肥中重金属和细菌群落影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [56] 刘莹, 李慧颖, 王文祥. 底泥重金属污染修复技术研究进展[J]. 资源节约与环保, 2021(7): 13-15.
- [57] 王仁华. 浅谈鱼塘淤泥的性质及处理方法[J]. 江西水产科技, 2015, 142(2): 18-19.
- [58] 陶治, 朱健, 李冰, 等. 基于氮、磷收支的人工湿地-池塘循环水养殖系统净化效果评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(2): 36-45.
- [59] 潘红玺, 胡洪云. 放养前后鱼塘沉积物中氮、磷、有机质、色素的变化及环境意义[J]. 湖泊科学, 1998(3): 39-42.
- [60] 王彦波, 岳斌, 许梓荣. 池塘养殖系统氮、磷收支研究进展[J]. 饲料工业, 2005(18): 49-51.
- [61] 冯大兰, 黄小辉, 向仲怀, 等. 桑树在模拟三峡库区消落带干旱条件下的生长状况及土壤氮磷元素的变化[J]. 蚕业科学, 2013, 39(5): 862-867.
- [62] 戴玉伟, 张晓玲, 张玉华, 等. 浅谈桑树所需营养及其吸收利用[J]. 防护林科技, 2010, 97(4): 91-92.

Research Progress of Material Recycling and Utilization in Mulberry-fish Pond Land Surface System

CHEN Jin-jie^{1,2}, CHENG Yao^{1,2}, ZHANG Xin-ying¹, XIE Xiang¹, ZHANG Chi³, DAI Jun³, LIU Ke-xue^{1,2}

(1. College of Resources and the Urban Planning, Guangzhou Xinhua University, Guangzhou 510520, China; 2. Guangdong South China Space Planning Research Institute, Guangzhou 510642, China; 3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to reveal the underlying scientific rules within the mulberry pond ecosystem, so as to promote the inheritance and protection of mulberry ponds. This article systematically combed the basic model, material source and fate, and material circulation process of the land surface subsystem of mulberry fish ponds, and analyzed the mineral elements and nutrient content of mulberry leaves, the influencing factors of mulberry yield and quality, and the content of active ingredients in mulberry leaves. The impact of the amount of mulberry used on the yield and quality of silkworm eggs, and the influencing factors of nutrients material digestibility of mulberry leaves by silkworms, revealed the characteristics of the impact of mulberry leaves on the mulberry fish pond ecosystem. By analyzing the distribution characteristics of nutrients in silkworm sand, the influence of silkworm sand on the water quality of mulberry pond system, and the resource utilization of silkworm sand, the influence characteristics and resource utilization of silkworm sand on mulberry pond ecosystem were summarized. Based on the analysis of the material distribution characteristics of pond sediment the influence of compost on the physicochemical properties of pond sediment the resource utilization of pond sediment on land ecosystem was summarized.

Keywords: mulberry dike-fish pond; land surface subsystem; nitrogen; phosphorus; material circulation