

三峡库区循环农业生态系统构建及 控氮减磷效果验证试验^①

熊 伟¹, 孔文斌¹, 冯 洋¹, 杨灿芳¹, 王 飞²,
程 渝³, 王 波⁴, 倪九派⁵, 谢德体⁵

1. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121; 2. 农业部生态农业与资源保护总站, 北京 100125;
3. 重庆市农业委员会, 重庆 401121; 4. 重庆市水产技术推广站, 重庆 400020;
5. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716

摘要: 三峡工程建设对农业持续发展、移民安稳致富、生态环境保护等带来了重大影响. 为减轻和避免三峡工程对库区生态环境、农业生产和国家战略性淡水资源产生的负面影响, 将三峡环库屏障区、消落区和水域区作为整体, 实施以屏障区柑橘、消落区耐淹牧草、水域区天然鱼塘为重点的环库特色产业带建设工程, 构建三峡库区循环农业生态系统, 依托特色生态农业带阻控面源污染. 实证证明, 应用柑橘营养诊断配方施肥技术, 果园营养元素利用率显著提高, 果园出口端径流可达到地表Ⅱ—Ⅲ类水质标准; 消落区耐淹草场底端的入库径流 NH_4^+-N 未检出, NO_3^--N 较果园径流降低 1.5%, 可溶性总磷减少 48.6%; 水域区实施鱼类增殖放流工程, 觅食绿藻浮萍等, 固定富集水域中的氮磷. 项目通过农业生产—产品销售途径, 将富集的氮磷大量移出库区, 扭转了三峡库区生态环境退化、农业萎缩和环境污染加剧的势头, 保护了国家淡水资源库安全, 可为同类地区修复退化生态系统、发展循环生态农业提供借鉴.

关 键 词: 三峡库区; 柑橘; 面源污染; 生态农业; 循环农业; 农业生态系统

中图分类号: S181.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)06-0010-11

三峡库区是世界最大的人工水库和中国贫困人口聚集区, 2003 年蓄水后, 在逐步实现蓄水、通航和发电三大目标的同时, 给农业可持续发展、移民安稳致富、生态环境建设和国家战略性淡水资源库保护等带来了新的挑战: 大批良田好地被淹, 库区移民人均耕地面积只有 386.7 m^2 , 远低于全国农村人均 $1\,013.4 \text{ m}^2$ 的水平, 因承载着超负荷的人口和环境保护的重担, 人地矛盾突出, 同时土地的高负荷利用, 使生态系统处于不良状态^[2]; 新生消落区原有植被大多被破坏, 每年 2—4 月, 水库放水发电, 腾出落差高达 30 m 的防洪库容, 消落区出露成陆, 形成面积达 348.9 km^2 的“拟似荒漠化区域”, 基本丧失拦截、消纳和清除农业面源污染的功能, 同时大批浅滩鱼类产卵孵化场成为陆地, 给环境保护和鱼类繁衍造成了不利影响; 以种养废弃物的排放、化肥农药的过量施用为主体的面源污

① 收稿日期: 2016-06-29

基金项目: 国家引导类科技计划及专项(2014GXS4D144); 国家科技支撑计划项目(2006BAK04A14); 农业部“现代生态农业基地技术试验示范”项目(2110402-9); 重庆市科技集成示范项目(cstc2013jcsf80017); 重庆市现代特色效益农业产业技术体系项目(2015-04).

作者简介: 熊 伟(1964-), 男, 四川成都人, 研究员, 主要从事园艺作物生理、生态农业、循环经济等的研究.

通信作者: 谢德体, 教授, 博士.

染日益严重, 随地表径流携带的氮、磷和泥沙等未经拦截, 长驱直入长江^[1-3], 危害国家战略淡水资源库安全, 成为三峡库区最大的污染源, 是不容忽视的生态环境问题, 对库区可持续发展、移民安稳致富、生态环境保护等带来重大影响^[4-7].

农业与生态的和谐发展已成为世界农业发展的共识和目标. 2009 年美国把有机农业列入行政管理范畴, 欧洲完善了农业生态补偿制度, 应对水源环境的污染^[8-10]. 借鉴国际水域环境治理经验, 发展生态农业是应对气候变化和人为干扰、有效治理江河湖泊面源污染的重要途径^[11]. 为避免太湖、滇池等以富营养化为特征的湖泊水质污染在三峡水库重演, 保护国家战略淡水资源库安全, 项目运用动植物生理生态学原理, 采取生物、工程与农艺措施相结合的方法, 建设库岸屏障区柑橘、消落区草场、水域区渔场三条特色生态产业带, 构建多重循环农业产业链, 配套沼液管灌和雨水径流拦截沟渠, 依托柑橘、草饲料、淡水鱼等特色产业^[12], 多层拦截、消纳面源污染, 保护水资源安全, 改善生态环境, 初步解决了三峡库区移民增收、特色经济发展、生态环境建设和长江淡水资源保护等世界性难题^[13-16].

1 试验研究方法

1.1 构建环库循环农业生态系统

该系统由 4 部分组成: 1) 柑橘、耐水淹牧草和草食牲畜、长江淡水鱼等三条特色生态农业带; 2) “畜—沼—果—渣—饲”等四重循环农业链; 3) 建立“三带四链五网”面源污染阻控网络; 4) 建立和完善果树营养诊断^[17]、库岸面源污染和库区水质监测体系. 基本覆盖三峡水库 1 082 hm² 水域区, 落差高达 30 m, 面积为 348.93 hm² 的新生消落区, 总长 5 311 km(包括干、支流岸线)的库岸带.

围绕循环农业运行, 针对传统“畜—沼—果”循环中, 普通沼液管灌系统会产气爆管、生成难溶磷酸镁铵(尿垢)结晶堵塞管道等关键环节问题, 研发了沼液抗堵防爆管灌装备^[18-19]、橘渣有机复合肥及制备工艺^[20]、“畜—沼—果—饲”、“果—渣—肥”的闭合生态循环工艺, 以及配套“畜—沼—果—草”和“水循环”模式, 集成为四重交叉循环工艺(图 1); 并配套生态缓冲堰塘, 沼液管灌工程等, 形成五层拦截网; 构建了多业共生、要素耦合、整体循环、综合利用的循环生态农业带^[1], 有效提高了废弃资源利用率. 应用四重循环链, 首创“三带四链五网”生态拦截模式(图 2), 发明了“一种水库区特色农业生产及面源污染拦截生态系统”^[21], 实现多层拦截、多重阻控和市场化移除面源污染, 基本扭转了库区生态退化、农业萎缩和环境污染加剧的趋势.

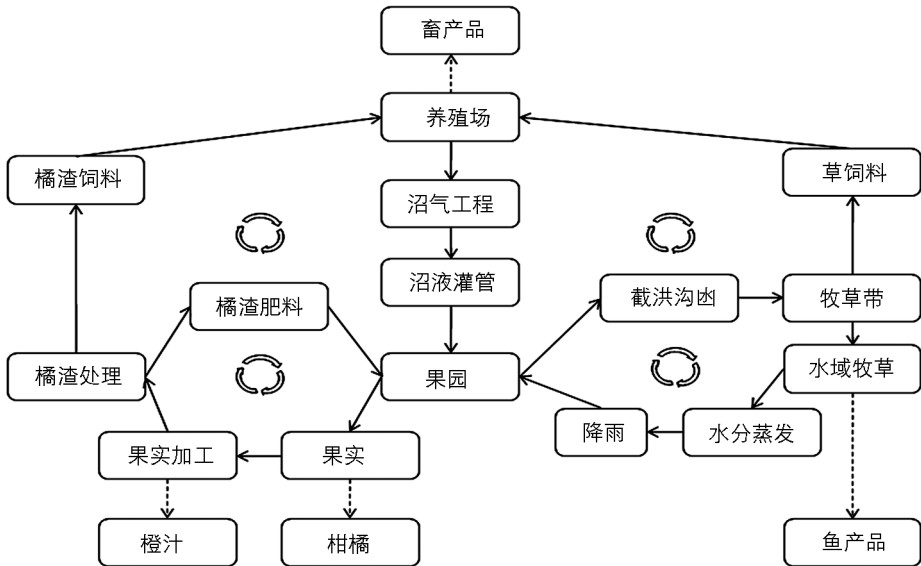
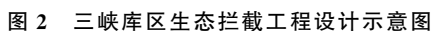


图 1 四重循环农业模式



为了长期监测屏障果园营养、水土流失、面源污染情况,指导控氮减磷,控制农业生产对长江水体的污染;2007年以来,项目在三峡库区的14个区县,推广实施柑橘营养诊断配方施肥,建立监测采样单元500个,面积3 400 hm²,连续定量检测柑橘园土壤和树体13种矿物质营养水平,指导果农精准施用有机配方肥或沼液肥.本文根据三峡屏障区雨水径流入库的主要途径,集成环库生态农业带氮磷阻控模式,选择位于长江支流大宁河大昌湖段、巫山县大昌镇新胜村果园为典型试验示范园区,面积200 hm²,进行运行效果分析.试验园设在兴胜村果园的巫山大昌脐橙专业合作社基地,面积133 hm²,对照园设在兴胜村果园兴胜红橙专业合作社基地,面积67 hm²,两基地地块相连,为同一面坡,屏障区柑橘带、消落区耐淹牧草带、水域区生态渔场均在同一坡面,立地条件基本一致,由排水沟和消落带牧草区分隔,位置如图3.

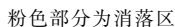


图3 三峡库区生态农业带典型示范区位置图

1.2.1 环库生态农业带阻控模式

在三峡库区建立屏障区柑橘—消落区耐淹牧草—水域区增殖放流拦截阻控模式,通过柑橘、牛羊和淡水鱼等特色农业,分层拦截、消纳和富集氮磷,经农产品产销链、食物链从库区移除,用市场手段,低投入、高效益解决过剩氮磷。

1.2.1.1 屏障区柑橘试验示范园. 试验示范园大昌晚熟脐橙基地为 2009 年建设的移民果园,位于长江支流大宁河畔,至山顶全部是柑橘园. 果园径流全部来源于降雨,品种为脐橙,失管荒芜 2 年. 2011 年组建合作社,按 $600\text{ 株}/\text{hm}^2$ 去弱株、补缺株,应用营养诊断配方施肥技术,控氮磷减投入,并在基地下部的消落区建设近 10 km 耐淹牧草带,拦截果园径流携带的泥沙和氮磷,净化径流. 对照果园兴胜村脐橙合作社基地,2010 年定植,栽植密度 $600\text{ 株}/\text{hm}^2$,果园下方消落区尚未进行耐淹牧草带建植。

1.2.1.2 消落区耐淹牧草带. 2010 年三峡水库 175 m 试验性蓄水以来,项目在消落区建设耐淹牧草带示范工程,发展草饲料,所选牧草为巫山县大昌湖畔的乡土野生禾本科狗牙根属中国狗牙根种多年生耐淹牧草优选品种,命名为“三峡 1 号”^[1]. 该牧草节间贮藏有空气,可在当年 10 月至翌年 4 月的 $145\sim 175\text{ m}$ 消落区淹没浸泡下存活近 5 个月,经人工去除杂草、逐年淹没淘汰和植物种属间竞争,该品种形成优势群落,逐步建立以耐淹牧草为主体的消落区牧草生态系统,能有效拦截泥沙和面源污染物. 吸收的氮磷通过放牧、刈割或蓄水淹没后被鱼类觅食等手段富集,并通过农产品产销途径移出库区(见图 4)。



(a) 退水后叶片被觅食的牧草茎秆开始发新芽



(b) 9月牧草带厚 50 cm



(c) 退水后的对照区

图 4 消落区耐淹牧草带示范基地及其对照组

1.2.1.3 水库区增殖放流工程. 为应对三峡工程截流后,成鱼产卵孵化场所被毁、渔业资源逐年减少的情况,重庆市投资 1.5 亿元,全面取缔网箱养鱼,建设 15 个增殖放流渔种场,实行大水散养. 根据水质监测情况,在最初主要放流中华鲟、胭脂鱼等珍稀鱼类的基础上,增加了草鱼、鳊鱼、鲢鱼、鲤鱼等“四大家鱼”放流量,优化了增殖放流结构^[22-24]. 本文围绕库区水域开展监测。

1.2.2 监测和诊断分析方法

屏障区果园采用营养诊断配方施肥技术,监测树体营养,指导化肥投入;屏障区果园出口端和消落区入库进行径流监测,并统计柑橘产量,用农产品产量及其氮磷质量分数水平,推算屏障区氮磷富集和移除效果;库区用捕捞量和典型断面水质监测,用鱼类捕捞量及其氮磷质量分数水平,推算水域区氮磷移除效果.通过果树枝叶、牧草植物、绿藻绿萍和未捕获鱼类等富集的氮磷,滞留在土壤、水域等环境中,没有移除本区域的,未计入氮磷移除量.因放牧和刈割量较小,消落区牧草主要在淹没时被鱼类觅食的,不单独计算牧草的氮磷富集和移除量.

屏障区果园监测:营养诊断配方施肥是提高柑橘单产的关键技术,营养失衡可依靠叶片、土壤营养检测和叶片缺素失衡症状观察进行诊断^[25];由于不同品种、砧穗组合、土壤 pH 和元素间的拮抗,都会影响柑橘对土壤营养的吸收,因此,土壤营养监测指标不能准确反映树体营养水平^[26-27];2 种以上的复合型营养丰缺失衡会干扰叶片的典型失衡症状,不易准确辨别.土壤和叶片采样和检测,按照《DB50/T 487-2012 柑橘营养诊断配方施肥技术规程》,试验果园每年检测 5 个定点采样单元,对照果园每年检测 3 个采样单元,取平均值分析,每个采样单元面积为 13.33 hm² 左右,叶片采样每年 1 次,采样单元为 6~13 hm²,采样时间为 9-10 月,采样对象为春梢营养枝叶片;土壤采样一般 3~5 年 1 次,作诊断施肥的参考;土样采集时和叶片采样点一一对应,由区县柑橘营养前处理实验室对所采土壤和叶片样进行前处理,然后将制备的干燥样送到农业部柑橘苗木质量检测测试中心进行检测.支撑柑橘营养诊断配方施肥技术,2014 年农业部已将该技术定为全国农业主推技术(农办科[2014]9 号),向全国推介发布.

径流水质监测:主要是消落带牧草拦截的入库径流和小流域柑橘带果园对溪河水质阻控效果监测.在屏障区果园出口端、消落区草场底端建立水质监测点,监控雨水径流中的氮磷等富营养化指标,取样时间为未施肥期 5 月春旱末期,送农业部柑橘苗木质量检测测试中心检测.

水域区监测:重点是库区鱼类捕获量,出入库段和重要节点水文站断面水质监测,核算氮磷消纳量,评价库区水环境修复情况,监测数据从《长江三峡工程生态与环境监测公报(2002-2015)》中获取^[28].

氮磷移除量计算:化肥投入重点监测氮磷,氮磷移除以柑橘、鱼等农产品产量及其富集的氮磷质量分数水平为计算依据,根据监测,柑橘果实平均氮磷质量分数为 0.71%(氮磷均以纯量计),鱼类平均氮磷质量分数为 2.89%.化肥利用率为单位面积投入的化肥中氮磷总量与柑橘果实中富集的氮磷总量的百分比,评估实物氮磷从库区环境中的移除水平,未计算柑橘枝叶根茎等富集和滞留在土壤中的氮磷量.

2 结 果

2.1 屏障区柑橘带控减氮磷效果

2.1.1 果园营养诊断检测数据

试验示范果园:2012-2014 年检测结果见表 1.被检果园营养失衡率 100%,根据柑橘控丰补缺的原则,按照《DB50/T 487-2012 柑橘营养诊断配方施肥技术规程》,制定 2013-2015 年度营养诊断施肥方案;基础用肥为瑞宝牌带缓释包衣,有机质 $\geq 20\%$,N,P,K 质量分数为 13%,3%,6%的硫酸钾型橘渣有机配方肥,替代常规 N,P,K 质量分数为 15%,15%,15%的无机复合肥^[20];根据不同年份缺素水平,通过叶面喷施 0.2%硫酸镁+0.2%硫酸锌 2~3 次,花前单独喷施 1 次硼砂,补充缺乏微量元素锌、硼等;病害主要根据检测指标,遴选硫酸铜、代森锰锌等矿质农药,在防控枝枯、果实腐烂等病害的同时,用药补充微肥,平衡营养,通过提高单位产量,增加了氮磷吸收富集能力.

对照果园:项目按照传统管理方法,制定 2013-2015 年度果园施肥管理方案;幼树期氮肥为主,开花投产期为复合肥.营养检测仅用作果园监测用途,没有用于指导配方施肥,没有按照检测数据对果园进行控丰补缺处理;2012-2014 年检测结果见表 1,营养失衡率 100%.

表 1 2012—2014 年大昌柑橘园营养检测结果

年 度	2012 年 10 月				2013 年 10 月				2014 年 10 月			
	试验园		对照		试验园		对照		试验园		对照	
	检测 数据	与标 准比	检测 数据	与标 准比	检测 数据	与标 准比	检测 数据	与标 准比	检测 数据	与标 准比	检测 数据	与标 准比
N/(g·kg ⁻¹)	25.73	O	28.01	H	22.25	L	22.73	L	24.82	L	22.95	L
P/(g·kg ⁻¹)	1.41	O	1.35	O	1.27	O	1.25	O	1.60	O	1.69	H
K/(g·kg ⁻¹)	9.43	L	8.84	L	9.72	L	8.62	L	11.94	O	9.14	L
Ca/(g·kg ⁻¹)	35.11	O	36.68	O	43.00	O	46.63	O	43.26	O	37.03	O
Mg/(g·kg ⁻¹)	2.72	L	2.87	L	3.05	O	2.85	L	2.40	L	3.12	O
S/(g·kg ⁻¹)	2.47	O	2.55	O	2.12	O	2.03	O	2.09	O	1.9	L
Fe/(mg·L ⁻¹)	86.47	O	106.46	O	90.21	O	79.66	O	61.35	O	117.74	O
Mn/(mg·L ⁻¹)	27.16	O	27.31	O	29.14	O	28.09	O	27.87	O	28.84	O
Zn/(mg·L ⁻¹)	10.28	D	9.87	D	12.44	D	11.44	D	12.79	D	10.14	D
Cu/(mg·L ⁻¹)	5.71	L	4.48	L	4.4	L	5.54	L	3.95	L	4.76	L
B/(mg·L ⁻¹)	32.59	L	27.18	L	20.00	D	28.70	D	25.65	L	25.16	L

注：检测单位为农业部柑桔及苗木质量监督检验测试中心；由于多年监测重庆地区 Mo 元素全部为正常水平，Cl 为偏高，取消了每年检测。O 表示正常，L 表示低，D 表示极缺，H 表示高。

2.1.2 果园营养诊断配方施肥效果

2.1.2.1 试验示范果园. 2013—2015 年随着果园陆续投产，单产分别为 2.25,9.0,30.0 t/hm²，年度间增产幅度大主要是果园初投产和盛产以及诊断施肥技术增产所致。2013—2015 年柑橘诊断施肥效果见表 2。

2012 年 10 月采样检测。2013 年春季开始，按初投产制定诊断施肥方案，全年投入化肥 615 kg/hm²，折合氮磷纯量为 102.9 kg/hm²；其中橘渣配方肥 600 kg/hm²，折氮磷纯量 96.0 kg/hm²；尿素 15 kg/hm²，折氮纯量 6.9 kg/hm²；消纳橘渣秸秆 600 kg/hm²。5 月叶面喷施 0.2%硫酸锌+0.2%硫酸镁+0.3%尿素 2 次，7 月喷施 0.08%硫酸铜 1 次，冬季用代森锰锌制剂清园，同时补充锰、锌元素。当年单产 2.25 t/hm²，按果实平均含氮 0.06%，磷 0.011%测算，移除氮磷 16.0 kg/hm²，化肥利用率 15.55%。

2014 年按初投产制定施肥方案，全年投入化肥 1 215 kg/hm²，折合氮磷纯量为 198.9 kg/hm²；其中橘渣配方肥 1 200 kg/hm²，折氮磷 192.0 kg/hm²；尿素 15 kg/hm²，折纯氮 6.9 kg/hm²，消纳橘渣秸秆 1 200 kg/hm²。同时按照缺啥补啥原则，补充镁、锌、铜、硼等微量元素，单产 9 t/hm²，移除氮磷 63.9 kg/hm²，化肥利用率 32.13%。

2015 年按投产制定施肥方案，全年投入化肥 1 515 kg/hm²，折合氮磷 246.9 kg/hm²；其中橘渣配方肥 1 500 kg/hm²，折氮磷 240.0 kg/hm²；尿素 15 kg/hm²，折纯氮 6.9 kg/hm²，消纳橘渣秸秆 1 500 kg/hm²。同时补充微量元素，单产 30 t/hm²，氮磷移除 213.0 kg/hm²，化肥利用率 86.27%。

2.1.2.2 对照果园. 2013—2015 年随着果园陆续投产，单产分别为 4.5,7.5,9.0 t/hm²，年度间增产主要是果园逐步进入投产期所致。2013—2015 年柑橘管护效果见表 2。

2012 年 10 月采样检测。2013 年春季按初投产制定施肥方案，全年投入瑞宝 N,P,K 质量分数为 13%,3%,6%的硫酸钾型橘渣有机配方肥 600 kg/hm²，折氮磷 96.0 kg/hm²；未使用其他肥料，没有对缺乏的 Mg,Zn,Cu,B 进行补充。当年单产 4.5 t/hm²，按果实平均含氮 0.06%，磷 0.011%测算，移除氮磷 31.95 kg/hm²，消纳橘渣 600 kg/hm²，化肥利用率 33.28%。

2014 年按初投产制定施肥方案，全年施 N,P,K 质量分数为 13%,3%,6%的重庆瑞宝有机配方肥 450 kg/hm²，折氮磷 72 kg/hm²，湖北三宁 14%,16%,15%的三元复合肥 450 kg/hm²，折氮磷 135 kg/hm²，共施化肥 900kg/hm²，折氮磷为 207kg/hm²，消纳橘渣 450 kg/hm²；没有对缺乏的 Mg，

Zn,Cu,B 进行补充. 单产 7.5 t/hm², 氮磷移除 53.25 kg/hm², 化肥利用率 25.72%.

2015 年按投产制定施肥方案, 全年投入湖北三宁 14%,16%,15% 的三元复合肥 900 kg/hm², 折氮磷 270.0kg/hm²; 由于改施非硫酸钾型复合肥, 出现了 S 元素偏低; 没有对缺乏的 S,Zn,Cu,B 进行补充. 单产 9 t/hm², 氮磷移除 63.9 kg/hm², 化肥利用率 23.67%.

2.1.2.3 试验示范园与对照的比较. 由图 5 可知, 试验园应用营养诊断配方施肥技术, 均衡柑橘营养, 在氮磷施用水水平比对照略低的情况下, 单产较快增长, 氮磷利用率快速上升, 逐年增加至 86.27%, 依靠柑橘产销富集和移除氮磷, 实现库岸减源效果显著. 对照果园挂果后, 氮磷利用率在 33.28%~23.67%间徘徊, 大量氮磷滞留果园, 2013—2015 年过剩氮磷田间滞留量分别为 64.05,153.75,206.1 kg/hm², 较试验园的 86.9,135.0,33.9 kg/hm² 分别高一 22.85,18.75,172.2 kg/hm², 成为面源污染的重要来源.

表 2 2013—2015 巫山大昌柑橘园控氮减磷统计

种 类	2013		2014		2015	
	试验园	对照	试验园	对照	试验园	对照
果实产量/(t·hm ⁻²)	2.25	4.5	9.0	7.5	30.0	9.0
合计氮磷移除量/(kg·hm ⁻²)	16.0	31.95	63.9	53.25	213.0	63.9
氮移除量/(kg·hm ⁻²)	13.5	27.0	54.0	45.0	180.0	54.0
磷移除量/(kg·hm ⁻²)	2.5	4.95	9.9	8.25	33.0	9.90
化肥用量/(kg·hm ⁻²)	615	600	1 215	900	1 515	900
尿素/(kg·hm ⁻²)	15	0	15	0	15	0
无机复合肥/(kg·hm ⁻²)	0	0	0	450	0	900
有机配方肥/(kg·hm ⁻²)	600	600	1 200	450	1 500	0
纯氮磷投入量/(kg·hm ⁻²)	102.9	96.0	198.9	207.0	246.9	270.0
尿素(N=46%)/(kg·hm ⁻²)	6.9	0	6.9	0	6.9	0
无机复合肥(N,P=14%,16%)/(kg·hm ⁻²)	0	0	0	135.0	0	270.0
有机配方肥(N,P=13%,3%)/(kg·hm ⁻²)	96.0	96.0	192.0	207.0	240.0	0
化肥利用率/%	15.55	33.28	32.13	25.72	86.27	23.67
橘渣消纳量/(kg·hm ⁻²)	600	600	1 200	450	1 500	0

注：检测数据来源于农业部柑橘及苗木质量监督检验测试中心；栽植密度 600 株/hm²；果实含氮 0.6%，磷 0.11%；化肥利用率只计算氮磷直接利用率(果实移除量/投入量)；橘渣秸秆按鲜质量计，20 kg 干质量折算 100 kg 鲜质量.

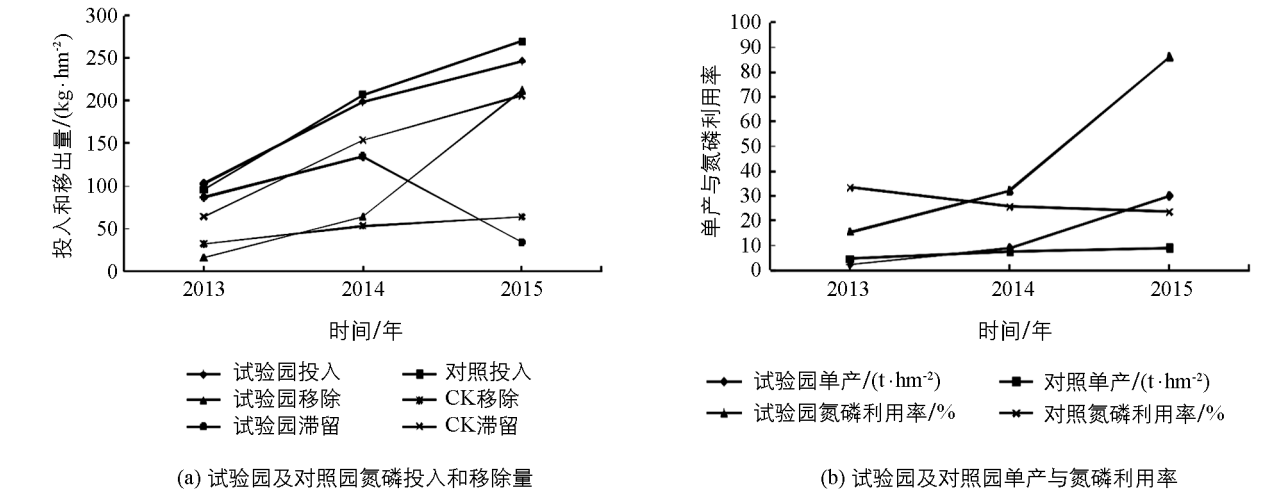


图 5 试验柑橘园与对照柑橘园富集和移除氮磷比较

2.1.2 消落区径流拦截效果监测

由表 3 可知, 果园出口端雨水径流通过消落区牧草带拦截后, 进入大宁河最终汇入长江三峡库区, 试验园、牧草带和对照园底端水样中的总氮分别为 0.452,0.823,0.602 mg/L, 铵态氮(NH₄⁺-N)未检出, 水样中都含有硝酸盐, 硝态氮(NO₃⁻-N)为 0.325,0.320,0.318 mg/L, 同时也有其他含氮化合物, 说明面源物质已经进入水系, 面源污染阻控系统的“自净”作用正在运行, 修复生态.

表 3 巫山大昌湖消落区草场顶端及底端水质监测 / (mg · L⁻¹)

试验区	大昌果园		草场底端		对照果园	
	监测	水质	监测	水质	监测	水质
总氮(TN)	0.452	Ⅱ	0.823	Ⅲ	0.602	Ⅲ
铵态氮(NH ₄ ⁺ -N)	0.000	Ⅰ	0.000	Ⅰ	0.000	Ⅰ
硝态氮(NO ₃ ⁻ -N)	0.325	—	0.320	—	0.318	—
总磷(TP)	0.064	Ⅱ	0.090	Ⅱ	0.043	Ⅱ
溶解性总磷(TDP)	0.035	—	0.018	—	0.041	—
总体水质	地表水Ⅱ类		地表水Ⅲ类		地表水Ⅲ类	

注: 检测单位为农业部柑橘及苗木质量监督检验测试中心; 水质标准采用《GB 3838—2002 地表水环境质量标准》.

水样中总氮(TN), 试验园出口端为 0.452 mg/L, 较对照果园 0.602 mg/L 低 33.19%, 说明试验园拦截效果优于对照. 径流经牧草带拦截后, 进入库区时入库端水样中氮元素为 0.823 mg/L, 较果园出口端高 82.08%; 总磷(TP)由 0.064 mg/L 升至 0.090 mg/L, 增长 39.7%, 而溶解性总磷(TDP)由 0.035 mg/L 减至 0.018 mg/L, 减少 48.6%. 雨水径流经过牧草带拦截后, 会混杂枯草分解的颗粒态有机物, 导致水中的总氮、总磷升高; 这些暂未分解的颗粒态氮磷, 长期浸泡会被微生物分解, 成为库区水质污染的一大来源, 也是雨水径流经过牧草带后, 水质由地表Ⅱ类增至Ⅲ类的原因; 径流中可溶性磷明显降低, 说明牧草带对可溶性磷具有较好的拦截富集效果. 这些多年生牧草, 可作为草饲料, 通过牛羊和鱼类的觅食富集和移除氮磷.

2.2 水域区增殖放流效果

由图 6 可知, 2003 年三峡水库开始蓄水, 库区和坝下渔获物逐年下降, 由 2002 年蓄水前的 2 935 t 降至 2005 年的 1 820 t, 下降 40.0%; 坝下由 2 800 t 下降至 1 970 t, 减少 29.6%, 鱼类资源下降严重. 2006 年开始取缔网箱养鱼, 实施鱼类增殖放流, 库区渔获物止跌回升至 2014 年的 7 089 t, 较 2002 年库区蓄水前增长 141.5%, 较 2005 年增殖放流前增长 289.5%; 坝下渔获也结束了持续下降的趋势, 捕获量逐步趋于稳定.

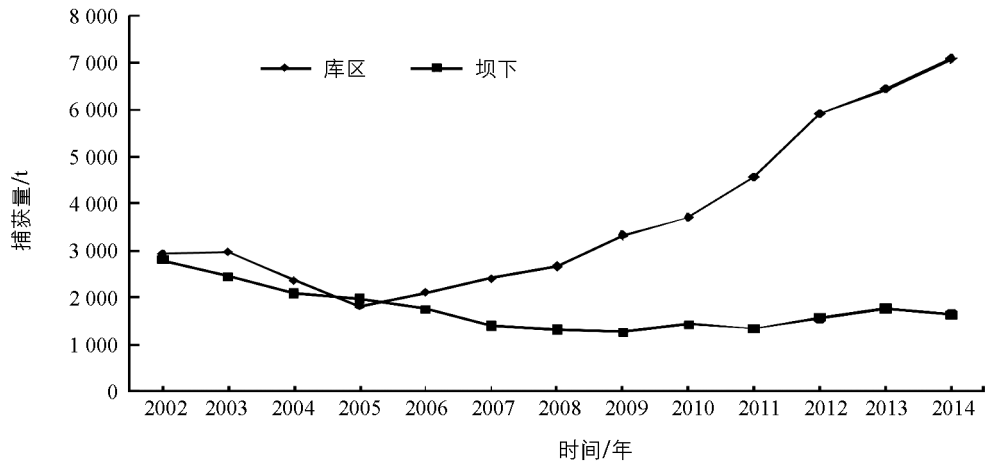


图 6 三峡水库渔获物年度变化趋势

数据来源：《长江三峡工程生态及环境监测公报(2003—2015)》^[28]. 图 7 水质分类指数按Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,劣Ⅴ,分别对应 1,2,3,4,5,6,加权平均计算,计算依据见表 4.

由图 7,表 4 可知,2003—2005 年三峡库区蓄水至实施增殖放流前,重庆库区长江干流入口端江津至出口端巫山的 5 个监测断面,水质均为Ⅲ类. 2006 年实施鱼类增殖放流后,按照水流顺序,越往下游水质呈改善趋势,出口端巫山段长年稳定在地表Ⅱ—Ⅲ类水质,优于入口端江津段,通过库岸经屏障区果林精准减源,消落区过程阻控拦截,水域区末端生物治理,并通过柑橘、草食牲畜、淡水鱼等特色农产品富集,产品销售,靠市场化途径移除氮磷,保护和稳定了三峡库区水质,对保护和修复库区环境具有明显的效果.

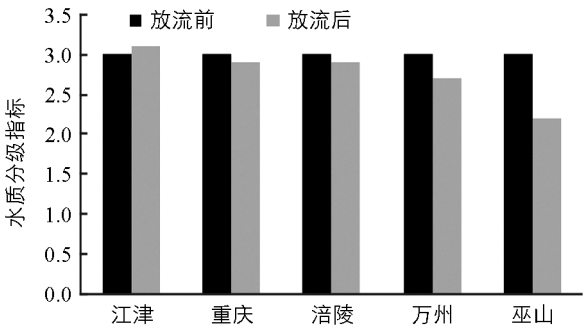


图 7 增殖放流前后出入库水质变化

表 4 三峡库区水质年度监测表

流域	年度	增殖放流前			增殖放流后								
		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
长江库区	江津	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	重庆	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	涪陵	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	万州	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
库尾	巫山	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ

3 结论与讨论

3.1 构建三峡库区特色循环农业生产系统符合国家生态文明发展战略

通过构建三峡库区特色循环农业生产系统,利用农业生产生态功能,拦截和吸收消纳面源污染物,并将其转化为生态农产品,是实现三峡库区增绿、农民增收、市场保供和水资源保护的有效选择,符合国家生态文明发展战略.

3.2 科学推进生态农业发展必须监测配套

采用土壤、叶片、径流综合监测,推广精准施肥管理,使用有机配方肥,可提高柑橘拦截、富集和移除氮磷等面源物效率,增加农产品产量,批量消纳秸秆等废弃物,显著减少化肥施用量,实现库岸减源. 可进一步研究和监测每年柑橘树枝叶生长吸收富集氮磷等的效率,准确掌握果园控氮减磷效果,科学推进生态农业发展.

3.3 用耐水淹经济植物恢复消落区植被阻控面源污染综合效果更优

1 年生杂草或水葫芦等价值较低的植物,不仅移除成本高昂,长期难以为继,而且周期性死亡,拦截固定的氮磷等营养物质会再次分解,重复污染水体. 消落区植被以农作物如耐淹牧草、莲藕等为主,经植物—动物—人类为主线的食物链,通过农产品产销途径,拦截泥沙,消纳富集和移除氮磷,阻控面源污染,并产生经济效益,阻控效果优于既无经济价值,又会周期性死亡并裸露消落区的 1 年生杂草植被.

3.4 库区增殖放流修复水域环境应与捕捞结合

通过鱼类觅食,富集氮磷营养是修复水体、改善水质的重要措施. 增殖放流可有效恢复库区鱼类资源,增加渔获物,减少水体富营养物总量,提高市场化移除氮磷效率.

参考文献:

- [1] 熊 伟,王久臣,汤文志,等. 三峡环库多业共生耦合循环农业生态系统初构 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 203—209.
- [2] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008—1017.
- [3] 罗雪峰,熊 伟,杨灿芳,等. 重庆三峡库区特色农业循环经济研究——以“猪—沼—橘”生态农业模式为例 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 405—409.
- [4] 李杰霞,杨志敏,陈庆华,等. 重庆市农业面源污染负荷的空间分布特征研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(7): 145—151.
- [5] 王 莹,梁勤爽,杨志敏,等. 淋溶对畜禽粪便释放氮磷面源污染物的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(1): 92—98.
- [6] 国家环保部. 第一次全国污染源普查公报 [R]. 北京: 2010—02—09.
- [7] 谭乐和,王 辉. 世界生态农业与研究实践综述 [J]. 热带农业科学, 2008, 28(6): 67—75.
- [8] 崔 键,马友华,赵艳萍,等. 农业面源污染的特性及防治对策 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335—340.
- [9] RITTER W F. Reducing Impacts of Nonpoint Source Pollution from Agriculture: A Review [J]. Journal of Environmental Science & Health Part A Environmental Science & Engineering, 1988, 23(7): 645—667.
- [10] 肖体琼,吴崇友,张文毅,等. 国内外生态农业的差异对比研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(14): 4362—4363.
- [11] 虞孝感,JOSEF N,燕乃玲. 从国际治湖经验探讨太湖富营养化的治理 [J]. 地理学报, 2007, 62(9): S899—906.
- [12] 闫丽珍,石敏俊,王 磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 99—107.
- [13] 谢德体,张 文,曹 阳. 北美五大湖区面源污染治理经验与启示 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(11): 81—91.
- [14] 熊 伟,吴雪梅,吴正亮,等. 我国柑桔产销形势分析及提升三峡库区柑桔产业竞争力对策建议 [J]. 中国果业信息, 2009, 26(7): 4—8.
- [15] 熊 伟,曾卓华,孔文斌,等. 2012 年重庆柑桔生产形势分析及产销对策建议 [J]. 中国果业信息, 2012, 29(11): 22—26.
- [16] 孔文斌,曾卓华,熊 伟,等. 2013/2014 产季重庆柑桔销售情况调查分析 [J]. 中国果业信息, 2014, 31(4): 24—27.
- [17] 冯 洋,熊 伟,黄 明,等. 晚熟柑橘冬季落果成因及保果防落果新技术研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(10): 32—38.
- [18] 熊棣文. 农用沼液无害化处理及沼液管道施肥装置 [J]. 大学科普, 2010, 13(4): 86.
- [19] 熊棣文,解 娟,吴正亮,等. 沼液无害化处理与利用成套设备工艺技术 [J]. 南方农业, 2011, 5(3): 5—9.
- [20] 熊 伟,张才建,明方成,等. 一种柑橘专用桔渣有机复合肥及制备方法: ZL201010204644.4 [P]. 2010—10—13.
- [21] 熊 伟,杨灿芳,孔文斌,等. 一种水库区特色农业生产及面源污染拦截生态系统: ZL201310167982.9 [P]. 2013—10—14.
- [22] 黄 艳. 三峡库区开始增殖放流 部分河流水质问题得到控制 [EB/OL]. (2012—03—24). http://news.xinhuanet.com/fortune/2012-03/24/c_111698647.htm.
- [23] 翟旭亮,李 虹,熊隆明. 长寿湖——重庆生态养殖的见证 [J]. 中国水产, 2009(11): 74—76.
- [24] 翟旭亮,李 虹,熊隆明. 重庆开启三峡水库生态渔业新时代 [J]. 渔业致富指南, 2010, (21): 20—23.
- [25] 熊 伟,夏仁斌,吴正亮,等. 重庆三峡库区柑桔园土壤酸性转化原因初探 [J]. 中国南方果树, 2010, 39(3): 12—14.
- [26] 熊 伟,彭良志,李 莉,等. 晚熟柑橘冬季落果枯水的营养失衡机制及防控技术 [J]. 中国科技成果, 2016, 17(12): 36—40.
- [27] 张 利,王振兴,黄正明,等. 长寿沙田柚土壤营养分析及施肥建议 [J]. 中国南方果树, 2014, 43(5): 59—61.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态及环境监测公报(2002—2015) [EB/OL]. (2016—06—25) <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/sxgb/2002-2014/>.

The Construction of a Circular Agriculture Ecosystem in the Three Gorges Reservoir Area and a Verifying Experiment about the Nitrogen and Phosphorus Reduction Effect

XIONG Wei¹, KONG Wen-bin¹, FENG Yang¹,
YANG Can-fang¹, WANG Fi², CHENG Yu³,
WANG Bo⁴, Ni Jiu-pai⁵, XIE De-ti⁵

1. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 401121, China;

2. Department of Agro-ecology and Resource Protection Station, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China;

3. Chongqing Agriculture Commission, Chongqing 401121, China;

4. Chongqing Fishery Technology Extension Station, Chongqing 400020, China;

5. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: The construction of the Three Gorges Project has seriously influenced the sustainable development of agriculture, the prosperity and stability of migrants and environment protection in the reservoir area. Therefore, in order to reduce these negative effects brought by the Three Gorges Project on the ecological environment, agricultural production and the national strategic freshwater resources, this research considered the barrier area, the riparian zone and the water area around the Three Gorges Reservoir as an entirety, established an agricultural industry belt with the citrus orchards on the reservoir bank as the barrier belt of sediment and livestock waste carried by the surface runoff, the submergence tolerant forage grass meadow on the riparian zone as the absorption and fixation area of soluble nitrogen (N) and phosphorus (P), and the natural fish farm for restocked fish resources in the water area as the removal method of the N and P concentrated on fish. (According to these three functional parts, we built 4 recyclable chains, i.e. livestock-biogas slurry-citrus-citrus meal-feed, livestock-biogas slurry-citrus-forage grass, and citrus-citrus meal-organic fertilizer, to make recycling of the agricultural waste and reduce the water pollution in the reservoir area.) The main results of our research were as follows: The nutrition diagnosis-based formula fertilization technique obviously increased the utilization rate of N and P from the fertilizer; in 2014, calculated with the fertilizer dosage and the fruit absorption, the N and P utilization rate of citrus orchards in Wushan and Changshou were 83.27% and 93.33%, respectively, and due to the high fertilizer utilization rate with the cut off ditches, sand stabilizing trenches and rainwater runoff buffering ponds, the exiting water quality could satisfy the Chinese Surface Water Quality Standard, Level III or III. The submergence tolerant forage grass planted on the riparian area absorbed the soluble N and P efficiently; The result of water quality test of the exiting water runoff at the bottom of the submergence tolerant forage grass meadow indicated that soluble P was reduced by 48.6% and no $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was detected. The fish resource restocking in the Three Gorges Reservoir Area increased the fish amount massively, and therefore fishes eliminated the algae and concentrated N and P to themselves. Then by fishery these N and P could be removed from the reservoir area. The fishery amount after the restocking had since increased by 289.5%, compared to the amount in 2005. Thus we can conclude that building the recyclable industry belt in the Three Gorge Reservoir Area can remove the surplus N and P by selling the products of these three industries, inverse the trend of increasing pollution and atrophying of agriculture and eco-environment in the Three Gorges Reservoir Area and protect the water resources, which is a successful example for similar situations.

Key words: the Three Gorges Reservoir Area; citrus; non-point source pollution; eco-agriculture; recycling agriculture; agricultural eco-system

责任编辑 周仁惠

