

DOI: 10.5846/stxb201410081977

段颖琳, 刘峰, 赵帅, 李勇志, 赵俊杰. 三峡库区蓄水前后农田生态系统服务与环境压力分析. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Duan Y L, Liu F, Zhao S, Li Y Z, Zhao J J. Analysis of farmland ecosystem services and environmental pressures in the Three Gorges Reservoir Area, before and after impoundment. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

三峡库区蓄水前后农田生态系统服务与环境压力分析

段颖琳¹, 刘峰^{1,*}, 赵帅¹, 李勇志², 赵俊杰^{1,3}

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 中国科学院水库水环境重点实验室, 重庆 400714

3 重庆市烟草公司巫山分公司, 重庆 404700

摘要: 农田生态系统是人类赖以生存的基础, 重大工程影响下农田生态系统服务的响应与反馈对指导工程影响区的社会经济发展具有重要意义。本文基于三峡工程蓄水前后(2002, 2011)的农业生产数据, 评估了库区农田生态系统服务价值, 并对其在蓄水前后的变化特征与环境压力进行了分析。结果表明: (1) 三峡库区蓄水后, 农田生态系统各项服务价值均增加, 总价值增加了 16.81%, 增加部分主要为产品供给、休闲旅游和气体调节, 相对于生产功能与生活功能, 生态功能价值增加幅度较小; (2) 总价值的变化是自然与包括三峡工程在内的人类活动综合影响的结果, 其增加原因主要与常用耕地面积增加、种植结构调整、化肥农药施用强度增加, 以及休闲旅游发展和科研投入加大有关, 部分区县, 尤其是常用耕地面积下降的区县, 种植结构调整、化肥农药施用强度的增加起主导作用, 按 1990 年不变价计算, 库区蓄水淹没耕地损失的农田生态系统服务价值约为 4.24 亿元/年, 其中产品供给价值 1.37 亿元/年; (3) 化肥农药施用强度增加, 化肥施用增产效益下降, 是维持与提高库区农田生态系统产品供给服务所带来的环境压力, 而农田生态系统服务除受到化肥农药施用强度增加对其自身的抑制外, 还受到总人口增加与农业人口减少、耕地资源逐年减少和蓄水淹没高质量耕地的制约。

关键词: 三峡库区; 农田; 生态系统服务; 蓄水; 环境压力

Analysis of farmland ecosystem services and environmental pressures in the Three Gorges Reservoir Area, before and after impoundment

DUAN Yinglin¹, LIU Feng^{1,*}, ZHAO Shuai¹, LI Yongzhi², ZHAO Junjie^{1,3}

1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

3 Wushan Branch of Chongqing Tobacco Corporation, Chongqing 404700, China

Abstract: Farmland ecosystems are fundamental to human survival, and the response and feedback of farmland ecosystem services to the impacts of major projects are of vital importance for guiding regional social and economic development. Based on agricultural production data of the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) before and after impoundment (2002, 2011), the Ecosystem Service Value (ESV) of farmland in the TGRA was estimated; changes in its characteristics and environmental pressures were also discussed. The results show that (1) after impoundment, each ESV of farmland increased, and the Total Value increased by 16.81%; the values of product supply, leisure tourism and gas regulation dominated the increase of the Total Value; compared with product supplying and life ensuring, the value of ecological regulating showed a relatively small increase. (2) The change in the Total Value was the result of natural and human

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901290); 中央高校基本业务费专项资金资助(XDJK2015C058)

收稿日期: 2014-10-08; **修订日期:** 2015-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fengliu@swu.edu.cn

activities, including the Three Gorges Project; the increase in Regularly Cultivated Land, planting structure adjustment, increased use intensity of chemical fertilizer and pesticide, development of leisure tourism, and increased scientific research input were the major reasons for the increase of the Total Value. For some counties, especially those with decrease in Regularly Cultivated Land, planting structure adjustment and the increased use intensity of chemical fertilizer and pesticide might be the main reasons for the increased farmland ESV. After being normalized to the consolidated value of year 1990, the inundation of cultivated land decreased the farmland ESV by 424 million yuan per year, among which the value of product supply was 137 million yuan. (3) The increased use intensity of chemical fertilizer and pesticide, and the decreased contribution of chemical fertilizer to crop yield were the environmental pressures imposed by maintaining and promoting the product supply of the farmland ecosystem in the TGRA. However, the farmland ESV was not only influenced by the above-mentioned environmental pressures, but also by the increase in population, the decrease in agricultural population, the decrease in land resources, and the inundation of high-quality cultivated land.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area; farmland; ecosystem service; impoundment; environmental pressure

自从 Daily 和 Costanza 等从生态学和经济学的不同角度探讨了生态系统服务(Ecosystem Service)及其价值(Ecosystem Service Value, ESV),使生态系统服务可以由定性到定量进行研究后^[1-2],生态系统服务的概念和理论迅速应用于不同尺度和不同类型的生态系统服务价值评估之中。经过理论和实践研究的不断发展,基于生态系统服务及其变化的定量评价以揭示其对人类福利的影响研究,成为生态系统服务的重要研究内容。近年来的研究主要集中在土地利用/土地覆被变化(如政府政策、自然环境变化等驱动力分析)对生态系统服务变化的影响方面^[3-5],从生态系统服务的角度探讨了人类活动的得失,表明城镇化往往导致生态系统服务能力降低,水保措施能有效提升坡耕地的生态系统服务能力。农田生态系统服务研究方面,国外学者 Johanna 等^[6]研究了瑞士农业景观在不同生产强度下的生态系统服务,Daily^[7]评价了澳大利亚典型农场收益的组成。国内学者在研究中国陆地生态系统服务^[8]时较早地计算了农作物有机质生产、固定 CO₂与释放 O₂、营养物循环等生态系统服务间接价值,之后从理论上对农田生态系统服务的概念、内容及评价方法进行了探讨^[9]。在全国层面,对不同生态区(东北地区、黄淮海地区、黄土高原地区、青藏高原地区、长江中下游地区、西南地区、华南地区)^[10]和粮食主产区(东北、华北、长江流域的 12 个省份)^[11]农田生态系统服务价值进行了评估;在区域层面,针对典型地区(北京郊区^[12]、河北省栾城县^[13]等)、生态区(玛纳斯河流域^[14]、民勤绿洲^[15]等)的农田生态系统服务价值进行了评估。此外,也从时间和空间的角度进行了农田生态系统服务变化及影响的研究,如耕地面积与流域生态系统服务价值的时空变化。上述分析表明,我国农田生态系统服务从理论、评估方法到应用都有了较大的进展。

三峡工程从 2003 年 6 月开始蓄水,坝前水位达 135 m,2010 年 10 月达 175 m 正常蓄水位,标志三峡工程开始全面发挥水库综合效益。三峡库区作为我国重要生态区,在整个长江流域生态安全上有着重要的作用,因其大型河道型水库的特征与极高的社会关注度而成为热点研究区域。从生态系统服务方面的研究来看,已对三峡库区生态系统服务的重要性进行了评价^[16],分析了土地利用变化、城市化对库区生态系统服务的影响^[17],以及三峡工程对河流生态系统服务影响的初步探讨^[18],但针对库区农田生态系统服务的研究相对不足。农田生态系统服务作为库区生态系统服务的重要组成部分,除影响着库区其他生态系统类型的生态系统服务外,还与库区移民致富紧密相关。因此,开展库区蓄水前后农田生态系统服务价值变化与环境压力研究,对库区移民安稳致富、库区生态环境建设与保护等三峡后续工作具有重要意义。

1 研究区概况

三峡库区(图 1)位于长江上游下段,东起湖北夷陵区、西至重庆江津区、南起武隆县、北至开县,地理范围在北纬 28°31'—31°44'、东经 105°49'—111°39'之间,包括重庆巫山县、万州区、涪陵区等 22 个区、县(自治县)

和湖北省巴东县、兴山县、秭归县、夷陵区,幅员面积约 5.42 万平方公里^[19]。三峡水库原河道面积为 445 km²,蓄水后水面面积增大,成库后水面面积达 1045 km²^[20]。库区地质构造复杂,地貌以山地、丘陵为主。多年平均气温 15—18℃。常年雨量充沛,为我国暴雨中心之一,多年平均降雨量为 1150.26 mm^[21]。全年降水以夏季为主,主要出现在 4—9 月。土壤类型主要有黄壤(30.29%)、紫色土(20.21%)、黄棕壤(17.76%)、石灰土(12.10%)、水稻土、棕壤、潮土、红壤、草甸土等,其中耕地土壤紫色土约占 65%^[22]。主要农作物有水稻、小麦、玉米、薯类、油料、甘蔗、烤烟、蔬菜及果树等。据《长江三峡工程生态与环境监测公报》数据,粮食作物和经济作物种植面积所占比例 2002 年分别为 77.5%和 22.5%,2011 年分别为 65.6%和 34.4%;2000—2011 年,退耕还林还草面积累计 17.06 万公顷,其中 2002—2011 年为 16.15 万公顷。

三峡库区淹没土地共涉及 277 个乡、1680 个村、6301 个组,其中耕地 168.67 km²、园地(含柑桔园)72.00 km²、河滩地 38.00 km²、林地 32.00 km²、柴草山 24.00 km²,以及鱼塘 3.13 km²^[23]。三峡库区具有人口密集、经济基础薄弱、生态环境脆弱等突出特点,经济社会发展长期落后于全国平均水平^[24]。

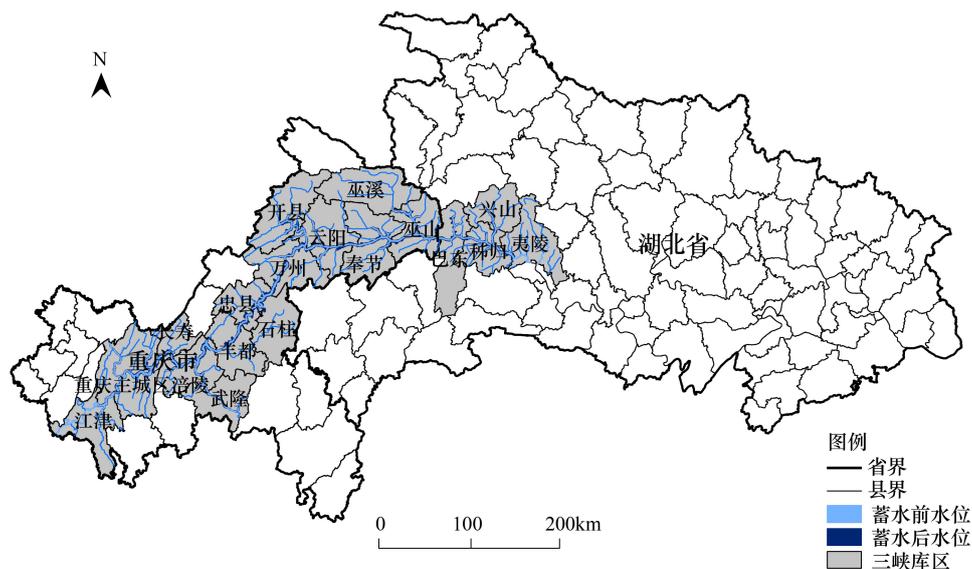


图 1 三峡库区区位及水系图

Fig. 1 Location and water system of the TGRA

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

数据主要来源于《重庆统计年鉴》2002、2003、2012 年,《宜昌统计年鉴》2003、2012 年,《恩施州统计年鉴》2003、2011 年^[25-31],《中国区域统计年鉴》2012 年^[32],各区县统计信息、统计公报、重庆农业农村信息网(www.cqagri.gov.cn)。

2.2 评价指标

将三峡库区农田生态系统服务分为生产功能(产品供给)、生态功能(调节服务——气体调节、水分保持、净化环境,支持服务——营养物质循环、土壤保持)和生活功能(休闲旅游和科研教育)3 类^[9,33]。生产、生活服务价值为直接使用价值,采用市场价值法、旅行费用法和条件价值法评估;生态服务价值为间接使用价值,采用影子价格法、替代成本法、影子工程法和机会成本法评估(表 1)。

2.3 研究方法

2.3.1 产品供给

主要农作物包括粮食作物(水稻、玉米、小麦、豆类、薯类),油料(油菜籽、花生),甘蔗,烟草和蔬菜。市场

价格均采用 1990 年不变价。

表 1 农田生态系统服务类型及其价值评价指标与方法

Table 1 Classification, value evaluation indices and methods of farmland ecosystem services

服务类型 Ecosystem service type	分类指标 Classification index	评价指标 Evaluation index	价值评价方法 Value evaluation method
生产功能 Product supplying	供给服务 Supply services	产品供给	农产品生产量
		气体调节	调节气体量(O ₂ 、CO ₂)
生态功能 Ecologicalregulating	调节服务 Regulation services	水分保持	农田土壤水分保持量
		净化环境	农田消纳处理废弃物、有害污染物吸收
	支持服务 Supporting services	营养物质循环	作物秸秆中养分含量
		土壤保持	保持土壤肥力、减轻泥沙淤积、减少土地废弃
生活功能 Lifeensuring	文化服务 Cultural services	休闲旅游	旅游产生的社会收益
		科研教育	科研项目

2.3.2 气体调节

根据三峡库区农田生态系统各类作物的经济产量、经济系数、作物经济产量含水量等^[34-38],折算主要农作物生物量(含经济产量与秸秆)。再根据光合作用方程式计算农田生态系统各类作物在生长期间的固碳释氧量。O₂的单价按照造林成本法和工业制氧法的平均值 0.3765 元/公斤^[8]计算;C 的单价按照造林成本法和瑞典碳税法的平均值 0.751 元/公斤^[8,39]计算。

2.3.3 水分保持

根据三峡库区农田非毛管孔隙度、土壤容重和土地利用等属性,计算农田水分保持量,运用影子工程法计算其价值。各参数取值为非毛管孔隙度 7.03%^[40],土壤容重取三峡库区紫色土和黄壤的平均值 1.374 t/m³^[22],水库库容成本 0.67 元/立方米^[8]。计算公式如下:

$$E_1 = S \times D \times P_{\text{非}} \times V \times 10000 \quad (1)$$

式中: E_1 为农田土壤水分保持价值量(元); S 为农田面积(hm^2); D 为土层厚度(0.6 m); $P_{\text{非}}$ 为非毛管孔隙度(%); V 为水库库容成本(元/立方米)。

2.3.4 净化环境

净化环境价值的计算包括两个方面:净化大气环境和消纳废弃物。采用替代成本法计算农田吸附 SO₂、NO_x和粉尘的价值。农田吸收 SO₂能力 45 kg $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,滞尘能力 0.95 t $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,吸收 NO_x能力 33.5 kg $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ^[41-42]。吸收 SO₂的成本为 0.6 元/公斤^[8],净化 NO_x的成本为 0.6 元/公斤^[42],削减粉尘成本为 0.17 元/公斤^[8]。采用替代成本法计算农田生态系统消纳畜禽粪便的价值。我国耕地畜禽粪便的负荷为 30 t/ hm^2 ^[43],三峡库区养殖业较发达,畜禽粪便的单位耕地负荷大于该值^[44],农田消纳畜禽粪便量按保守的 30 t/ hm^2 计算,粪便处理平均成本为 0.1 元/公斤。

2.3.5 土壤保持

土壤保持价值表现为土壤肥力保持、减轻泥沙淤积和减少土地废弃三方面。采用潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量的差值计算土壤保持量。依据库区相关研究成果,获取农田土壤保持量^[45];水库库容成本为 0.67 元/立方米^[8];农田年均收益采用农业产值估算;土壤养分含量为三峡库区紫色土和黄壤养分含量的平均值^[46];养分价格采用我国化肥的平均价格 2549 元/吨^[8]。

$$E_2 = A \times 24\% / \rho b \times C \times S \quad (2)$$

式中: E_2 为农田减少泥沙淤积价值量(元/年); A 为单位面积土壤保持量($\text{t} \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$);24%为泥沙淤积在河道

占总流失量的百分比; C 为水库库容成本(元/立方米); ρb 为土壤容重(t/m^3); S 为农田面积(hm^2)。

$$E_3 = A \times B / (\rho b \times D) \times S \times 10000 \quad (3)$$

式中: E_3 为农田减少土地废弃价值量(元/年); A 为单位面积土壤保持量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); B 为单位面积农田年均收益(元/公顷); ρb 为土壤容重($t \cdot m^{-3}$); D 为土层厚度(0.6 m); S 为农田面积(hm^2)。

$$E_4 = A \times P / 1000 \times R \times S \quad (4)$$

式中: E_4 为农田土壤肥力保持价值量(元/年); A 为单位面积土壤保持量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); P 为养分含量(g/kg); R 为养分价格(元/吨); S 为农田面积(hm^2)。

2.3.6 营养物质循环

农田生态系统的凋落物量较小,本文从生物库方面考虑农田生态系统的养分持留,即参与循环的植物体内氮磷钾积累量。由于农田不同于自然林地、草地等,其收获部分会带走土壤养分,本文以作物秸秆中氮磷钾含量进行估算,并采用影子价格法计算其价值。

2.3.7 休闲旅游

三峡库区建有农业观光园、采摘园、农家乐等旅游休闲区,与库区其它农田共同提供了景观娱乐价值。本文休闲旅游价值采用区域主导休闲农业旅游形式的价值进行估算。因重庆与湖北可获取数据类型的不同,以《重庆市旅游农业发展规划(2006—2010)》数据估算库区重庆段2002、2011农业旅游收入,考虑到农业旅游中“农家乐”旅游占的比例最高,以2009年重庆市首批157家星级农家乐在各区县的分布数量为权重,估算各区县蓄水前后的农业旅游收入;以《湖北省乡村旅游发展总体规划》数据估算库区湖北段农家乐和星级农家乐平均收益,再根据各区县2002年与2011年农家乐户数得到湖北段各区县农业旅游收益。

2.3.8 科研教育

三峡库区的科研价值巨大,很多研究有待深入开展,因科研项目有研究期限,采用库区蓄水前后各三年中国知网项目数据库(projects.cnki.net)的平均科研经费投入中与农业相关的部分进行保守估算。

2.3.9 环境压力

农田生态系统服务在给人类和环境提供生产、生态、生活功能的同时,其生产活动也会给环境带来一定的负面影响,包括化肥和农药的不合理施用、地膜残留、不合理的污水灌溉,以及农田温室气体排放所带来的环境污染和资源破坏等。本文以人均生态系统服务价值量、化肥农药施用强度、肥料偏生产力三项指标估算库区农田的环境压力。

(1)地区人口的增加对其环境造成较大的压力,如果某地区生态系统服务价值年度总量的增加不能弥补新增人口对环境造成的压力,将导致一系列的环境问题。因此,人均生态系统服务价值量可以较直观地表征环境压力状况。

人均生态系统服务价值(元/人) = 生态系统服务价值年度总量(万元) / 当年人口总数(万人)

(2)农业生产对环境和资源的负面影响包括农业生产的环境污染、农业对水资源的消耗、水资源流失和生物多样性损失等方面。本文采用化肥施用强度和农药施用强度两项指标评价农业对环境的负面效应^[47]。

化肥施用强度(kg/hm^2) = 化肥施用量(折纯)(kg) / 播种面积(hm^2)

农药施用强度(kg/hm^2) = 农药施用量(kg) / 播种面积(hm^2)

(3)肥料偏生产力(PFP)可以有效地反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量的综合效应。PFP越大,表明土壤基础养分水平越高,化肥施用量综合效应越好。

肥料偏生产力(kg/kg) = 施肥后所获得的作物产量(kg) / 化肥纯养分的投入量(kg)

3 结果与分析

3.1 直接价值

3.1.1 产品供给

受退耕还林工程、蓄水耕地淹没、基本农田建设与土地整理等的影响,三峡库区常用耕地面积由2002年

的 80.71 万公顷增加至 2011 年的 85.78 万公顷,增幅 6.28%。加之化肥与农药施用强度增加的影响,库区各类农作物产量由 2002 年的 1100 余万吨增加到 1500 余万吨。产品供给价值则由 55.04 亿元增加到 69.51 亿元,增幅 26.29%(表 2)。尽管各类农产品产量均有增加,但甘蔗、蔬菜产量增加幅度较大,分别增加至 2002 年的 5.36 倍和 1.83 倍,经济作物与蔬菜产量占农产品产量的比重也由 43.81%增加至 58.33%,价值比重由 36.26%增加至 49.14%,表明种植结构发生改变。同时,单位面积平均产量由 13.74t/hm²增加至 17.56 t/hm²,增幅为 27.80%。

常用耕地面积增加、种植结构调整、化肥农药施用强度的增加是农产品供给价值增加的重要原因,但有研究表明三峡库区耕地资源逐年减少,耕地资源紧张^[48],而化肥、农药施用强度的增加,不利于农田生态系统服务的可持续供给与进一步提升,且可能给三峡水库的水环境安全带来威胁。因此,通过基本农田建设进一步提升地力与优化农田景观格局,控制化肥农药的施用而增施有机肥,同时进一步调整种植结构将是三峡库区农田生态系统服务能力建设的重要内容。

表 2 三峡库区蓄水前后农田生态系统产品供给价值

Table 2 Value of product supply of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

作物类型 Agrotype	2002		2011	
	经济产量/t Economic yield	价值/(10 ⁴ 元) Value	经济产量/t Economic yield	价值/(10 ⁴ 元) Value
粮食 Crops	6230229	350835.07	6277267	353483.87
经济作物 Economic crops	269818	43595.21	410387	56814.96
其中:油料 Oil plants	194532	29179.80	258272	38740.80
甘蔗 Sugarcane	14990	215.70	80272	1155.10
烟叶 Tobaccos	60296	14199.71	71843	16919.06
蔬菜 Vegetables	4588574	156012.67	8375484	284768.59
合计 Total	11088621	550442.95	15063138	695067.42

3.1.2 休闲旅游

三峡库区乡村旅游业资源丰富、旅游客源市场广阔、交通支持体系便捷,已具有一定的发展基础,加上政府积极宣传推广,库区近年来旅游业发展迅速,农家乐经营逐步规范。农业旅游总收入由 2002 年的 2.91 亿元增加至 2011 年的 22.69 亿元,换算为 1990 年不变价分别为 1.45 亿元和 8.69 亿元(表 3),其占直接价值(产品供给与休闲旅游价值之和)的比例由 2.57%增加至 11.11%。表明乡村旅游的大力发展取得了明显的经济效益,已逐渐成为库区农田生态系统服务直接价值的重要组成部分。

表 3 三峡库区蓄水前后农田生态系统休闲旅游价值

Table 3 Value of leisure tourism of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

年份 Year	重庆农业 旅游/(10 ⁴ 元) Chongqing agricultural tourism	库区重庆段 /(10 ⁴ 元) TGRA inChongqing	库区湖北段/(10 ⁴ 元) TGRA inHubei	库区农业旅游/(10 ⁴ 元) Agricultural tourism of the TGRA	库区农业旅游(1990 年 不变价)/(10 ⁴ 元) Agricultural tourism of the TGRA (consolidated value of year 1990)
2002	42400	28897.70	209.65	29107.35	14533.27
2011	225900	153962.20	72957.48	226919.68	86861.00

3.1.3 科研教育

三峡库区是生态敏感区,三峡工程对其环境和生态的影响非常广,针对三峡库区开展的各项科学研究不断增加。根据中国知网科研项目数据库(projects.cnki.net),2000—2002 年库区平均每年科研项目资金投入为 40.33 万元,其中与农业相关的为每年 11.33 万元;蓄水后近三年(2009—2011)平均每年科研项目资金投入为 1231.81 万元,其中与农业相关的为每年 128.00 万元。换算为 1990 年不变价后,农业科研投入从蓄水前 5.66

万元/年增长至 49.00 万元/年,为蓄水前的 8.66 倍(表 4)。

表 4 三峡库区蓄水前后农田生态系统科研教育价值

Table 4 Value of scientific research and education of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

年份 Year	农业相关/(10 ⁴ 元) Agriculture related	其他/(10 ⁴ 元) Others	总计/(10 ⁴ 元) Total	农业相关占总价值比例/% Agriculture related proportion
2000	0	41.00	41.00	0
2001	13.00	23.00	36.00	36.11
2002	21.00	23.00	44.00	47.73
2009	103.00	2873.00	2976.00	3.46
2010	281.00	423.44	704.44	39.89
2011	0	15.00	15.00	0
2000—2002 平均值 Mean value	11.33	29.00	40.33	28.10
2009—2011 平均值 Mean value	128.00	1103.81	1231.81	10.39
2000—2002 平均值(1990 年不变价) Mean value (consolidated value of year 1990)	5.66	—	—	—
2009—2011 平均值(1990 年不变价) Mean value (consolidated value of year 1990)	49.00	—	—	—

3.2 间接价值

3.2.1 气体调节

如表 5 所示,库区蓄水后各农作物生物量均增加,生物量由 1118.10 万吨增加至 1203.63 万吨,增加量主要来自蔬菜、粮食和油料作物的增加,分别占总增加量的 44.27%、30.11%和 20.79%。而各作物生物量的增加幅度以甘蔗最大为 4.36 倍,其余依次为蔬菜 82.53%、油料 32.77%、烟叶 19.15%、粮食 2.56%。除粮食外,其余各作物增加幅度都超过了总生物量的增加幅度 7.65%。对应气体调节价值由 87.78 亿元增加至 94.49 亿元,增幅 7.65%,为森林生态系统调节当地气候起到了一定的补充作用。

表 5 三峡库区蓄水前后农田生态系统气体调节价值

Table 5 Value of gas regulation of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

作物类型 Agrotype	经济产量/t Economic yield	生物量/t Biomass	固定 CO ₂ 价值/(10 ⁴ 元) Value of CO ₂ fixation	释放 O ₂ 价值/(10 ⁴ 元) Value of O ₂ release	总价值/(10 ⁴ 元) Total value
2002 年					
粮食 Crops	6230229	10071352.09	336235.75	454419.41	790655.16
油料 Oil plants	194532	542744.28	18119.72	24488.62	42608.34
甘蔗 Sugarcane	14990	4946.70	165.15	223.20	388.35
烟叶 Tobaccos	60296	103106.16	3442.24	4652.15	8094.39
蔬菜 Vegetables	4588574	458857.40	15319.12	20703.65	36022.77
合计 Total	11088621	11181006.63	373281.98	504487.03	877769.01
2011 年					
粮食 Crops	6277267	10328866.21	344832.95	466038.44	810871.39
油料 Oil plants	258272	720578.88	24056.79	32512.52	56569.31
甘蔗 Sugarcane	80272	26489.76	884.37	1195.22	2079.59
烟叶 Tobaccos	71843	122851.53	4101.44	5543.06	9644.50
蔬菜 Vegetables	8375484	837548.40	27961.86	37790.18	65752.04
合计 Total	15063138	12036334.78	401837.41	543079.42	944916.83

3.2.2 水分保持

受常用耕地面积增加的影响,库区蓄水后农田水分保持量增加了 2136.28 万吨,服务价值增加了 0.14 亿

元,上升幅度与常用耕地面积上升幅度一致(表6)。

表6 三峡库区蓄水前后农田生态系统水分保持价值

Table 6 Value of water retention of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

年份 Year	常用耕地面积/ hm^2 Area of Regularly Cultivated Land	水分保持量/ (10^4t) Amount of water retention	总价值/ (10^4元) Total value
2002	807130	34044.76	22810.00
2011	857777	36181.04	24241.30

3.2.3 净化环境

如表7所示,蓄水后库区农田生态系统净化环境价值由25.90亿元增加至27.52亿元。由于库区养殖业较发达^[44],表现为农田消纳废弃物价值远高于净化大气价值。

表7 三峡库区蓄水前后农田生态系统净化环境价值

Table 7 Value of environment purification of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

年份 Year	吸收 SO_2 量/ t Amount of SO_2 absorption	滞尘量/ t Amount of dust detention	吸收 NO_x 量/ t Amount of NO_x absorption	净化大气 价值/ (10^4元) Value of air purification	消纳废弃 物量/ (10^4t) Amount of wastes disposal	消纳废弃 物价值/ (10^4元) Value of wastes disposal	净化环境 价值/ (10^4元) Value of environment purification
2002	36320.87	766773.98	27038.87	16836.74	2421.39	242139.15	258975.89
2011	38599.97	814888.34	28735.54	17893.23	2573.33	257333.16	275226.39

3.2.4 土壤保持

如表8所示,受常用耕地面积增加的影响,蓄水后库区土壤保持量增加,减轻泥沙淤积价值、土壤肥力保持价值随之增加,加之农田年均收益增加,减少土地废弃价值增幅较高,为26.27%,使得土壤保持价值增幅(6.53%)略高于常用耕地面积增幅(6.28%)。

表8 三峡库区蓄水前后农田生态系统土壤保持价值

Table 8 Value of soil conservation of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

年份 Year	土壤保持量/ (10^4t) Amount of soil conservation	减轻泥沙淤积 价值/ (10^4元) Value of decreasing silt	减少土地废弃 价值/ (10^4元) Value of reducing abandoned land	土壤肥力保持 价值/ (10^4元) Value of maintaining soil fertility	土壤保持价值/ (10^4元) Total value of soil conservation
2002	1381.75	161.71	1143.04	86784.20	88088.95
2011	1468.46	171.82	1443.37	92229.83	93845.02

3.2.5 营养物质循环

由于库区作物经济产量增加,秸秆产量相应增加,维持营养物质循环价值由3.40亿元增加到3.69亿元,增幅8.53%(表9)。由于粮食作物播种面积最大,蓄水前后其服务价值均占总价值的90%以上,也是蓄水后营养物质循环价值增加的主要部分,但其所占比例略有下降,体现了农业种植结构的调整。尽管蔬菜产量成倍增加,但蔬菜秸秆生物量低,对营养物质循环价值贡献不大,而更多地是带走土壤养分,从而依靠施肥以维持产量,进而使得环境压力增大。此外,由于农村燃料、养殖等的需求,加之秸秆机械化还田在丘陵山地区存在一定的难度与较高的成本,作物秸秆并未全部还田,实际营养物质循环价值会低于该估算值。

3.3 总价值构成及空间分布

3.3.1 总价值构成

如表10所示,从库区农田生态系统服务总价值来看,蓄水后由184.66亿元增加到215.70亿元,增幅16.81%,增加部分主要体现在产品供给、休闲旅游和气体调节上,其增加量占总价值增加量的比例分别为46.62%、23.32%和21.62%。从变化幅度来看,科研教育和休闲旅游服务价值的增加尤为显著,与蓄水前相比

分别增加了 7.66 倍和 4.99 倍,休闲旅游价值的成倍增长使其逐渐成为直接价值的重要部分;之后是产品供给服务价值,增幅为 26.29%,其他服务价值增幅均低于 10%。蓄水前农田生态系统总服务价值约为产品经济价值的 3.4 倍,蓄水后降为 3.1 倍,间接价值与直接价值的比值由 2.3 降为 1.8。

表 9 三峡库区蓄水前后农田生态系统营养物质循环价值

Table 9 Value of nutrient recycling of farmland ecosystem services in the TGRA before and after impoundment

作物类型 Agrotype	经济产量/t Economic yield	秸秆生物量/t Strawbiomass	秸秆中 NPK 含量/t NPK content in Straw	营养物质循环价值/(10 ⁴ 元) Value of nutrient recycling
2002 年				
粮食 Crops	6230229	4908573	123696	31530.11
油料 Oil plants	194532	330704	6945	1770.28
甘蔗 Sugarcane	14990	1274	108	27.53
烟叶 Tobaccos	60296	42810	2483	632.92
蔬菜 Vegetables	4588574	—	—	—
合计 Total	11088621	5283361	133232	33960.84
2011 年				
粮食 Crops	6277267	5240350	132057	33661.33
油料 Oil plants	258272	439062	9220	2350.18
甘蔗 Sugarcane	80272	6823	580	147.84
烟叶 Tobaccos	71843	51009	2959	754.25
蔬菜 Vegetables	8375484	—	—	—
合计 Total	15063138	5737244	144816	36913.60

从农田各项生态系统服务价值所占比例来看,蓄水前后基本一致,占 30%左右的为气体调节和产品供给,占 10%以上的为净化环境,其它服务价值所占比例均低于 10%,蓄水后气体调节服务价值占总价值的比例变化较大,减少了 3.73 个百分点。尽管蓄水后生态功能价值略有增加,但其增幅(7.28%)远小于总价值的增幅(16.81%),其占总价值的比例下降了 5.66 个百分点。

表 10 三峡库区蓄水前后各项农田生态系统服务价值及其所占比例对比

Table 10 Comparison of ESV and its proportions of farmland in the TGRA before and after impoundment

服务类型 Ecosystem service type	2002		2011		价值变化幅度/% Value change	所占比例变化 2011—2002/% Proportion of variation
	价值/(10 ⁸ yuan) Value	所占比例/% Proportion	价值/(10 ⁸ yuan) Value	所占比例/% Proportion		
产品供给 Product supply	55.04	29.81	69.51	32.23	26.29	2.42
气体调节 Gas regulation	87.78	47.54	94.49	43.81	7.64	-3.73
水分保持 Water retention	2.28	1.23	2.42	1.12	6.14	-0.11
净化环境 Environment purification	25.90	14.03	27.52	12.76	6.25	-1.27
土壤保持 Soil conservation	8.81	4.77	9.38	4.35	6.47	-0.42
营养物质循环 Nutrient recycling	3.4	1.84	3.69	1.71	8.53	-0.13
休闲旅游 Leisure and tourism	1.45	0.79	8.69	4.03	499.31	3.24
科研教育 Scientific research and education	0.000566	0	0.0049	0	765.72	0
直接价值 Direct Value	56.49	30.59	78.20	36.25	38.43	5.66
间接价值 Indirect Value	128.17	69.41	137.5	63.75	7.28	-5.66
总价值 Total Value	184.66	100	215.70	100	16.81	0

如前文所述,2002—2011 年间,退耕还林工程实施了 16.15 万公顷,蓄水淹没耕地 1.69 万公顷,单位面积农田生态系统服务价值由 2.29 万元/公顷增加至 2.51 万元/公顷。按照 2011 年单位面积农田生态系统服务

价值估算,蓄水淹没耕地的农田生态系统服务价值约为 4.24 亿元/年,其中产品供给价值 1.37 亿元/年。

3.3.2 价值空间分布

库区蓄水前后各区县农田生态系统服务价值变化空间分布如图 2 所示。蓄水后各区县农田生态系统服务价值除重庆主城区明显下降、长寿区略有下降外,其余均增加;常用耕地面积减少与粮食总产量降低是上述区域农田生态系统服务价值下降的主要原因。尽管江津区、万州区、秭归县等区县常用耕地面积也明显减少(减少 1035—3790 公顷),但低于长寿区与重庆主城区的减少量(分别为 5585 公顷和 17648 公顷),且因种植结构变化后经济作物与蔬菜的产量增加量较大,加上化肥、农药施用强度增加(增幅分别为江津 37.72%、37.12%,秭归 105.56%、30.67%),其农田生态系统服务价值仍表现为增加。农田生态系统服务价值增加量与增幅最高的为江津区、其次为涪陵区,前者主要由于粮食产量增加量最高,后者由于蔬菜产量增加量最高所致。

2002 年服务价值大于 15 亿元的区县仅有重庆主城区和开县,到 2011 年增加了江津区、涪陵区和万州区;同时,2011 年夷陵区、巫山县和石柱县超过了 8 亿元,使得低于 8 亿元的区县由 8 个下降到 5 个。从空间分布上看,农田生态系统服务价值低于 8 亿元的区县集中在库首的秦巴山片区与渝东南武陵山区,这可能与上述区域地形地势造成的耕地资源差异有关。具体而言,三峡库区库尾段位于四川盆地东部边缘,地势复杂性较低,相对平坦开阔,耕地资源相对丰富,除重庆主城区外,2011 年常用耕地面积介于 36600—67850 公顷之间;库首段属川鄂边境山地,受大巴山、巫山等山脉影响,地势复杂,山高坡陡,耕地资源贫乏,尤其是兴山县、秭归县和夷陵区,其 2011 年常用耕地面积介于 12950—35980 公顷之间;渝东南武陵山区则受到山多地少耕地资源稀缺,“望天田”较多等因素的制约,武隆县、石柱县和丰都县 2011 年常用耕地面积介于 29500—37660 公顷之间。

3.4 农田生态系统服务与环境压力

3.4.1 农业生产所带来的环境压力

农田生态系统与自然生态系统的本质区别在于自然演替的进程被人为截断,人为干预的设定目标是获得更多的有益于人类自身的净产出^[49],表现为维持与提高农田生态系统的产品供给服务。而农作物种植过程中化肥、农药等的施用会不可避免地带来面源污染等问题。本文以库区蓄水前后农田化肥、农药施用强度和 PFP 值的变化来表征获得该水平农田生态系统产品供给服务时所带来的环境压力的变化。

如表 11 所示,蓄水后农田生态系统化肥和农药的施用强度均明显增加,化肥施用强度由 224.94 kg/hm² 增长至 313.46 kg/hm²,增幅为 39.35%;;农药施用强度由 5.52 kg/hm² 增长到 6.00 kg/hm²,增幅为 8.70%。其中,化肥施用强度增幅远高于单位面积产量、农田生态系统产品供给价值与总价值的增幅。不过,与全国平均的化肥施用强度 351.50 kg/hm²(2011 年)和农药施用强度 11.01 kg/hm²(2011 年)^[50]相比,库区仍相对较低。然而,由于库区水环境安全的特殊性,农田生态系统农药、化肥施用强度对库区水质与水环境的影响不容忽视。根据 2003、2012 年《长江三峡工程生态与环境监测公报》^[51-52],2002 年库区全年化肥流失总量为 1.07 万吨;2011 年全年化肥流失总量为 1.23 万吨,农药全年流失 44.9 吨。此外,据统计^[53]消落带中共有耕地(水田、旱地)133.67 hm²,虽然这些农田提供了一定的粮食,但消落带生态十分脆弱,在此区域的农业种植会给三峡水库带来一系列的环境问题。从农田 PFP 值来看,蓄水前后无明显变化,分别为 27.88 kg/kg 和 27.46 kg/kg,但高于全国平均值 16.9 kg/kg(2005 年)^[54],表明三峡库区农田土壤基础养分水平和化肥施用量的综合效应与我国平均水平相比相对较好。而同期重庆非库区农田 PFP 值蓄水前后分别为 29.27 kg/kg 和 26.60 kg/kg,相比而言库区农田 PFP 值相对稳定。

上述分析表明,蓄水后库区化肥施用强度等的加大,对农产品总产与单产增加做出了贡献,但 PFP 值的变化表明化肥的增产效益有下降的趋势,同时增加了农业面源污染的风险。

3.4.2 人口、耕地资源压力对农田生态系统服务的影响

如表 11 所示,蓄水后库区近 10 年间,总人口增加了 7.28%,而农业人口减少了 14.05%。由于总人口的

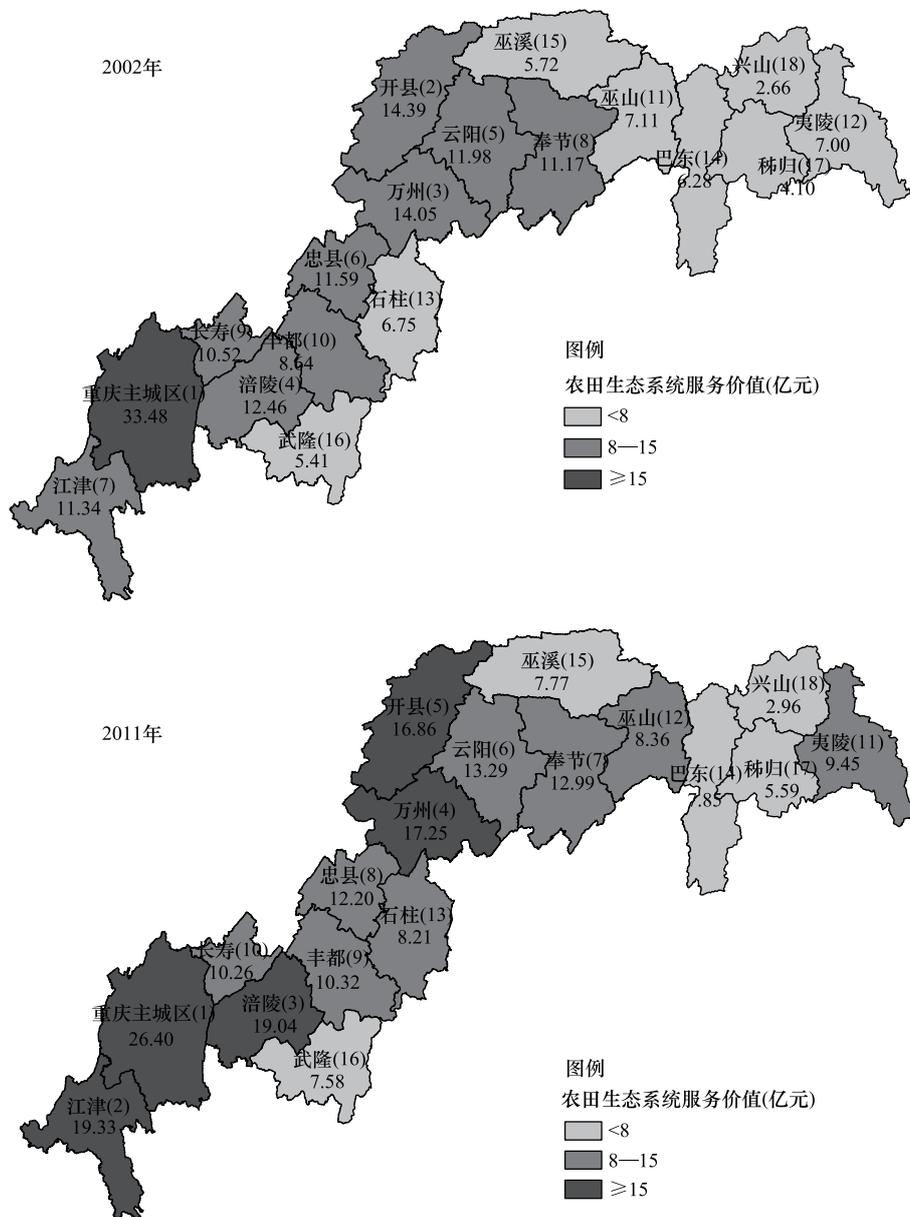


图2 三峡库区蓄水前后各县区农田生态系统服务价值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ESV of farmland in the TGRA before and after impoundment

增加幅度低于农田生态系统服务价值的增加幅度,使得人均农田生态系统服务价值(总人口)增加了8.89%。表明,库区蓄水后农田生态系统服务价值的增加已较好地缓冲了人口增长的压力。然而,库区人均常用耕地面积已由0.614亩下降为0.608亩。

同时,耕地资源也在逐年减少^[48],人地矛盾更加突出。耕地面积的变化受多种因素影响,有研究表明三峡库区耕地面积变化的主要驱动因素为人为活动,尤其与1998年以来实施的退耕还林工程有关^[55]。尽管退耕还林面积(16.15万公顷)远高于库区淹没的耕地面积(1.69万公顷),但在库区平地厚地成片地少、坡地薄地零星地多的自然条件下(如云阳县2000年前坡度在25°以上的耕地为75万亩,居重庆之首^[56]),淹没的耕地在质量、水源、交通等方面都具有突出的优势,在退耕还林工程与蓄水耕地淹没等的综合作用下,部分区域耕地面积会明显减少。本文统计的库区常用耕地面积虽略有增加,但仍然受到耕地资源紧张的制约,中国科学院遥感应用研究所^[48]对三峡库区耕地的遥感动态监测研究表明,三峡库区耕地资源逐年减少,垦殖指数呈现减小趋势,耕地资源紧张。前文的空间分析也表明,部分区县的常用耕地面积也表现出明显减少,且农田生

态系统服务价值低于 8 亿元的区县集中在秦巴山区与渝东南武陵山区,主要受耕地资源数量不足与质量不高的双重制约,而库区蓄水淹没耕地使得上述区县作物在较高海拔区域种植的比例增加,由缓坡向陡坡发展,并进一步受到水资源的制约。因此,农田生态系统服务价值的进一步增加将更多地依赖耕地质量、种植强度与种植水平等的提高。此外,农业人口的下降和城镇人口的增加,使得农田生态系统服务对缓解城镇环境压力的需求增加。

综上所述,库区蓄水后,农田生态系统服务受到耕地资源逐年减少、高质量耕地淹没、总人口增加和农业人口减少等多种因素的影响。此外,三峡库区农田生态系统服务中生态功能价值增加幅度较小,其占总价值的比例也下降了 5.66 个百分点,表明库区农田生态系统直接价值(休闲旅游与产品供给)的可持续供给与进一步提升可能会受到间接价值不足和环境压力升高的制约,进而加大对库区其它生态系统(如林地等)间接价值的需求。

表 11 三峡库区蓄水前后农田生态系统服务价值与环境压力

Table 11 ESV and environmental pressures of farmland in the TGRA before and after impoundment

项目 Item	2002	2011
总人口 Total population (10^4 person)	1972.09	2115.59
农业人口 Agricultural population (10^4 person)	1425.53	1225.24
农业人口人均生态系统服务价值 ESV per head (yuan per head)	1295.37	1760.57
总人口人均生态系统服务价值 ESV per head (yuan per head)	936.36	1019.63
肥料偏生产力 PFP (kg/kg)	27.88	27.46
化肥施用强度 Use intensity of chemical fertilizer (kg/hm^2)	224.94	313.46
农药施用强度 Use intensity of Pesticide (kg/hm^2)	5.52	6.00

4 结论与讨论

三峡库区蓄水后,农田生态系统各项服务价值均有增加,总价值增加了 16.81%,增加部分主要体现在产品供给、休闲旅游和气体调节,休闲旅游的发展使得休闲旅游价值成倍增长,使其逐渐成为直接价值的重要部分;与生产功能和生活功能价值增加幅度 26.29% 和 4.99 倍相比,生态功能价值增加幅度较小,仅为 7.28%,其占总服务价值的比例也下降了 5.66 个百分点,表明库区直接价值(休闲旅游与产品供给)的可持续供给与进一步提升可能会受到间接价值不足的制约,进而加大对库区其它生态系统(如林地等)间接价值的需求。

总服务价值的变化是自然与包括三峡工程在内的人类活动综合影响的结果,其增加原因主要与常用耕地面积增加、种植结构调整、化肥农药施用强度增加,以及休闲旅游发展和科研投入加大有关;在退耕还林工程与蓄水耕地淹没等的综合作用下,部分区域耕地面积会明显减少,在这些区域,种植结构调整、化肥农药施用强度增加对农田生态系统服务价值的增加起主导作用。按照本文 2011 年单位面积农田生态系统服务价值(1990 年不变价)估算,蓄水淹没耕地的农田生态系统服务价值约为 4.24 亿元/年,其中产品供给价值 1.37 亿元/年。

化肥农药施用强度的增加,化肥施用增产效益的下降,是维持与提高农田生态系统产品供给服务所带来的环境压力,而农田生态系统服务除受到化肥农药施用强度增加对其自身的抑制和间接价值所占比重下降的影响外,还受到总人口增加与农业人口减少、耕地资源逐年减少和蓄水淹没高质量耕地的制约。空间分布上看,农田生态系统服务价值低于 8 亿元的区县集中在秦巴山区与渝东南武陵山区,上述区域农田生态系统服务受耕地资源数量不足与质量不高的双重制约作用更为明显。因此,农田生态系统服务价值的进一步增加将更多地依赖耕地质量、种植强度与种植水平等的提高。此外,尽管休闲旅游的发展使其逐渐成为库区农田生态系统直接价值的重要组成部分,但同时旅游消耗也在一定程度上加大了对农田生态系统服务的需求,从而可能加重当前的环境压力。

也有研究表明,库区耕地生态系统服务价值从 1990 年至 2011 年表现为下降,下降幅度达 43.42%^[57],该结果采用的是修订的单位面积生态系统服务价值当量因子与 TM 影像解译的该类土地面积的乘积计算得出。本文与该研究结果不同的原因主要在于计算时间段和农田生态系统服务项的不同,本文计算的时间段为 2002—2011 年,计算服务项中未包括生物多样性保护等内容。

此外,库区蓄水引起的气候变化也可能对农田生态系统服务带来影响。有研究表明 2004—2007 年库区各站点年平均温度均比常年偏高或接近常年,偏高幅度在 0.2—1.0℃,比预计值(偏高 0.1—0.2℃)大,这种变化是在全球气候变暖背景下发生的,年平均气温的上升受全球气候变暖和三峡水库蓄水共同影响。现有观测资料和数值模拟结果表明,三峡水库建成蓄水后,对库区周边局地小气候产生了微小的影响,已表现为冬暖夏凉的气温微调作用^[58]。由于三峡库区蓄水所产生的诸如气候变化等的影响是一个慢变过程,且需要更长时间的观测资料积累以及更小尺度和加密的观测资料分析才能更科学、准确地判断水库蓄水的影响,同时目前仍缺少这种影响的定量化研究。

综上所述,三峡库区蓄水后经过近 10 年的发展,总体上常用耕地面积略有增加,种植结构调整、化肥农药施用强度增加、休闲旅游发展和科研投入增加使得农田生态系统各项服务价值均不同程度增加,且休闲旅游价值逐渐成为直接价值的重要组成部分,但间接价值所占比例明显下降。同时,耕地资源紧张和人口增加,加之化肥、农药施用强度增加,不利于农田生态系统服务的可持续供给与进一步提升,进而可能给三峡水库的水环境安全带来威胁。对于三峡库区未来农业的发展,除通过生态退耕等措施缓解农业生产带来的环境压力外,可进一步利用农田生态系统内部的生态过程优化来调整农田生态系统服务,同时重视耕地质量建设与种植水平等的提高,从而提升农田生态系统服务,并控制农药、化肥的用量,减轻环境压力。

参考文献 (References):

- [1] Gretchen C Daily. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997: 1-10.
- [2] Robert Costanza, Ralph d'Arge, Rudolf de Groot, Stephen Farber, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naem, Robert V. O'Neill, Jose Paruelo, Robert G. Raskin, Paul Sutton, Marjan van den Belt. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] Urs P Kreuter, Heather G Harris, Marty D Matlock, Ronald E Lacey. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 333-346.
- [4] Fabien Quérier, Sandra Lavorel, Wilfried Thuiller, Ian Davies. Plant-trait-based modeling assessment of ecosystem-service sensitivity to land-use change. *Ecological Applications*, 2007, 17(8): 2377-2386.
- [5] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [6] Johanna Björklund, Karin E. Limburg, Torbjörn Rydberg. Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: an example from Sweden. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 269-291.
- [7] Gretchen C. Daily. Management objectives for the protection of ecosystem services. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(6): 333-339.
- [8] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [9] 刘鸣达, 黄晓姗, 张玉龙, 崔建国. 农田生态系统服务功能研究进展. *生态环境*, 2008, 17(2): 834-838.
- [10] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(4): 55-60.
- [11] 陈源泉, 高旺盛. 中国粮食主产区农田生态服务价值总体评价. *中国农业资源与区划*, 2009, 30(1): 33-39.
- [12] 唐衡, 郑渝, 陈阜, 杨立国, 张海林, 孔管铎. 北京地区不同农田类型及种植模式的生态系统服务价值评估. *生态经济*, 2008, (7): 56-59, 114.
- [13] 元媛, 刘金铜, 靳占忠. 栾城县农田生态系统服务功能正负效应综合评价. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2809-2814.
- [14] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华, 肖焱. 玛纳斯河流域农田生态系统服务功能价值评估. *中国生态农业学报*, 2009, 17(6): 1259-1264.
- [15] 岳东霞, 杜军, 巩杰, 降同昌, 张佳静, 郭建军, 熊友才. 民勤绿洲农田生态系统服务价值变化及其影响因子的回归分析. *生态学报*, 2011, 31(9): 2567-2575.
- [16] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. *生态学报*, 2013, 33(1): 168-178.
- [17] 姜永华, 江洪, 曾波, 何丙辉. 三峡库区(重庆段)土地利用变化对生态系统服务价值的影响分析. *水土保持研究*, 2008, 15(4): 234-

- 237, 243-243.
- [18] 肖建红, 施国庆, 毛春梅, 邢贞相. 三峡工程对河流生态系统服务功能影响预评价. 自然资源学报, 2006, 21(3): 424-431.
- [19] 黄秀山. 三峡库区生态与环境研究. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.
- [20] 冉祥滨, 姚庆祯, 巩瑶, 陈洪涛, 米铁柱, 刘鹏霞, 于志刚. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 1-8.
- [21] 刘春霞, 李月臣, 杨华, 闵婕, 王才军, 张虹. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价. 地理学报, 2011, 66(5): 631-642.
- [22] 马志林. 三峡库区坡耕地水土流失特征及防治效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [23] 中国长江三峡集团公司, 三峡工程知多少——为什么说“百万移民”是世界级难题. [2006-05-16]. <http://www.ctgpc.com.cn/about3g/index.php? mClassId=015005>.
- [24] 国家发展和改革委员会. 三峡库区经济社会发展规划. [2004-09-21]. <http://www.sdpc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/115zxgh/200709/P020070928500342439893.pdf>.
- [25] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴 2002. 北京: 中国统计出版社, 2002.
- [26] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴 2003. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [27] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴 2012. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [28] 宜昌市统计局. 宜昌统计年鉴 2003. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [29] 宜昌市统计局. 宜昌统计年鉴 2012. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [30] 恩施州统计局. 恩施州统计年鉴 2003. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [31] 恩施州统计局. 恩施州统计年鉴 2011. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [32] 国家统计局. 中国区域经济统计年鉴 2012. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [33] 章家恩, 饶卫民. 农业生态系统的服务功能与可持续利用对策探讨. 生态学杂志, 2004, 23(4): 99-102.
- [34] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 孟海波, 孙丽英, 张艳丽, 王飞, 李冰峰. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291-296.
- [35] 中国农业部, 美国能源部项目专家组. 中国生物质资源可获得性评价. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [36] 刘刚, 沈镛. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9-19.
- [37] 罗怀良. 川中丘陵地区近 55 年来农田生态系统植被碳储量动态研究——以四川省盐亭县为例. 自然资源学报, 2009, 24(2): 251-258.
- [38] 杨志新, 郑大玮, 文化. 北京郊区农田生态系统服务功能价值的评估研究. 自然资源学报, 2005, 20(4): 564-571.
- [39] 高琼, 李月辉, 肖笃宁, 胡远满. 沈阳市域森林生态系统服务功能价值评估. 东北林业大学学报, 2008, 36(2): 69-72.
- [40] 曾立雄. 三峡库区兰陵溪小流域养分的分布、迁移与控制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [41] 马新辉, 孙根年, 任志远. 西安市植被净化大气物质质量的测定及其价值评价. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 83-86.
- [42] 马新辉, 任志远, 孙根年. 城市植被净化大气价值计量与评价——以西安市为例. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 180-182.
- [43] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [44] 彭里. 重庆市畜禽粪便污染调查及防治对策[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- [45] 简太敏. 三峡库区(重庆段)生态服务功能定量遥感测量与价值估算[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2012.
- [46] 温熙胜. 三峡库区坡耕地土壤侵蚀研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [47] 何露, 闵庆文, 张丹. 农业多功能性多维评价模型及其应用研究——以浙江省青田县为例. 资源科学, 2010, 32(6): 1057-1064.
- [48] 张磊, 吴炳方, 朱亮, 王鹏. 三峡工程建设期库区耕地的时空变化及驱动力分析. 地球信息科学学报, 2011, 13(3): 297-304.
- [49] 彭涛, 高旺盛, 隋鹏. 农田生态系统健康评价指标体系的探讨. 中国农业大学学报, 2004, 9(1): 21-25.
- [50] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2012. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [51] 中国环境监测总站. 长江三峡工程生态与环境监测公报 2003. 国家环境保护总局, 2003.
- [52] 中国环境监测总站. 长江三峡工程生态与环境监测公报 2012. 中华人民共和国环境保护部 2012.
- [53] 张虹. 三峡库区消落带土地资源特征分析. 水土保持通报, 2008, 28(1): 46-49.
- [54] 王激清, 马文奇, 江荣凤, 张福锁. 养分资源综合管理与中国粮食安全. 资源科学, 2008, 30(3): 415-422.
- [55] 曹银贵, 王静, 程焯, 付梅臣, 饶彩霞, 许宁. 三峡库区耕地变化研究. 地理科学进展, 2006, 25(6): 117-125.
- [56] 唐荣栋. 云阳县退耕还林工程建设成效探讨. 中国西部科技, 2014, 13(5): 78-79.
- [57] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [58] 中国工程院三峡工程阶段性评估项目组. 三峡工程阶段性评估报告. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.