

DOI: 10.5846/stxb201507171505

张喜,文弢,李丹,李继伟,霍达,姜霞,杨守禄,沈晓君,袁克礼.竹产业生态系统结构及演化规律研究——以贵州省赤水市为例.生态学报,2016,36(22): - .

Zhang X, Wen T, Li D, Li J W, Huo D, Jiang X, Yang S L, Shen X J, Yuan K L. Studies on bamboo industry ecosystem structure and evolution: an example of Chishui city, Guizhou province, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

竹产业生态系统结构及演化规律研究

——以贵州省赤水市为例

张喜^{1,*}, 文弢¹, 李丹¹, 李继伟², 霍达¹, 姜霞¹, 杨守禄¹, 沈晓君³,
袁克礼⁴

1 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550005

2 泰盛集团赤天化纸业有限公司, 赤水 564700

3 贵州省赤水市林业局, 赤水 564700

4 贵州省赤水市竹产业发展中心, 赤水 564700

摘要:以“中国竹子之乡”命名的贵州省赤水市为例,研究了竹产业生态系统结构及演化规律。结果表明:①竹子各构件都有开发价值,包括生态服务、食药、竹材加工和文化产品等5方面,产业系统呈3级链环模式,第二、第三产业链环由近200家加工企业及其6大系列近300个竹加工品种组成,包括一般加工和深加工产品,第一产业链环主要由占全市森林面积47.3%的竹林资源构成。第一产业链环是环境保障与原材料的基础,第二和第三产业链环是产业化能力,三者互相依存。②竹产业生态系统由环境资源、原生产业、外生产业、共生产业和产业创新5个子系统组成,子系统间相互作用、重要性不同,出现原生产业子系统为主(I)、外生—原生产业子系统为主(II)、原生—外生产业子系统为主(III)和外生产业子系统为主(IV)4种状态,赤水市竹产业生态系统处于II→III级状态。竹外生产业子系统产值占全市GDP的40%以上,呈逐年上升的趋势,2014年竹产业生态系统中原生、外生和共生产业子系统产值分别为 0.95×10^9 、 2.85×10^9 元和 2.30×10^9 元,总产值 6.10×10^9 元。③依据各子系统间相互作用及生产要素转化过程,赤水市竹产业生态系统演化过程划分为4个阶段。原始发展阶段(—1950年以前)处于I级状态,手工利用阶段(1951—1980年)整体处于I级、毛竹林资源及加工利用部分有向II级转化的趋势,工业利用阶段(1981—2000年)处于II级状态,系统利用阶段(2001年至今)整体处于II级、杂竹林资源及加工利用部分有向III级转化的趋势。现时竹产业发展需提高原生产业子系统规模与生产力,依靠产业创新子系统引领竹产业生态系统走创新驱动之路。

关键词:竹产业;产业生态系统;演化阶段;原生产业;外生产业;共生产业;产业创新

Studies on bamboo industry ecosystem structure and evolution: an example of Chishui city, Guizhou province, China

ZHANG Xi^{1,*}, WEN Tao¹, LI Dan¹, LI Jiwei², HUO Da¹, JIANG Xia¹, YANG Shoulu¹, SHEN Xiaojun³,
YUAN Keli⁴

1 Guizhou Provincial Academy of Forestry, Guiyang 550005, China

2 Guizhou CHTH Paper CO., LTD, Tightsen Group, Chishui 564700, China

3 Forestry Bureau of Chishui City, Chishui 564700, China

4 Center for Bamboo Industry Development of Chishui City, Chishui 564700, China

基金项目:贵州省林下经济发展模式与保障措施(黔科合R字[2014]2034);毛竹低产林改造技术规程(黔林科合[2012]04);竹产业关键技术研究
与示范(黔科合重大专项[2007]6002)

收稿日期:2015-07-17; 修订日期:2016-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxigzfa@tom.com, 1003434130@qq.com.

Abstract: China is a global leader in the production of bamboo forest resources and the bamboo products processing industry. China's bamboo forests and industry play an important role in regional environmental protection and social economic development. This study analyzed the development of laws related to the bamboo industry and its related ecosystem in Chishui city, Guizhou Province, China, as an example. Chishui is referred to as "the hometown of bamboo in China" by the State Forestry Bureau in 1996 and 2006. The results show: (1) from a human perspective, there are five components of bamboo forest use including provision of ecological services, foods, medicines, timber products and cultural products. Bamboo processing involves three relative independent types of industries. The first type processes 47.3% of the bamboo forest resources produced in the city. It includes environmental protection and the harvest and processing of raw materials from bamboo. The second and third type involves nearly 200 bamboo—processing companies and 6 major industries that produce a wide variety of nearly 300 products requiring either minor or intense processing to create final products. (2) The five elements of the bamboo industry ecosystem include environmental resources, primary industry, exogenous industry, industrial support, and industrial innovation. Bamboo forest resources provide the main products for the primary industrial element and raw material for the exogenous industrial element. Bamboo forest resources are a component of, and are affected by, the environmental resources element. The industrial support element provides support services for infrastructure, finance, and businesses, that is, services for other industrial elements. The industrial innovation element provides innovative technology and institutional management for other industrial elements. These five elements interact and have different levels of importance with the following four states: the main state is the primary industrial element (I), the priority state to exogenous and primary industrial element (II), the priority state to primary and exogenous industrial element (III) and the main state of the exogenous industrial element (IV). Currently, the bamboo industry of Chishui city is overall in state II with a trend of transforming from state II to state III, including a part of miscellaneous bamboo forest resources and processing. In recent years, output values of the bamboo exogenous industry element accounted for more than 40% of the GDP of the city, with an increasing trend from year to year. In 2014, the demand for moso bamboo resources was 7.94×10^6 clumps, with actual consumption (3.04×10^6 clumps) < viable primary production (5.0×10^6 clumps). The demand for miscellaneous bamboo resources was 9.38×10^5 t, with actual consumption (4.83×10^5 t) \leq viable primary production (5.0×10^5 t). In addition, the output values of the primary, exogenous and support elements were 0.95×10^9 Yuan, 2.85×10^9 Yuan and 2.30×10^9 Yuan, respectively. Meanwhile, the total output value of the bamboo industry ecosystem was 6.10×10^9 Yuan. (3) Based on the interaction between each element and the state of the main processing factors, the development of the bamboo industry ecosystem of Chishui can be divided into four stages: ① the primary development stage (prior to 1950) in state I, ② the manual use stage (1951—1980) in state I, with a transforming trend from state I to state II of moso bamboo forest resources and processing, ③ the industrial use stage (1981—2000) in state II, and ④ the system use stage (2001—present) in state II, with a transforming trend from state II to state III of miscellaneous bamboo resources and processing. Currently, the development of the bamboo industry is expected to improve in scale and productivity in the primary industrial element, and rely on the industry innovation element to lead innovation within the bamboo industry.

Key Words: bamboo industry; industry ecosystem; evolutionary stage; primary industry; exogenous industry; industrial support; industrial innovation

竹子^[1]是禾本科(Gramineae)竹亚科(Bambusoideae)植物的泛称、国内分布者属多年生木本植物,主要分布于热带及亚热带、少数可分布至温带及寒带地区,大致地理范围47°S—46°N、垂直分布可达海拔4000 m,全球已知竹子约700属近10000种以上,划分为亚太竹区、美洲竹区和非洲竹区,我国西南地区是亚太竹区的起源及分布中心^[2]。我国竹子约200属1500种以上、竹林面积达 5×10^6 hm²,竹产品从最初日常用品发展至今已拥有10余类1000余品种的庞大产业集群^[3]、产值达 1.85×10^{11} 元/a,对其它国家及地区^[4]的竹林资源培育

与产业化开发产生了较高的引领作用和指导价值。

国内外部分城市^[5-6]和生态产业园区^[7-16]的产业生态学研究已有大量报道,重点关注了非再生型资源^[5-6,11-13,17]、却较少关注可自然更新型资源^[1-5,18-19]城市及生态产业园区的产业生态问题。研究涉及城市或园区物流^[5,11-12,18-19]和能流分析^[6],生态产业园规划^[13],产业类型^[9,14,16-17]与演化^[7],产业共生模式及经营^[8-10,14-17],以及产业生态系统稳定性^[20]与脆弱性^[21]等方面。国内在竹产业模式^[22]、产业链设计^[23]和循环经济建设^[24]等方面已有少量报道,但竹产业生态系统要素组成、结构及演化规律尚未见报道,这无疑对我国竹类生态产业园建设和竹区“三农”问题解决是不利的。国家林业局^[25]依据全国产竹县(市)竹业管理、资源培育、加工利用和科技发展水平等指标量化打分,贵州省赤水市于1996年和2006年连续2次获“中国竹子之乡”命名,也是西南地区唯一获此殊荣的县(市)。赤水市毛竹(*Phyllostachys pubescens*)和杂竹林资源量及在森林资源总量中的比重较高,竹林环境、竹浆业、竹材和竹笋利用领域的技术水平及产品系列和产值在中国竹子之乡中也具有较高的显示度,是研究竹产业生态系统结构及演化规律的理想模板。

从产业生态学视角分析赤水市竹产业生态系统组成及演化规律、转化要素及调控途径,可进一步丰富可自然更新型资源产业生态学内容,为其它产竹县(市)竹林资源培育规模化及产品加工产业化提供可借鉴的案例,也可为其它类可自然更新型资源占优势县(市)的农业产业化发展提供参考。

1 研究区概况

赤水市^[26]位于贵州省西北部、贵州高原北侧向四川盆地的过渡地带,地理范围105°36′25″—106°14′56″E、28°15′02″—28°45′58″N,海拔高度变幅221—1730 m。属中亚热带湿润季风气候区,具有冬暖春早、夏季炎热、全年日照少的特点。由于海拔高度变幅大,气候的立体性和区域性差异明显。年平均温度(海拔高度293 m)18.1℃,1月平均温度7.9℃、7月平均温度28.0℃,∑≥10℃积温5888.3℃·279 d,降雨量1286.8 mm/a、蒸发量1307.1 mm/a,日照时数1297.7 h/a、太阳总辐射量 2.7×10^3 MJ/m²·a)。属四川沉积湖盆边缘,出露地层为侏罗系、白垩系和第四系,其中紫色土、黄壤和山地黄棕壤面积率达60.59%、27.79%和0.25%,土壤肥沃湿润、土层深厚、质地适中,适宜多种竹类植物生长。

赤水市是我国第一批竹纸循环经济试点单位(2005年)和贵州省现代高效农业示范园内的第一个竹产业示范园(2015年)。原生性竹类植物有11属31种,以刚竹属(*Phyllostachys*)、刺竹属(*Bambusa*)、慈竹属(*Neosinocalamus*)和牡竹属(*Dendrocalmus*)为主,引进并生长良好的竹品种约300余种。据赤水市竹产业发展中心统计近年竹加工业总产值占全市GDP的40%以上和竹农收入的50%以上。竹产业发展也出现如下问题:①竹林资源整体质量有待提高。毛竹和杂竹低产林面积分别占50.3%和27.7%、有待定向改造,竹农所有的毛竹和杂竹林面积分别占77.9%和99.1%、竹林资源培育联系着竹区“三农”问题,竹林长期单一目标经营、地力下降明显。②竹林资源利用率和深加工产品率低。竹材和竹笋利用率高、林地空间利用率低,竹材和竹笋构件利用率高、全株利用率低,原材利用率高、成分提取利用率低,低中端产品多、高端产品少。③产能不稳定。2013—2014年度因贵州新锦竹木制品有限公司^[27]市内异地搬迁和泰盛集团贵州赤天化纸业股份有限公司^[28]停产降低竹加工业产值超 1.00×10^9 元,其它中小型加工企业数量多、产能小、变幅大,对总量影响较小。④竹产业生态系统有待优化。竹产业发展主要依靠市场经济利益驱动和大型龙头企业拉动,缺乏产业生态系统理论指导与实践。

2 研究方法

2.1 系统及边界

现有赤水市行政区域为界,分析数据由相关局(办、中心)提供。

2.2 竹产业界定

竹产业是以竹为原材料进行生产,创造产出的一系列经济活动总和。狭义竹产业就是竹加工业,广义竹

产业包括竹林资源培育、竹产品加工和环境利用等产业链网,后者是本文的研究对象。

2.3 资料收集方法

收集国内外竹产业的期刊论文、专业书籍和网站^[3-4]资料,分析发展动态;实地走访赤水市竹产业龙头企业^[27-29]和相关产业园,了解竹产业现状、问题与发展趋势。

3 结果分析

3.1 竹资源利用途径及产业系统

赤水市竹子各构件^[2-4]用途不同,加工产品种类丰富(图1)。地下鞭根是竹雕工艺品的重要原料。市域内大部分竹笋可食,以鲜笋和干笋及制品为主、部分为即食食品及饮料。竹秆或以原竹形式应用于绿化、农用和建筑领域,或是地板、胶合板、工艺品和编织品原料,其加工剩余物是竹碎料板、竹炭和竹浆原料。竹枝梢是扫把等生活用具原料,竹叶是动物饲料和植物肥料原料、部分竹种的竹叶还是中药和保健品原料。寄生于竹枝上的竹燕窝(*Stroma engleromyces*)是名贵的真菌类食品,竹叶上的真菌类竹黄(*Shirata bambusicola*)在临床应用上具有明显的抗肿瘤作用,竹根上的隐花菌类竹荪(*Dictyophora indusiata*)也是食疗佳品。由地下鞭根、竹秆、枝梢和竹叶支撑的竹林系统具有较高的生态服务价值^[30-31],所形成的竹林环境是重要的林内种植和养殖场所。竹秆和竹笋形态各异而虚心有节、姿态婀娜,是形成华夏竹文化的渊源之一。

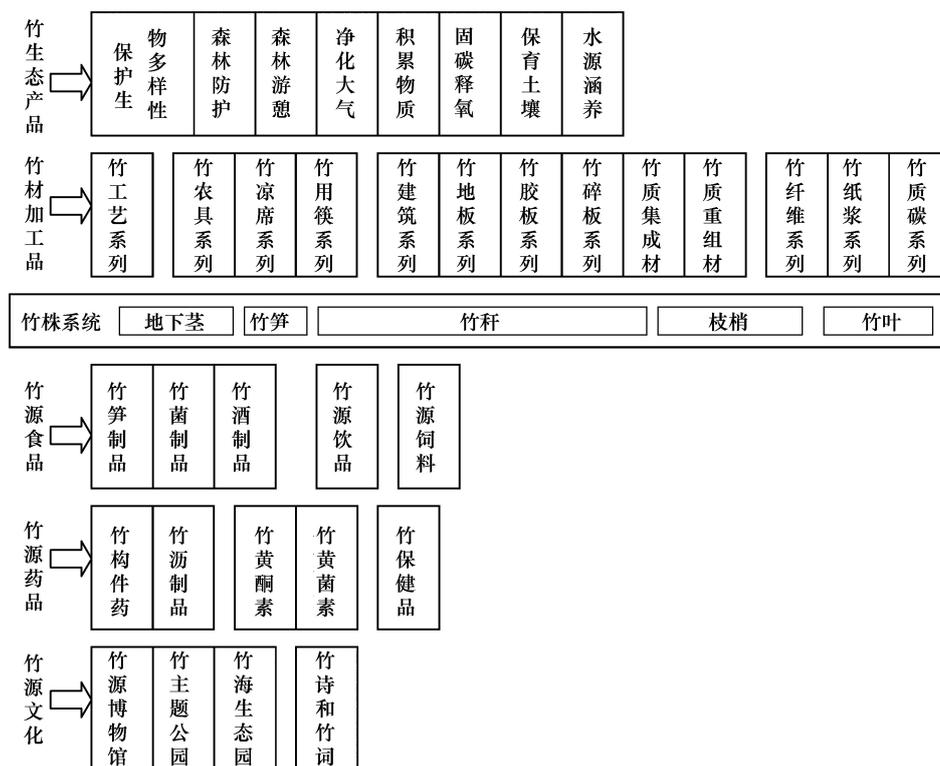


图1 赤水市竹子全株利用主要路径图

Fig.1 Main utilization patterns map of bamboo plants in Chishui City, Guizhou province

赤水市形成的毛竹林资源推动竹产品加工和竹浆生产企业拉动杂竹林资源培育的竹产业发展模式具有赤水特色,竹业循环经济工业园^[24]和生态产业园建设初见成效。其竹产业系统呈3级链环模式(图2)。第一、第二和第三链环相互依存与补充,耦合成完整的竹产业系统。第一链环产品是第二和第三链环的资源保障与环境基础,第二和第三链环产品工业化生产能力强,有促进第一链环发展的效用。

竹产业第一链环属基础性产业,包括立竹、竹林和林地,竹林资源是第一产业链的主要产品之一。主要内

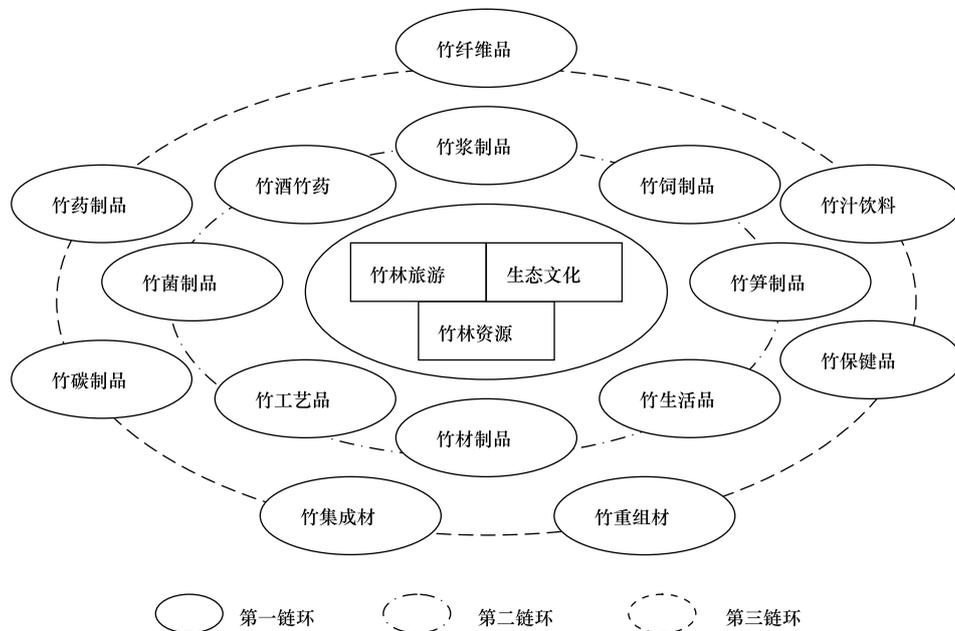


图 2 赤水市竹产业系统结构模型

Fig.2 Bamboo industrial products systematic model in Chishui city, Guizhou province

容有竹种选育、竹林营造、竹林经营、林内种植和养殖,竹区生态旅游、农户为主的竹林休闲体验和竹家乐等,以及馆(园)式竹文化展示。由于大部分竹林资源非属生产性企业(林场)所有,在没有其他优势资源推动区域社会经济发展时,实现竹林资源培育规模化和竹制品加工产业化是当地群众的迫切需求和竹业发展的强劲动力,也是“竹子之乡”美名盛传不衰的根本原因之一。全市竹林占森林面积的 47.3%,有竹海国家森林公园、沙椶(*Alsophila spinulosa*)国家级自然保护区、四洞沟和十丈洞及燕子岩风景区等以竹为主体的生态旅游景区 5 个,竹品种博览园、竹文化博物馆和黎理泰故居^[32]等竹文化设施已运营或改造中。

竹产业第二链环属一般加工业、具相当规模,已构成竹浆、竹材和竹笋加工业 3 条主要产业链。据赤水市竹产业发展中心统计 2014 年全市竹业产能为竹笋 3×10^4 t/a,包括笋干、玉兰片、特产礼包、酒店专供和休闲散装系列,平竹和立竹砧板 1.8×10^6 个/a,漂白、双生和工艺竹筷 3×10^8 双/a,竹工艺品 1.2×10^6 件/a,竹沙发芯 3×10^5 套/a,精制家具 3.5×10^4 件(套)/a,竹浆 2×10^5 t/a、竹纸 5×10^4 t/a,竹编胶合板 2.7×10^4 m²/a,原竹和碳化竹地板 4.1×10^5 m²/a,杂竹料块 1.1×10^6 t/a,箱板 2.4×10^6 块/a。竹废料复合肥厂 1 座。

竹产业第三链环属深加工产业、已初现端倪,主要是竹成分利用和原料重组。包括竹重组材、竹炭制品、竹饮品、竹药和竹纤维产品等。正在筹建利用竹浆生产生物基纤维及衣物面料和竹碳产品生产线,碳化竹地板和竹纤维生态木已规模化生产。

3.2 竹产业生态系统

竹林靠地下鞭芽出笋成竹,年年有竹材和竹笋等产品产出,不同于其它生物产业有采伐期长短之分和采伐方式之变^[18-19]、所形成的产业链具有多样性^[22-24],属可自然更新型资源产业生态系统,有分布的区域性和对资源高度依赖性的特征,寻求经济和生态效益目标最大化。不同于一般产业生态系统经济利益最大化的单一目标,也不同于区域或园区产业生态系统的复合性及多目标^[5-10,16-17]。竹产业生态系统是竹林资源培育及竹产品加工为主导的产业系统和环境资源等系统相互作用、相互影响,形成的具有物质循环、能量转化和信息引导等特定功能的系统,是协调竹产业发展和环境资源保护双赢目标的载体、促进区域社会经济可持续发展的重要工具之一。

赤水市竹产业生态系统由环境资源、原生产业、外生产业、共生产业和产业创新子系统组成,呈网络结构(图 3)。由“竹资源生产—竹产品加工—保障服务”和“废物循环利用—环境恢复治理”2 条产业链环将环境

资源、原生产业、外生产业和共生产业子系统相衔接,产业创新子系统为其它 4 个子系统提供智力和管理创新,以实现经济高效和生态和谐的有机统一。

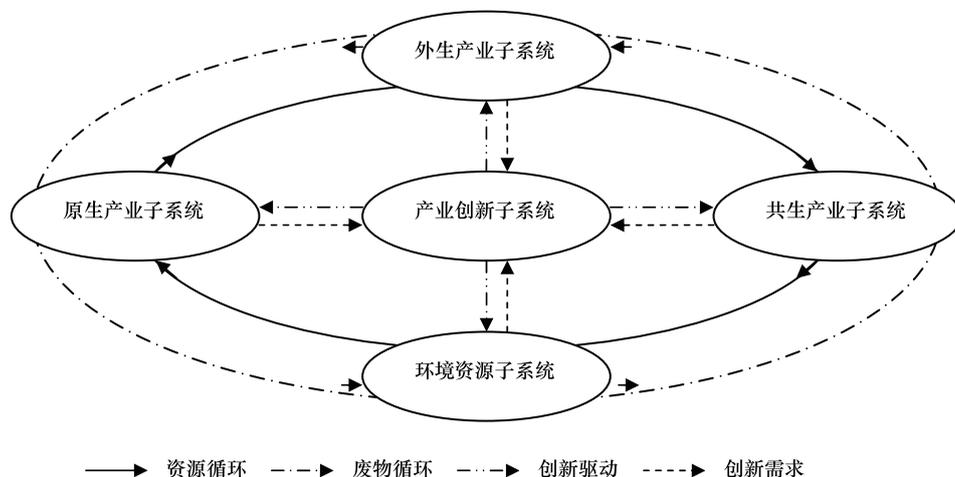


图 3 赤水市竹产业生态系统结构模型

Fig.3 Bamboo industrial ecosystem model in Chishui city, Guizhou province

竹产业生态系统和一般产业生态系统及资源型产业生态系统的主要区别之一在于资源获得及利用的方式和产业经营目标,对竹产业生态系统而言:

竹产业生态系统:

$$B = f(e_r, p_i, e_i, s_i, i_i), V = V_{er} + V_{pi} + V_{ei} + V_{si} + V_{ii} \quad (1)$$

环境资源子系统:

$$E = \sum_{i=1}^I f(e_i) \quad (2)$$

原生产业子系统:

$$R_b = r_b + r_p, r_b = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K b_{jk} \times s_j, r_p = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K f(r_{bjk}), f(r_1) = f(r_2), \dots, = f(r_K) \quad (3)$$

外生产业子系统:

$$C = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K r_{jk}, C_p = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L f(p_{jkl}), C_r = \frac{C_p}{C} \times 100\%, P = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L p_{jkl}, V_{ei} = \sum_{l=1}^L p_l \times v_l \quad (4)$$

经营目标:

$$E \rightarrow \text{最优化}, V \rightarrow \infty \quad (5)$$

其中: e_r 、 p_i 、 e_i 、 s_i 和 i_i 分别代表环境资源、原生产业、外生产业、共生产业和产业创新子系统, V_{er} 、 V_{pi} 、 V_{ei} 、 V_{si} 和 V_{ii} 为相应子系统的产值, V 为竹产业生态系统产值。 E 为环境资源量, e_i 为环境承载力因子。竹林资源量(R_b)是竹林资源现存量(r_b)和竹林资源生产量(r_p)之和, r_b 为研究区所有竹种构件生物量密度(b_{jk})和面积(s_j)之积的和, r_p 为研究区所有种竹林年出笋或成竹的构件生物量之和,为竹林资源现存构件生物量的函数。 r_k 为竹株构件生物量、同一竹种不同构件生物量呈函数关系,1至多个竹构件产品的生产或导致同株其它构件生物量的流失。竹林资源利用率(C_r)是年竹产品生产量(P)所需竹林资源量(C_p)占年竹林资源消耗量(C)的比率。 p_{jkl} 为 j 竹种 k 构件生产的 l 类产品量, v_l 为竹产品(p_l)的单价。 $i=1,2,3,\dots,I$,分别代表地质地貌、母岩土壤、气候、竹林资源现存量、其它生物资源现存量 and 人类活动等因子; $j=1,2,3,\dots,J$,分别代表不同竹种; $k=1,2,3,\dots,K$,分别代表不同竹种的竹秆、竹笋、竹枝和竹叶等构件生物量; $l=1,2,3,\dots,L$,分别代表竹加工产品种类。

上述模型系统分析表明:①竹林资源现存量(r_b)不仅是原生产业子系统中竹林资源量的构成要素,也是

环境资源子系统的构成要素,其生态服务功能涉及环境资源子系统(e_i)众多方向,生态服务价值同竹林资源现存量(r_b)成正比。②竹林资源生产量(r_p)是竹林资源现存量(r_b)的函数,原产业子系统(p_i)维持一个相对稳定的竹林资源现存量(r_b)必须是年竹林资源消耗量(C) \leq 生产量(r_p)。③竹不同构件的加工利用方向和产品价值(v_i)不同、相同构件的深加工产品附加值高,提高竹外产业子系统产值(V_{ei})和竹林资源利用率(C_i)的有效途径是多产业链环及多产品(P)系列。④由于竹产业生态系统结构的复杂性及产品的多样性、以及竹产业和其它产业生态系统组成的复合性,除外产业子系统产值(V_{ei})较能精确计量外、其它子系统产值仅能通过相应模型估算。

不考虑竹产业系统内部其它影响因素,竹产业生态系统在环境保护和子系统发育及产值相对组成方面的表型可划分为 4 种状态:

I.原产业子系统为主状态。 $R_b \gg C, r_p \gg C$,环境和竹林生态系统均处于健康状态、属可自然更新型资源产业生态系统。竹林资源消耗量(C)远小于竹林资源量(R_b)及生产量(r_p),竹业产值以原产业子系统为主、外生和共生产业子系统极低,产业创新子系统发育差。现有竹产业生态系统良性循环,有扩大竹加工产业的潜力;

II.外生—原产业子系统为主状态。 $R_b > C, r_p \geq C$,环境和竹林生态系统均处于健康状态,属可自然更新型资源产业生态系统。竹林资源消耗量(C)接近生产量(r_p),竹业产值中原生和外生产业子系统比重高、共生产业子系统占有一定比例,产业创新子系统较发育。现有竹产业生态系统良性循环;

III.原生—外生产业子系统为主状态。 $R_b > C, r_p < C$,环境和竹林生态系统处于亚健康状态,属部分可自然更新型资源产业生态系统。竹林资源消耗量(C)大于生产量(r_p)、小于竹林资源量(R_b),竹林质量和生产力降低、生态服务价值减少,竹业产值中原产业子系统降低、外生和共生产业子系统升高,产业创新子系统发育。需增加外源性竹林资源消耗量或降低产能,以实现竹产业生态系统良性循环;

IV.外生产业子系统为主状态。 $R_b \ll C, r_p \ll C$,环境健康状态和竹林生态系统间无必然联系、竹林生态系统处于不健康状态,属一般产业生态系统。竹业产值中以外生和共生产业子系统为主、原产业子系统极低,产业创新子系统发育。维持现有竹产业生态系统正常运行主要靠外源性竹林基地支撑资源消耗量。

3.2.1 环境资源子系统

环境资源子系统是竹产业生态系统存在与发展的物质基础,不仅包括竹林资源,也包括土地、水、热和其它生物资源等要素,是资源循环、环境保护和生态建设子系统。赤水市气候和地质地貌及土壤系统适宜多种竹类植物生长,海拔高度变化形成的立体气候^[26]是影响竹种自然分布及生产力差异的重要因素之一(表 1)。不同属的竹种分布于相同或不同海拔区域,同一属的不同竹种随分布区海拔高度的降低、竹径和高度呈增大趋势,同一竹种的林分质量也随海拔高度变化存在明显差异^[31]。竹林资源既是环境资源子系统的构成要素之一,也是原产业子系统的主要产品之一。

3.2.2 原产业子系统

原产业子系统是竹产业生态系统的生产者,具有基础性产业地位。包括竹林资源培育、以及依托竹林环境的生态旅游、林内种植和养殖等。以赤水市近 40a 竹林面积与秆材蓄积量指标变化为例(表 2),竹林面积经历了 1985 年、蓄积经历了 1995 年的低值期后,竹林面积和蓄积呈快速增长态势。2013 年竹林面积达 $8.70 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中毛竹林占 35.7%、大杂竹林占 62.1%、小杂竹林占 2.2%,竹林资源生产量为毛竹 5.0×10^6 根/a、杂竹 5.0×10^5 t/a。受海拔高度、岩组、坡向、坡位、坡度和土层厚度等环境因素^[31]及经营水平的综合影响,竹林生产力偏低^[33-34],低产竹林改造和丰产竹林培育的增产空间很大。

除原生性规模化竹林为主体的生态旅游外,赤水市近年引种实验表明许多外来竹品种也适应当地气候、生长较好,除增加了竹笋和竹材生产品种库外,还具有较高的观赏价值。原生和引进竹种中有观色竹品种 40 余种、观秆竹品种 50 余种、观叶竹品种 30 余种(表 3)。既增加了赤水市竹主题公园和竹海生态园的珍奇竹类资源,也丰富了市容市貌改善所需的绿化竹品种。

表 1 赤水市部分自然分布竹种的海拔高度和生长特性变化^[1-2]

Table 1 Growth differences and natural distribution elevation changes of some bamboo species in Chishui city, Guizhou province

竹种名 Bamboo species	海拔高度 Altitude/m	生长特性 Growth characters	
		粗度* Diameter/cm	高度 Height/m
毛竹 <i>Ph. pubescens</i>	300—1300	8—16	10—20
花毛竹 <i>Ph. pubescens</i> f. <i>Huamozhu</i>	900—1000	8—16	10—20
金竹 <i>Ph. sulphurea</i>	800—1200	4—10	6—15
紫竹 <i>Ph. nigra</i>	800—1200	2—4	3—8
水竹 <i>Ph. heteroclada</i>	300—1600	2—3	3—5
人面竹 <i>Ph. aurea</i>	600—1700	2—3	5—7
白夹竹 <i>Ph. nidularia</i>	500—1000	3—7	8—14
慈竹 <i>Bambusa affinis</i>	300—1000	3—6	5—10
料慈竹 <i>B. distegia</i>	400—900	4.5—6	10—12
硬头黄竹 <i>B. rigida</i>	260—300	2—6	9—12
撑蒿竹 <i>B. pervariabilis</i>	400—500	5—6	7—15
车筒竹 <i>B. sinospinosa</i>	500—600	5—16	10—22
孝顺竹 <i>B. glaucescens</i>	500—600	1—3	2—7
梁山慈竹 <i>Dendrocalamus farinosus</i>	400—1200	4—6	7—15
麻竹 <i>D. latiflorus</i>	500—800	10—12	10—20
合江方竹 <i>Chimonobambusa hejiangensis</i>	800—1200	2—3	5—7
金佛山方竹 <i>Ch. utilis</i>	1100—1700	1—3	2—4
阔叶箬竹 <i>Indocalamus latifolius</i>	500—800	0.4—0.5	1—2
箬叶竹 <i>I. longiauritus</i>	900—1200	0.5—1	2—3
多毛箬竹 <i>I. hirsutissimus</i>	500—600	1—2	3—5

* 竹枝下高达胸高以上者为胸径值,以下者为地径值

表 2 赤水市竹林资源现存量动态

Table 2 Bamboo forest area and standing stocks dynamics in Chishui city, Guizhou province

调查年度* Survey year	毛竹 Moso bamboo		其它竹 Non-moso bamboo					
	面积 Area ×10 ⁴ hm ²	蓄积 Storage ×10 ⁷ 根	面积 Area ×10 ⁴ hm ²	蓄积 Storage ×10 ⁸ 根	大杂竹 (DBH ≥ 2cm)		小杂竹 (DBH < 2cm)	
					面积 Area	蓄积 Storage	面积 Area	蓄积 Storage
1975	1.5704	2.6143	0.1781	1.7350				
1985	1.4401	2.5954	0.0966	0.9080				
1995	1.8320	0.3540	0.4189	0.4661	0.3857	0.4292	0.0332	0.0369
2005	2.6405	0.6624	2.7127	3.0186	2.6200	2.7492	0.0927	0.2694
2013	3.1052	0.7790	5.5934	6.2241	5.4023	5.6686	0.1911	0.5555

* 1975—2005 年数据为贵州省森林资源二类调查数据,2013 年为年度林地变更调查数据

表 3 赤水市主要观赏竹种分类表

Table 3 Main ornamental bamboo species in Chishui city, Guizhou province

观赏部位 Ornamental parts	代表竹种 Representative bamboo species
颜色(秆,笋和叶) Colors of bamboo	小琴丝竹(<i>B. multiplex</i> f. <i>alphonso-karri</i>), 撑蒿竹, 大琴丝竹(<i>Neosinocalamus affinis</i> f. <i>tlavidorivens</i>), 黄槽竹(<i>Ph. aureosulcata</i>), 花毛竹, 紫竹, 花黔竹(<i>D. tiangii</i> f. <i>viridistriatus</i>), 翡翠倭竹(<i>Shibatzea lanceifolia</i> f. <i>smaragdina</i>), 寒竹(<i>Ch. marmorea</i>), 花叶寒竹(<i>Ch. marmorea</i> f. <i>variegata</i>), 刺黑竹(<i>Ch. neopurpurea</i>), 菲白竹(<i>Sasa fortunei</i>), 菲黄竹(<i>S. auricoma</i>), 等。
秆型(毛粉,异状) Clumps of bamboo	酸竹(<i>Acidosasa chinensis</i>), 木竹(<i>B. rutila</i>), 粉单竹(<i>L. chungii</i>), 料慈竹, 水单竹(<i>L. papillata</i>), 方竹, 香竹(<i>Chimonocalamus delicatus</i>), 灰香竹(<i>Ch. pallens</i>), 筇竹(<i>Qiongzhueta tumidinoda</i>), 吊丝球竹(<i>Dendrocalamopsis beecheyana</i>), 龙竹(<i>D. giganteus</i>), 麻竹, 椅子竹(<i>D. bambusoides</i>), 梁山慈竹, 黑毛巨竹(<i>Gigantochloa nigrociliata</i>), 水竹, 毛竹, 白夹竹, 毛金竹, 灰竹(<i>Ph. nuda</i>), 罗汉竹, 斑苦竹(<i>Pleioblastus maculatus</i>), 具耳箬竹(<i>I. auriculatus</i>), 秦竹(<i>Thyrsostachys siamensis</i>), 等。
叶型(大叶,小叶) Leaves of bamboo	箬叶竹, 麻竹, 贡山竹(<i>Gaoligongshania megalothyrsa</i>), 铁竹(<i>Ferocalamus strictus</i>), 空竹(<i>Cephalostachyum fuchsianum</i>), 短毛玉山竹(<i>Yushania pubescens</i>), 赤竹(<i>S. longiligulata</i>), 流苏香竹(<i>Ch. fimbriatus</i>), 矮雷竹(<i>S. strigosa</i>), 大明竹(<i>P. gramineus</i>), 等

此外,基于竹林生态系统生产的竹荪、竹黄和竹燕窝等菌类产品,竹鸡(*Bambusicola* SP.)和竹鼠(*Rhizomys sinensis*)等动物产品,以及林内种植和养殖的其它产品虽不是本文分析的主要对象,也属原生产业子系统的产品。

3.2.3 外生产业子系统

外生产业子系统属竹产业生态系统的消费者,是以原生产业子系统生产的竹笋和竹材等产品为原料的加工子系统,产品包括竹产业系统中第二和第三链环的一般和深加工类产品(图2)。据赤水市竹产业发展中心统计全市各类涉竹加工企业和专业合作社约160余家、省级龙头企业6家,竹加工产品产值(元/a)在 $[1 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7]$ 、 $[5 \times 10^7 \sim 10 \times 10^7]$ 和 $[10 \times 10^7 \sim \infty)$ 区间的企业数量分别为7家、3家和2家。建成了亚洲规模第一和生产工艺达世界先进水平的 2×10^5 t/a竹浆生产项目、以及纸制品企业8家和竹浆原料加工企业19家,拥有毛竹制品加工企业129家、杂竹制品加工企业3家,竹笋加工企业3家。初步形成了竹建材、竹装饰板材、竹造纸、竹工艺品、竹家具和竹笋加工6大系列近300个竹加工品种,产品畅销国内20多个省(市、自治区)和国外近20个国家(地区)。2014年竹加工产品有10大类(表4),毛竹林资源消耗量 3.04×10^6 根、需求量 7.94×10^6 根,资源消耗量(C) $<$ 生产量(r_p , 5.0×10^6 根);杂竹林资源消耗量 4.83×10^5 t、需求量 9.38×10^5 t,资源消耗量(C) \leq 生产量(r_p , 5.0×10^5 t)。表明赤水市竹外生产业子系统产能对毛竹和杂竹林资源需求量高于生产量、产能总量过剩,毛竹林资源消耗量小于生产量,杂竹林资源消耗量小于或接近生产量。

表4 赤水市2014年竹产品及原料消耗量

Table 4 Bamboo products and material consumptions of 2014 in Chishui city, Guizhou province

竹产品 Product types	产量 Yield		毛竹 Moso Bamboo			杂竹 Non-moso bamboo		
	数值 Value	单位 Unit	消耗量 AC*	需求量 DQ*	单位 Unit	消耗量 AC	需求量 DQ	单位 Unit
竹工艺品 Handcrafts	1.1×10^6	件	2.2×10^5	2.66×10^5	根	4.0×10^3	4.0×10^3	吨
竹筷 Chopsticks	2.9×10^6	排	5.7×10^5	9.6×10^5	根			
竹箱板 Boxboard	2.4×10^6	张	1.8×10^6	1.9×10^6	根			
竹签 Sticks	1.3×10^3	吨	1.2×10^5	1.8×10^5	根			
竹菜板 Board	8.3×10^4	件	1.1×10^5	3.0×10^5	根			
竹地板 Floors	2.8×10^5	m ²	2.2×10^5	4.4×10^6	根			
竹生活纸 Life papers	1.5×10^2	吨				1.9×10^2	1.9×10^2	吨
竹浆板 Pulp board	9.6×10^4	吨				3.9×10^5	8.0×10^5	吨
杂竹料块 Blocks	8.2×10^4	吨				9.1×10^4	1.3×10^5	吨
竹竿 Cables	3.0×10^4	件				7.3×10^2	7.3×10^2	吨
竹笋 Shoots	2.3×10^3	吨				2.2×10^3	3.7×10^3	吨

* AC: Actual consumption, DQ: Demanded quantity。数据由赤水市竹产业发展中心提供

赤水市竹产业发展中心统计表明全市竹外生产业子系统产值在2010、2011、2012、2013年和2014年分别为 1.53×10^9 、 1.75×10^9 、 2.08×10^9 、 1.89×10^9 元和 2.85×10^9 元,产值逐年上升。

3.2.4 共生产业子系统

共生产业子系统属竹产业生态系统的服务型子系统,包括资源勘察、建筑交通、财政金融、物流通信和环境管理等,是为其它子系统提供环境资源保护、基础设施建设、生产性和市场流通性服务等方面的支撑系统,起着维护和稳定竹产业生态系统的作用(图4)。竹产业作为赤水市经济的主要支柱之一,市委和市政府先后出台了多项利好政策,协调域内银行和竹企业建立“银一企”联盟,为企业提供财政支持与融资平台。赤水河和习水河由东南至西北贯穿全境,赤水河仅60 km汇入长江,市域公路里程达2329 km,其中等级公路615 km,距最近的泸州机场仅50 km,水运旅客周转量 1.94×10^5 km·人/a,货物周转量 2.18×10^9 km·t/a,公路旅客周转量 5.41×10^8 km·人/a,货物周转量 1.65×10^8 km·t/a,形成了较为发达的物流网络。2014年邮电业务量 2.44×10^7 元,拥有固定电话 3.37×10^4 户、移动电话 2.41×10^5 户和国际互联网 1.83×10^4 户,通信网络流畅。由

市环保局、水利局、林业局和农业局组建的市—乡(镇)两级服务体系覆盖了产竹区,基本满足了竹产业生态系统的技术服务、资源管理与环境监测,市域空气和水源质量多年达到国家 I、II 级标准,未发生大旱和洪涝灾害。

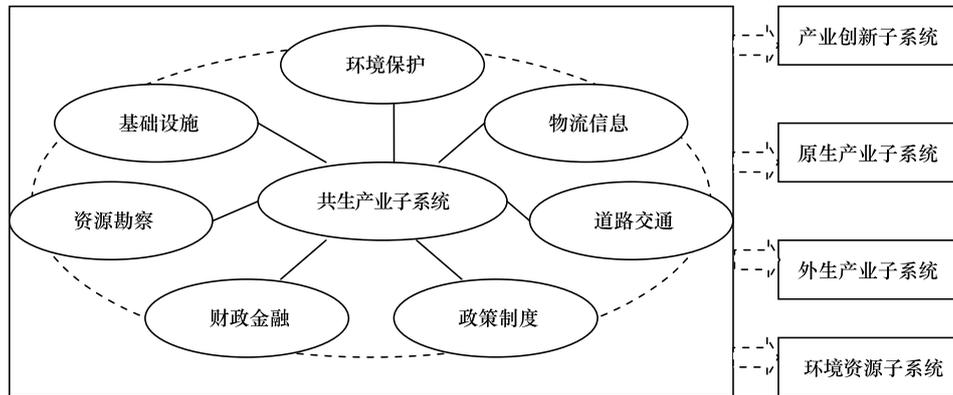


图4 赤水市竹共生产业子系统模型

Fig.4 Bamboo industrial support subsystem model in Chishui city, Guizhou province

根据贵州省统计局发布的赤水市年度 GDP 中第一、第二和第三产业比例,以竹外生产业子系统产值为基数推算,竹共生产业子系统在 2011、2012、2013 年和 2014 年的估计产值分别为 1.41×10^9 、 1.68×10^9 、 1.53×10^9 元和 2.30×10^9 元,产值逐年增长。

3.2.5 产业创新子系统

产业创新子系统属竹产业生态系统的技术革新和能力创新子系统,是推动竹产业生态系统自我完善、实现由资源启动型向创新驱动型发展的重要动力学机制(图 5)。竹产业生态系统生产要素流动具有较强的路径依赖,需不断引入新的变量建立能力创新机制,应对不断变化的市场需求及产品升级换代。赤水市成立了以中国工程院院士领衔的竹材制浆业博士后流动工作站和竹材产品加工业院士工作站,建设不同产业链上下游企业—专业合作社集群,联合与重组相近产品中小企业、规范生产标准与提高竹产品规模化生产能力,建立竹产业发展中心和产业示范园管委会,创新了竹产业发展能力。

技术创新是提升竹林资源现存量与生产力及原料品质、提高生态采收与环境保护水平、拓展与延长产业链环、增强产业技术优势和产品市场竞争优势的有效手段。《赤水市竹资源综合利用标准体系》(DB520381—2005)包括 6 个农业标准、29 个工业标准和 12 个文化旅游标准,为竹产业的规模化和产业化发展提供了规范化依据。2014 年底止的国家发明专利中,竹浆业 28 项、竹材加工业 27 项、竹笋加工业 4 项。竹产品重点加工企业^[27-29]通过了 ISO9001—2000 质量管理体系和 ISO14001—2004 环境管理体系认证,部分竹材加工产品获出口免验资格^[27]、竹笋加工原料^[29]通过了有机食品认证。以赤水市竹产业生态系统为模板,由市内相关局(办)和企业领衔或参与的一大批国家及省(部)科研项目落户赤水市,取得了众多的科研成果、专利和规程(标准),在生产应用中获得了明显的经济、生态和社会效益。正在制定与更新一大批涉及竹林资源培育与原料采收、产品加工、资源循环利用和环境保护的标准(规程),新产品和新工艺的专利申请保护等知识产权工作也日趋完善。

3.3 竹产业生态系统演化

竹产业生态系统演化是环境资源、原生产业、外生产业、共生产业和产业创新子系统间相互影响、互相支撑和重要性交替出现的过程。赤水市自然分布竹种较多,自毛竹引入后,竹子的利用价值和开发潜力日益彰显。市域环境资源子系统状态一直良好,竹产业生态系统变化主要是原生产业、外生产业、共生产业和产业创新子系统间的相互作用及生产要素转化,采用主导因子法则、定性和定量因子相结合的方法分析赤水市竹产业生态系统的演化(E_b)规律:

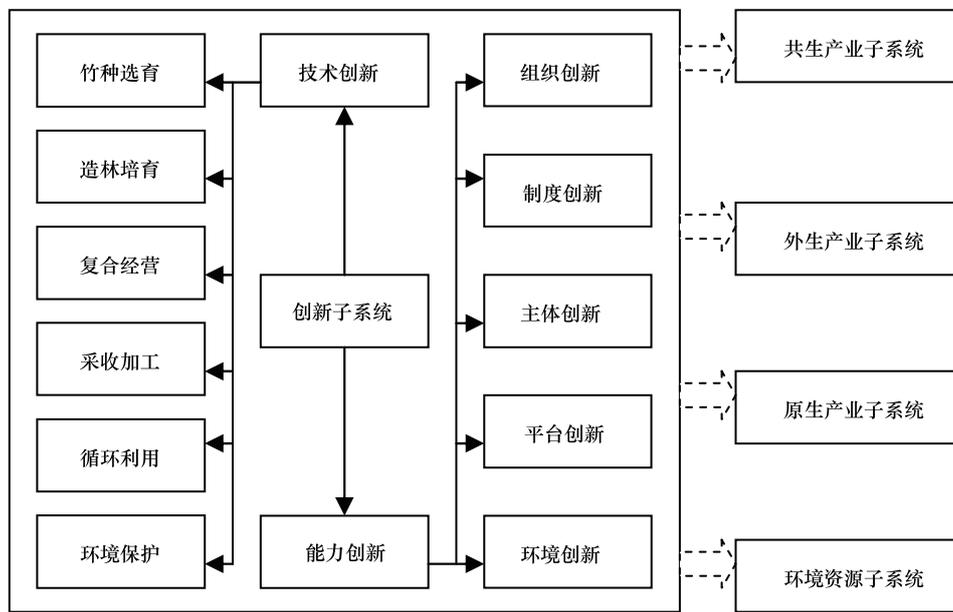


图5 赤水市竹产业创新子系统模型

Fig.5 Bamboo industrial innovation subsystem model in Chishui city, Guizhou province

演化模型:

$$E_b = f(r_b, r_p, c, c_r, p, p_l, v, v_{ei}, \dots) \quad (6)$$

赤水市竹产业生态系统演化依据竹林资源量动态及竹笋(材)加工方式和产值变化可划分为4个阶段:

①.原始发展阶段(1950年以前)。自黎氏^[32]引入毛竹至赤水市解放约200a左右,竹林资源主要处于自然发展状态。除部分毛竹材销往四川自贡盐矿外,其它竹材主要用于当地生产与生活,大多数竹种没有开发利用。竹林资源利用率<10%。竹产业生态系统整体处于I($R_b \gg C, r_p \gg C$)级状态,竹业产值中原生产业子系统高,共生和外生产业子系统低,产业创新子系统发育差。

②.手工利用阶段(1951—1980年)。除传统竹林经营技术和竹产品加工方式外,竹产业的科技含量和机械化水平有所提高。集体手工式竹加工企业50余家、造纸厂1家,主要产品有竹纸、竹筷和包装席等生活用品。竹林资源利用率10%—40%。竹产业生态系统处于I→II级状态,竹业产值中原生产业子系统为主,其次是外生和共生产业子系统,产业创新子系统发育较差。毛竹林资源利用有向II($R_b > C, r_p \geq C$)级转化的趋势,杂竹林资源利用仍处于I($R_b \gg C, r_p \gg C$)级状态。

③.工业利用阶段(1981—2000年)。改革开放促进了企业和个人参与社会造竹活动,竹林资源量有较大提高。多种经济形式和竹产品加工方式引入竹加工领域,毛竹加工产品进入多样化、规模化和现代化阶段。企业近100家,主要产品有竹地板和竹编胶合板等。竹林资源利用率40%—70%。竹产业生态系统整体处于II($R_b > C, r_p \geq C$)级状态,竹业产值中原生和外生产业子系统较高,其次是共生产业子系统,产业创新子系统较发育。

④.系统利用阶段(2001—至今)。2×10⁵t竹浆生产项目投产较大地推动了杂竹林资源发展。竹加工企业近200家,包括竹浆、竹材和竹笋产品等6系列近300个品种,产值由2006年的6×10⁸元上升至2014年的28.5×10⁸元。竹林资源利用率70%—90%。竹产业生态系统处于II→III级状态,毛竹林资源利用仍处于II($R_b > C, r_p \geq C$)级状态、杂竹林资源利用向III($R_b > C, r_p < C$)级转化,除市域内新增非林地(退耕还竹)杂竹造林8.8×10³hm²外、市域外还建立了杂竹纸浆林基地,以维持竹浆原料的正常供给。竹业产值中外生产业子系统最高,其次是原生和共生产业子系统,产业创新子系统发育。由龙头企业带动的竹材、竹笋和竹浆加工企业群延伸了产业链网,扩大了竹加工产品种类与规模,产能总量过剩、淘汰低附加值产能势在必行。

4 讨论与建议

4.1 土地承载量和竹林资源量是制约竹产业生态系统发育的基础性要素。赤水市现有林地 $1.48 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、森林覆盖率达 80.2%。可用于新造林的土地仅 $3.04 \times 10^3 \text{ hm}^2$,其中疏林地占 8.0%、其它灌木林地占 37.5%、无立木林地占 8.9%、宜林荒山荒地占 41.2%、 $\geq 25^\circ$ 坡耕地占 4.3%,灌木林地和宜林荒山荒地的立地质量较差、宜竹度较低、生产力不高,通过新造林增加竹林资源量的潜力有限。受天然林保护及长江中上游防护林工程建设的制度性约束,通过采伐现有森林类型、迹地更新竹林的规模较小,也不是增加竹林资源量的有效途径。经过低产林改造,毛竹林^[33]可增加竹材 150—450 根/ hm^2 、杂竹林^[34]可增加气干竹材 5—20 t/hm^2 、单位面积产量因立地质量和经营水平而异,但是提高原生产业子系统竹林资源生产量与产值的有效途径之一。另一方面,通过林内种植或养殖、开展竹家乐等生态游,也是增加原生产业子系统产值的有效途径。受竹林资源量约束,竹林资源生产量和消费量的最大值是影响环境资源子系统和制约原生产业子系统规模的阈值之一,也是赤水市实现环境、经济和社会可持续发展的阈值之一。解决赤水市竹林资源消费量不足的主要措施是提高竹林单产和竹林资源利用率,建立域外竹林专用林基地。

4.2 竹产业和其它产业系统组成的复合性以及竹产业生态系统结构与功能的多样性导致系统产值计量困难。竹产业生态系统中外生产业子系统产能、原料消耗量、产品产量及产值可由域内企业年度报表分类统计,数值较为准确。由于基础设施和服务网络的公用性,共生产业子系统产值很难从第三产业产值中剥离出来。原生产业子系统产值包括竹材(笋)、生态旅游、林内种植和养殖等,分属域内不同统计渠道、整合较为困难。环境资源和产业创新子系统对其它子系统产值有重要影响,难以有型的数据说明,如根据已有文献^[30-31]推算赤水市竹林生态服务价值达 $4.19 \times 10^9 \text{ 元}/\text{a}$ 以上,其中部分是环境资源子系统的存在产值之一、也是原生产业子系统的构成产值之一,无法分割,官方也未列入产值统计。由于竹加工业产值占赤水市 GDP 的 40%和竹农收入的 50%以上,竹产业生态系统在全市国民经济构成中具有举足轻重的作用。依据 GDP 在第一、第二和第三产业的比重,以及竹加工业产值占第二产业产值的比例,可推算出 2014 年竹原生、外生和共生产业子系统产值分别为 0.95×10^9 、 2.85×10^9 元和 2.30×10^9 元,竹产业生态系统产值为 6.10×10^9 元。尽管数据来源渠道与统计方法尚有待商榷及改进之处,但此产值仍然是目前唯一较为接近现实的数据,可信可用。

4.3 产业创新子系统是引领竹产业生态系统发育与提高竹业产值的引擎。在原生产业子系统中生产要素受到制约,竹产业第一、第二和第三链环共存的环境中,促进赤水市竹产业生态系统发育与提升产值水平的有效手段是产业创新。增加与延伸产业链是首要途径,延长现有竹浆、竹材和竹笋产业链,增加深加工产品^[23]种类;发展生态旅游、林内种植和养殖产业链,提高原生产业子系统产值。其次是系列化组装与创新现有科技成果、专利和标准(规程),提升竹产品生产与产品质量的标准化及专利化水平,以龙头企业为主建立产业集群,对现有分散生产的中小型竹加工企业合并重组,以产品规模和品牌优势增强市场竞争力,提升外生产业子系统产值。再次是利用共生产业子系统,扩大产品展示^[3-4]与销售渠道。最后是优化现有竹产业生态系统^[9-10,14-16,22-24],开展肥料、农药、竹笋、竹秆和枝叶等物质流^[5]及重要元素流^[11-12,18]与能值动态^[6]分析,淘汰低附加值产能、发展深加工产品。建立监测与评价指标体系^[14-15]分析竹产业生态系统的稳定性^[20]和脆弱性^[21],及时调控竹产业生态系统原料流向和产品输出。

4.4 竹产业生态系统演化规律与应用。自 20 世纪 50 年代丹麦的卡伦堡(Kalundborg)工业园^[7-8]实现了园区内物质与能量自组织循环后,20 世纪 80 年代后日本^[9]、韩国^[10]和我国^[5-6,11-13,16]出现了不同类型生态产业园,开始了生态产业园规划建设^[13]与管理^[14-15]。赤水市竹产业生态系统不同于卡伦堡工业园建设的自组织模式、也不同于其它工业园建设的规划模式,属“自组织+规划”模式,同其它“竹子之乡”的“竹林资源推动竹产品加工、竹林资源培育和竹产品加工相协调”的产业发展模式有相似和相异之处。虽同属竹产业生态系统,演化过程受特定区域自然和社会经济因素的综合影响,具有产业重点的异质性、演替阶段的相似性和经历时间的不等性,其演化规律仍然具有一般指示性与实际应用价值。竹产业生态系统宜在适竹区或竹林资源量

相对集聚区建设,规划先行、建设随后。原生产业子系统以基地林建设为主,竹林资源消耗量和生产量相适应。外生产业子系统以深加工和高附加值产品为主、规模适度,多产业链发展。共生产业和产业创新子系统充分利用与优化现有资源,提升服务质量和创新水平。以实现竹产业生态系统的生态、经济和社会效益最大化。

参考文献 (References):

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志IX(1). 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] 熊文愈, 周芳纯. 竹林培育. 北京: 中国林业出版社, 1973.
- [3] 国家林业局中国竹子研究开发中心, 浙江省安吉县安信信息有限公司. 中国竹网首页. (2011-03-15) [2015-06-26]. <http://www.bamboo.cn/>.
- [4] International Network for Bamboo & Rattan. Our work. (1997-11-06) [2015-06-26]. <http://www.inbar.int>.
- [5] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 陈吉宁. 贵阳市物质流分析. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1688-1691, 1699.
- [6] 陆宏芳, 陈烈, 林永标, 彭少麟. 顺德产业生态系统能值动态分析. 生态学报, 2005, 25(9): 2188-2196.
- [7] Ehrenfeld J, Gertler N. Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*, 1997, 1(1): 67-79.
- [8] Domenech T, Davies M. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: the case of Kalundborg. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2011, 10: 79-89.
- [9] van Berkel R, Fujita T, Hashimoto S, Geng Y. Industrial and urban symbiosis in Japan: analysis of the Eco-town program 1997-2006. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1544-1556.
- [10] Park H S, Rene E R, Choi S M, Chiu A S F. Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea-From spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis. *Journal of Environmental Management*, 2008, 87(1): 1-13.
- [11] 武娟妮, 石磊. 工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例. 生态学报, 2010, 30(22): 6208-6217.
- [12] 武娟妮, 石磊. 工业园区磷代谢分析——以江苏宜兴经济开发区为例. 生态学报, 2010, 30(9): 2397-2405.
- [13] 薛东峰, 罗宏, 周哲. 南海生态工业园区的生态规划. 环境科学学报, 2003, 23(2): 285-288.
- [14] Geng Y, Zhang P, Côté R P, Fujita T. Assessment of the national Eco-industrial park standard for promoting industrial symbiosis in China. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(1): 15-26.
- [15] 刘晶茹, 吕彬, 张娜, 石垚. 生态产业园的复合生态效率及评价指标体系. 生态学报, 2014, 34(1): 136-141.
- [16] Geng Y, Zhao H X. Industrial park management in the Chinese environment. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(14): 1289-1294.
- [17] 张子珍. 资源型区域产业生态系统组成模型及发育评价. 云南财经大学学报, 2014, (6): 146-153.
- [18] Antikainen R, Haapanen R, Rekolainen S. Flows of nitrogen and phosphorus in Finland-the forest industry and use of wood fuels. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(8/10): 919-934.
- [19] 赵军. 美国生物能源产业生态系统演化过程研究. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 485-492.
- [20] 张萌, 胡军. 工业生态系统稳定性研究综述. 东北林业大学学报, 2007, 35(6): 77-80.
- [21] 李湘梅, 肖人彬, 曾宇, 姚智爽. 生态工业园共生网络的脆弱性. 生态学报, 2014, 34(16): 4746-4755.
- [22] 陈勇. 中国竹业产业化发展模式研究. 世界林业研究, 2003, 16(5): 50-54.
- [23] 张颖心, 沈剑, 韩艳, 王霏娜, 朱明乔. 基于循环经济的毛竹产业链设计. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(12): 2187-2191.
- [24] 钟建. 赤水市竹业循环经济工业园区建设研究. 西南农业大学学报: 社会科学版, 2013, 11(11): 27-30.
- [25] 国家林业局. 关于命名“中国竹子之乡”的决定(林造发[2006]190号). (2006-09-22) [2015-06-26]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/495/content-24205.html>.
- [26] 《赤水县综合农业区划》编写组. 赤水县综合农业区划. 贵阳: 贵州人民出版社, 1989.
- [27] 贵州新锦竹木制品有限公司: 公司简介. (1993-01-01) [2015-06-26]. <http://www.gzxjzm.cn/Templates/x/gsjj.htm>.
- [28] 泰盛集团贵州赤天化纸业股份有限公司: 简介. (2015-06-19) [2015-06-26]. <http://www.gzchishui.gov.cn/doc/2015/06/19/79852.shtml>.
- [29] 贵州红赤水集团有限公司: 关于我们. (2005-06-01) [2015-06-26]. <http://www.hongchishui.com/about/>.
- [30] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [31] 尹洁. 赤水河流域紫色砂(页)岩组的毛竹林结构与功能规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [32] 谢尊修, 谭智勇. 赤水楠竹史. 贵州文史丛刊, 1981, 2(4): 84-87.
- [33] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20391—2006 毛竹林丰产技术. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [34] 国家林业局. LY/T 1791—2008 纸浆用竹林生产技术规程. 北京: 中国标准出版社, 2008.