

DOI: 10.5846/stxb202108252374

苏伯儒, 刘某承, 李志东. 农业文化遗产生态系统服务的复合增益——以浙江瑞安滨海塘河台田系统为例. 生态学报, 2023, 43(3): 1016-1027.

Su B R, Liu M C, Li Z D. Extra services of agricultural heritage systems ecosystem services: A case study on Costal Bench Terrace System in Ruian, Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1016-1027.

农业文化遗产生态系统服务的复合增益 ——以浙江瑞安滨海塘河台田系统为例

苏伯儒^{1,2}, 刘某承^{1,*}, 李志东^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 农业文化遗产是农村与其所处环境长期协同进化和动态适应下所形成的独特的土地利用系统和农业景观, 具备丰富的景观要素。景观要素的耦合会对景观整体的生态系统服务供应产生影响。研究构建了多景观要素的“生态系统服务复合增益”理论框架, 并以浙江瑞安滨海塘河台田系统为例, 将其景观要素划分为农田生态系统和水域生态系统, 并分别评估其景观要素生态系统服务价值、景观整体生态系统服务价值和生态系统服务复合增益价值。研究结果显示: (1) 2019 年浙江瑞安滨海塘河台田系统生态系统服务总价值为 187.72 亿元, 文化服务价值最高, 占总价值的 91.8%; (2) 农田的生态系统服务价值为 6.03 亿元, 占总价值的 3.2%, 水域的生态系统服务价值为 8.15 亿元, 占总价值的 4.3%; (3) 生态系统服务复合增益价值为 173.54 亿元, 占总价值的 92.5%。研究表明, 农田和水域两种景观要素的耦合能提高浙江瑞安滨海塘河台田系统中食物供应、气体调节、盐碱地改良、休息游憩四种生态系统服务价值, 致使其产生生态系统服务复合增益。

关键词: 农业文化遗产; 景观格局; 生态系统服务; 复合增益

Extra services of agricultural heritage systems ecosystem services: A case study on Costal Bench Terrace System in Ruian, Zhejiang Province

SU Boru^{1,2}, LIU Moucheng^{1,*}, LI Zhidong^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Agricultural heritage systems is a unique land use system and agricultural landscape formed under the long-term co-evolution and dynamic adaptation of the countryside and its environment, which is rich in landscape elements. The coupling of landscape elements will have impact on the supply of ecosystem services in the whole landscape. Agricultural heritage systems under human long-term cultivation has gradually formed a special landscape pattern. However, the current research on the valuation of agricultural heritage systems ecosystem services is limited to regard it as a single ecosystem, ignoring the impact of the interaction between patches on the supply of ecosystem services, such as the movement of heat, water and nutrients among patches. This research constructed a theoretical framework of “Extra services” and defined “Extra services”. We took Costal Bench Terrace System in Ruian, Zhejiang Province as the research object and divided its landscape elements into farmland ecosystem and aquatic ecosystem. Referring to the Millennium Ecosystem Assessment Classification System, this research used the method of ecological economics to evaluate the ecosystem services value of landscape elements, the ecosystem services value of whole landscape, and the Extra services value, respectively. The

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42171279); 国家自然科学基金中德合作交流项目(M-0342)

收稿日期: 2021-08-25; **网络出版日期:** 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liumc@igsrr.ac.cn

results show that: (1) the total value of ecosystem services in the Costal Bench Terrace Ecosystem was 18.772 billion yuan in 2019, and the value of cultural services was the highest, accounting for 91.8% of the total value; (2) The ecosystem service value of farmland ecosystem was 0.603 billion yuan, accounting for 3.2% of the total, while the ecosystem service value of aquatic ecosystem was 0.815 billion yuan, accounting for 4.3% of the total; (3) The Extra services value was 17.354 billion yuan, accounting for 92.5% of the total. The coupling of farmland ecosystem and aquatic ecosystem leads to the enhancement of the supply of four type of ecosystem services in raised-field agricultural system, which are food production, gas regulation, saline-alkali soil reclamation, and leisure services. This ultimately leads to the generation of Extra services.

Key Words: Global Important Agricultural Heritage Systems; landscape pattern; ecosystem services; extra services

现代农业生产以作物产量和经济效益为主要目标,通过扩大耕地面积、消除非作物生境,使得农业集约化发展,农田景观的异质性下降^[1],然而这种单纯注重经济价值的现代集约化农业并不能满足人们对可持续发展的需求。农业文化遗产作为一种典型的社会-生态-经济复合系统^[2],具有显著的生态效益、经济效益和社会效益,对于协调人与自然关系,促进经济社会可持续发展具有重要意义^[3]。生态系统服务的定义为生态系统给人类带来的惠益^[4],过往研究证实开展农业文化遗产生态系统服务评估对遗产地生态补偿标准厘定、农业文化遗产综合价值衡量具有重要作用。

生态系统服务价值可作为农业文化遗产地生态补偿标准上限^[5],Liu 等结合农户受偿意愿,将稻田新增生态系统服务作为补偿目标,推导出红河哈尼梯田生态补偿标准^[6]。众多研究者通过评估农业文化遗产生态系统服务价值来衡量其综合价值,如李禾尧等对江苏兴化垛田传统农业系统生态系统服务进行了识别与评估,量化其重要的生态价值与社会价值^[7];Liu 等从调节服务、供给服务和支撑服务三方面评估广东乳源稻鱼共生系统,发现该系统可以提高稻田的综合价值^[8]。

然而现阶段农业文化遗产生态系统服务评估研究囿于将其视为一个单一生态系统,忽视了农业文化遗产在生态关系调整、系统结构功能整合等“软关系”上的微妙处理^[9]。大量研究显示,农田中的半自然生境对花粉传播^[10]、小气候调节^[11]、养分迁移^[12]等生态过程有较大影响,进而影响农业景观的生态系统服务供应。农业文化遗产在人类长期耕种下逐渐演化形成特殊的景观格局,其内部景观要素的排列使得其具备空间异质性,斑块间的相互作用,如热量、水分、养分在斑块间的运动势必会对景观整体的生态系统服务造成影响。因此,从宏观角度综合系统地归纳农业景观要素耦合对农业景观整体生态系统服务供应的影响机制,探究景观要素生态系统服务和景观整体生态系统服务间的定量关系尤为重要。

鉴于此,本研究依据系统科学原理和景观生态学原理,构建多景观要素的“生态系统服务复合增益”理论框架,选取浙江瑞安滨海塘河台田系统开展实证研究,综合评估台田农业系统景观要素的生态系统服务价值、景观整体生态系统服务价值和生态系统服务复合增益价值,以期对农业文化遗产生态系统服务评估研究提供借鉴。

1 生态系统服务复合增益理论框架构建

1.1 景观格局对生态系统服务的影响机制

景观由相互作用的生态系统镶嵌构成,景观格局可分为景观组成与景观构型,景观组成可直接对生态系统服务产生影响,而景观构型则通过改变生态过程影响生态系统服务(图1)。景观格局对生态系统服务影响研究主要从大尺度与小尺度两个角度开展。大尺度上主要研究区域景观格局的“动态”演变对区域生态系统服务的影响,如李屹峰等的研究表明,林地面积的增加以及草地、农田面积的减少导致1990—2009年密云水库流域的产水服务增加^[13]。小尺度上的研究主要反映“静态”的景观格局对生态系统服务的影响,侧重分析景观构型对生态系统服务的影响,例如咖啡种植园附近的森林斑块能增加传粉昆虫的数量,增强传粉服务,有

助于提高咖啡产量^[14-15]。

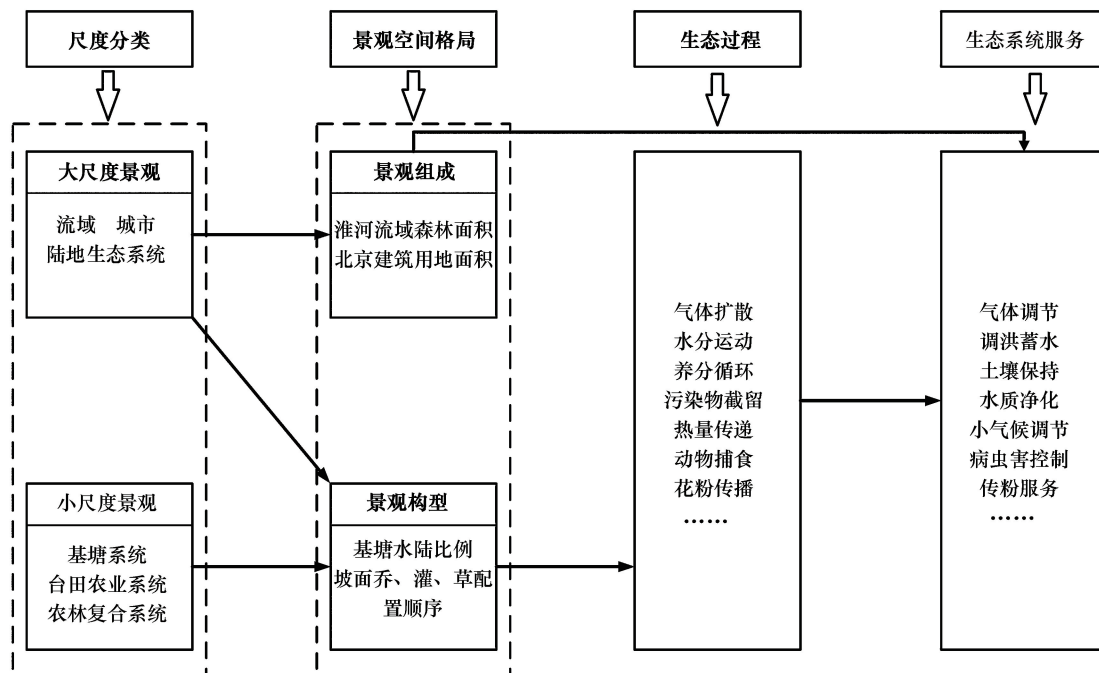


图1 景观格局对生态系统服务的影响机制

Fig.1 Impact mechanism of landscape pattern on ecosystem services

1.2 生态系统服务复合增益

按照系统科学理论,在系统结构合理的情况下,系统内各组分间的非线性相互作用,将使得系统的整体功能大于各组分功能之和^[16]。景观是一个有机整体,遵循系统的整体性原理,景观要素间相互关联、相互作用,因此在景观格局合理的情况下,景观整体的生态系统服务将大于各景观要素生态系统服务的线性叠加。众多农业文化遗产如湖州桑基鱼塘系统、青田稻鱼共生系统等属于小尺度农业景观,他们由多种景观要素(水域生态系统、桑园生态系统等)耦合形成,在人类长期实践下逐渐形成了较为合理的景观格局,这种格局改变了景观内部热量传递,水分输送等生态过程,最终导致景观整体的生态系统服务要大于各景观要素的生态系统服务之和。

综合上文关于系统科学和景观生态学的分析,本研究认为,多个相互作用的景观要素(生态系统/土地覆被)耦合形成了一个新的景观,由于新景观的景观格局对生态过程产生影响,使得新景观提供的生态系统服务要大于各景观要素提供的生态系统服务之和,新景观产生的生态系统服务增量称为“生态系统服务复合增益”(图2)。

根据生态系统结构-过程-服务联级模式,本研究认为生态过程的改变是导致复合增益产生的直接因素,生态系统服务复合增益的产生机制可分为以下两种。一是生态过程的新增,例如在浙江青田稻田养鱼景观中田鱼会捕食落入水中的稻飞虱,捕食过程的出现提高了该景观的病虫害防治服务^[17]。二是生态过程的增强/减弱,例如间套种植景观能增强农作物对光热资源、养分资源吸收过程,提高了景观的供给服务^[18];农田中的树篱构成了对地表水与地下水的屏障,增加了地表粗糙度,抑制地表径流,减弱土壤侵蚀过程,提高了景观的土壤保持服务^[19]。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

瑞安市位于长江三角洲和珠江三角洲的连接地带,东经 120°10′—121°15′,北纬 27°40′—28°(图3),年降

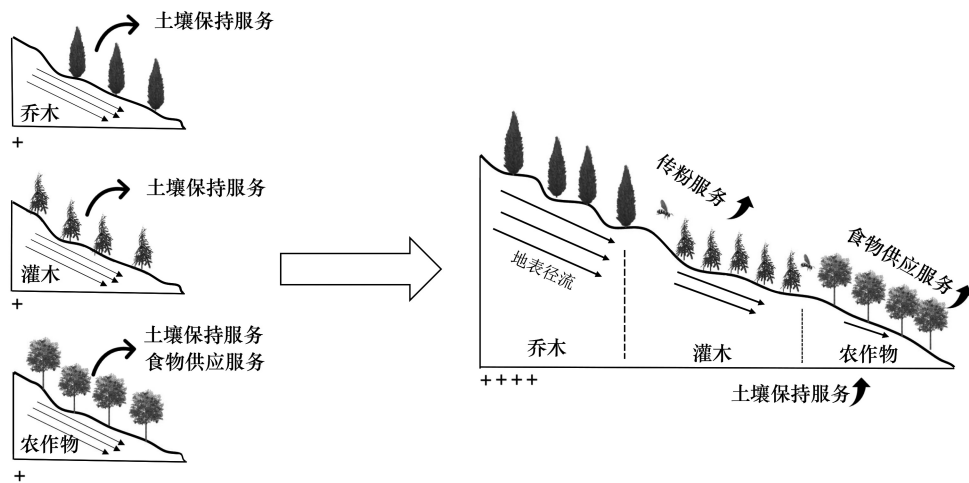


图2 生态系统服务复合增益

Fig.2 The Extra services

水量 1110—2200 mm, 年平均气温 14—16℃。浙江瑞安滨海塘河台田系统已有 500 余年的历史, 是一种典型的台田农业系统, 在温州人民千百年来的不断实践下, 促生了“人与环境协同发展”的生态文化, 浙江瑞安滨海塘河台田系统位于温州大罗山南面滨海平原, 总面积 49.5 km², 核心区面积 3.5 km²。

2.2 数据资料来源

2.2.1 经济生产数据

瑞安市政府提供的资料,《温州市统计年鉴 2020》,《2019 年瑞安市政府工作报告》,《瑞安市滨海都市田园综合体建设方案》,中国知网上已经公开发表的科技文献数据等。

2.2.2 土壤理化性质数据

瑞安市 5 个乡镇耕地土壤及台田农业系统土壤的有机质含量、全氮含量、速效钾含量、有效磷含量、和阳离子交换量(CEC)数据均由瑞安市政府提供。

2.3 生态系统服务价值评估方法

台田农业系统由农田生态系统和水域生态系统两部分组成, 本研究参考 MA 的分类体系^[4], 分别对农田生态系统、水域生态系统和台田农业系统的生态系统服务类型进行划分, 运用市场价值法、影子工程法和机会成本法等生态经济学方法对各项生态系统服务和生态系统服务复合增益进行价值评估, 具体评估指标包括食物供应、气候调节、盐碱地改良、水源涵养、休闲游憩等, 各项生态系统服务指标及评估方法如表 1。

2.3.1 农田生态系统

食物供应: 为与台田农业系统农作物产量形成对比, 农田生态系统农作物产量采用 2010—2019 年间瑞安市蔬菜平均产量代替, 食物供应价值采用市场价值法评价。

$$V_v = Q_v \times P_v \times A_f \quad (1)$$

式中, Q_v 为 2010—2019 年间瑞安市蔬菜平均产量(t/hm²); P_v 为蔬菜批发价格(元/t); A_f 为农田生态系统面积

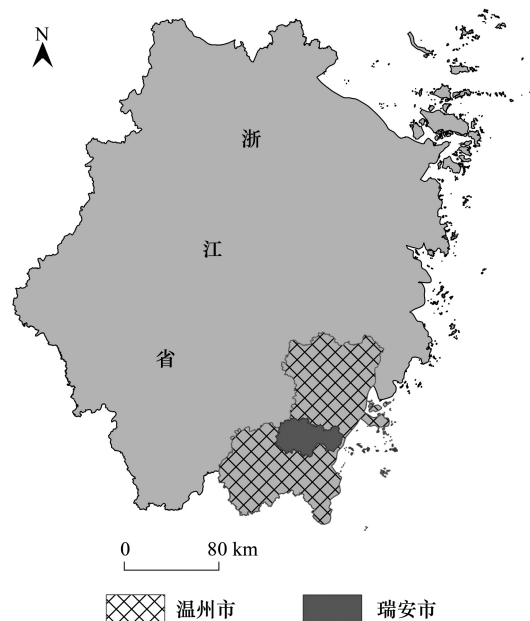


图3 瑞安市位置图

Fig.3 Location of Ruian city

(hm^2); V_p 为农田生态系统食物供应价值(元/a)。

表 1 浙江瑞安滨海塘河台田系统生态系统服务分类及其评估方法

Table 1 Classification and assessment methods of Costal Bench Terrace Ecosystem services

生态系统服务 Ecosystem services	生态系统服务类型 Type	水域生态系统 Aquatic ecosystem	农田生态系统 Farmland ecosystem	台田农业系统 Raised-field agricultural system	评价方法 Evaluation method
供给服务 Provisioning services	食物供应		√	√	市场价值法
调节服务 Regulating services	气体调节	√	√	√	影子价格法
	调洪蓄水			√	影子工程法
	水源涵养		√	√	影子工程法
	盐碱地改良			√	机会成本法
	气候调节	√		√	影子价格法
支持服务 Supporting services	土壤保持		√	√	机会成本法
	生物多样性保护	√		√	当量因子法
文化服务 Cultural services	休闲游憩			√	瑞安市 2019 年旅游收入

气体调节:农田生态系统主要依靠种植的农作物进行气体调节,根据光合作用公式,植物每生产 1 g 干物质可吸收 1.63 gCO_2 ,释放 1.2 gO_2 ,采用碳税法和工业制氧成本法计算该系统的气体调节价值。

$$V_g = Q_c \times C_c + Q_o \times C_o \quad (2)$$

式中, Q_c 为固定 CO_2 的量(t); Q_o 为释放 O_2 的量(t); C_o 为工业制氧成本(元/t); C_c 为 2019 年瑞典碳税价格(元/t); V_g 为气体调节价值(元/a)。

水源涵养:农田生态系统土壤涵养水量采用单位面积土壤截留持水量法计算。

$$Q_{w2} = (P \times K + C \times H) \times A_f \quad (3)$$

$$V_{w2} = Q_{w2} \times C_w \quad (4)$$

式中, P 为降水量(mm); K 为农作物截留率, C 为土壤非毛管孔隙度, H 为土层厚度(mm); Q_{w2} 为农田土壤涵养水源量(m^3/a); V_{w2} 为农田生态系统土壤涵养水源价值(元/a); C_w 为影子水库造价(元/ m^3)。

土壤保持:农田生态系统的土壤保持服务分为两类,一是减少土壤侵蚀,二是保持土壤肥力,2019 年减少土壤侵蚀总量按下式计算:

$$Q_{sr} = (q_{nr} - q_{fr}) \times A_f / \rho_b \quad (5)$$

式中, q_{nr} 为裸土土壤侵蚀模数($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); q_{fr} 为种植作物时土壤侵蚀模数($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); Q_{sr} 为农田生态系统每年减少土壤侵蚀总量(m^3/a); ρ_b 为土壤容重(t/m^3)。农田生态系统土壤保持价值包括减少土壤侵蚀价值和保持土壤肥力价值,均采用机会成本法计算,公式如下:

$$V_{sr} = Q_{sr} \times C_r \quad (6)$$

$$V_{dn} = Q_{sr} \times \rho_b \times (P_1 \times C_1 + P_2 \times C_2 + P_3 \times C_3 + P_4 \times C_4) \quad (7)$$

式中, V_{sr} 为农田生态系统减少土壤侵蚀的价值(元/a); C_r 为 2019 年挖去单位体积土方费用(元/ m^3); H 为土层厚度(m); ρ_b 为土壤容重(t/m^3); P_i 为土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量(kg/t); C_i 为单位质量有机质、全氮、有效磷和速效钾的价格(元/t); V_{dn} 为保持土壤肥力的价值(元/a)。

2.3.2 水域生态系统

调洪蓄水:水域生态系统具备调蓄洪水功能,采用影子工程法计算调洪蓄水价值。

$$Q_{w1} = h_w \times A_w \quad (8)$$

$$V_{w1} = Q_{w1} \times C_w \quad (9)$$

式中, Q_{w1} 为水域每年可调节洪水量(m^3/a); A_w 为水域面积(hm^2); h_w 为水域洪水时期平均淹没深度(m); V_{w1}

为水域调洪蓄水价值(元/a); C_w 为影子水库造价(元/m³)。

气候调节:水域生态系统的降温能力通过水面蒸发吸热量计算,公式如下:

$$Q_h = \lambda \times A_w \times EW \times \delta \quad (10)$$

$$V_h = p \times Q_h / 3 \times 2.778 \times 10^{-4} \quad (11)$$

式中, Q_h 为水面蒸发吸收的热量(kJ); λ 为湿地水面率; A_w 为湿地面积(hm²); EW 为水域生态系统夏季水面蒸发量(mm), δ 为水汽化热(kJ/kg); p 为电费单价(元 kW⁻¹ h⁻¹);3表示空调能效比;2.778×10⁻⁴为单位转换系数; V_h 为气候调节价值(元/a)。

生物多样性保护:谢高地等对我国200位生态学家进行问卷调查,确定了我国湿地生物多样性保护功能的价值当量因子为7.87^[20-21]。本研究参考谢高地的方法,将我国单位面积农田生态系统粮食生产的净利润 D 作为1个标准当量因子的生态系统服务价值量^[21],公式如下:

$$D = S_r \times F_r + S_w \times F_w + S_c \times F_c \quad (12)$$

式中, D 为1个标准当量因子的生态系统服务价值量(元/hm²); S_r 、 S_w 和 S_c 分别为2019年稻谷、小麦和玉米的播种面积占三种作物播种总面积的百分比; F_r 、 F_w 和 F_c 分别为2019年全国稻谷、小麦和玉米的单位面积平均净利润(元/hm²);采用当量因子法计算该系统的生物多样性保护价值,公式如下:

$$V_b = A_w \times 7.87 \times D \quad (13)$$

式中, V_b 为生物多样性保护价值(元/a)。

2.3.3 台田农业系统

食物供应:台田农业系统中最主要的农作物为花椰菜,其食物供应价值采用市场价值法评价。

$$V_{v2} = Q_{v2} \times P_{v2} \times A_t \quad (14)$$

式中, Q_{v2} 为台田农业系统花椰菜平均产量(t/hm²); P_{v2} 为蔬菜批发价格(元/t); A_t 为台田面积(hm²); V_{v2} 为台田农业系统食物供应价值(元/a)。

气体调节:台田农业系统农作物产量高于农田生态系统,因此其吸收CO₂与释放O₂的量不同。

$$V_{gr} = Q_{cr} \times C_c + Q_{or} \times C_o \quad (15)$$

式中, Q_{cr} 为其吸收CO₂的量(t); Q_{or} 为其释放O₂的量(t); V_{gr} 为台田农业系统气体调节价值(元/a)。

盐碱地改良:台田田面高于原地表,能有效减少通过毛管向土壤输送的盐分,因此其具有盐碱地改良功能,采用机会成本法计算该系统改良盐碱地的价值。

$$V_{sa} = C_{sa} \times A_t \quad (16)$$

式中, C_{sa} 为单位面积盐碱地的改良费用(元/hm²); V_{sa} 为盐碱地改良功能价值(元/a)。

休息游憩:浙江瑞安滨海塘河台田系统体现了千百年来温州人民与所处环境长期协同发展的独特文化,是瑞安人民适应大自然的智慧结晶,塘河水质清澈、风光旖旎,具有典型的江南水乡韵味。文化价值、历史价值与遗产价值是难以用市场价格衡量的非使用价值,这三类均体现在当地旅游业的发展上,因此本研究采用2019年瑞安市旅游总收入作为休闲游憩价值。

3 结果与分析

3.1 农田生态系统

食物供应:参考温州市统计年鉴,2010—2019年瑞安市蔬菜产量约为25.56 t/hm²,花椰菜批发价格约为2元/kg,农田生态系统面积为3333 hm²,依据公式(1),得到农田生态系统食物供应价值为1.7亿元。

气体调节:农田生态系统农作物产量约为8.5×10⁴ t,共吸收约13.9×10⁴ tCO₂,释放14.3×10⁴ tO₂,2019年瑞典碳税价格为894.74元/t,工业制氧成本为1000元/t,依据公式(2),得到其气体调节价值为2.26亿元。

水源涵养:2019年瑞安市年平均降水量为1684.9 mm,农作物截留率为5%,台田耕作层土壤非毛管空隙度为16.76%^[7],土层厚度为0.6 m^[7],根据公式(3)得到农田生态系统土壤涵养水源量为616.02×10⁴ m³,参考

六科水库造价,影子水库造价为 28.7 元/ m^3 ,根据公式(4),得到农田生态系统水源涵养价值为 1.77 亿元。

土壤保持:根据我国的土壤侵蚀研究,无林地中等侵蚀程度的土壤侵蚀模数为 150—350 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,取其中间值 200 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 为 q_{nr} , q_{fr} 取有林地土壤侵蚀模数 0.5 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,取瑞安市土壤容重为 1.59 g/cm^3 [22],依据公式(5),得到农田生态系统减少土壤侵蚀总量为 $45.55 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。参考人工成本信息,2016 年挖去单位体积土方价格为 20.8 元/ m^3 [7],根据 2019 年与 2016 年 GDP 比例,调整到 2019 年为 27.70 元/ m^3 ,依据公式(6),其减少土壤侵蚀的价值为 0.12 亿元。

台田农业系统土壤的有机质含量为 21.42 kg/t ;全氮含量为 1.37 kg/t ,速效磷含量为 0.02631 kg/t ,速效钾含量为 0.15761 kg/t 。有机肥的价格为 400 元/ t ;磷酸二铵的价格为 2750 元/ t ,全氮含量 212 kg/t ,速效磷含量 235 kg/t ;氯化钾的价格为 2200 元/ t ,速效钾含量 523.5 kg/t [7]。因此,1 kg 有机质价格为 0.4 元,1 kg 全氮价格为 11.32 元,1 kg 有效磷价格为 10.21 元,1 kg 速效钾价格为 4.20 元,依据公式(7),得到农田生态系统保持土壤肥力的价值为 0.18 亿元。综上,农田生态系统土壤保持价值为 0.3 亿元。

3.2 水域生态系统

调洪蓄水:水域生态系统面积为 2000 hm^2 ,洪水时期平均淹没深度约为 1 m [23],依据公式(8),得到 2019 年水域生态系统可调节洪水量为 $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。参考六科水库造价,影子水库造价为 28.7 元/ m^3 ,依据公式(9),得到水域生态系统调洪蓄水价值为 5.74 亿元。

气候调节:水域生态系统水面率为 0.112 [7],全年水面蒸发量约为 1000 mm [24],水气化热为 2260 kJ/kg ,依据公式(10),得到水域生态系统吸收的热量为 $5.06 \times 10^{12} \text{ kJ}$ 。2019 年瑞安市居民用电价格为 0.538 元 $\text{kW}^{-1} \text{h}^{-1}$,空调能效比为 3,依据公式(11),得到水域生态系统气候调节的价值为 2.52 亿元。

生物多样性保护:依据《中国统计年鉴 2020》和《全国农产平成本收益资料汇编 2020》,2019 年全国稻谷、小麦、玉米播种面积占三种作物播种总面积的百分比分别为 31.35%、25.06% 和 43.59%,2019 年全国稻谷、小麦和玉米的单位面积平均净利润分别为 306.6 元/ hm^2 、226.2 元/ hm^2 和 -1901.55 元/ hm^2 ,依据公式(12),得到 1 个标准当量因子的生态系统服务价值为 -676.1 元/ hm^2 ,依据公式(13),水域生态系统生物多样性保护价值为 -0.11 亿元。

3.3 台田农业系统

台田农业系统的水源涵养价值、土壤保持价值同农田生态系统,调洪蓄水价值、气候调节价值、生物多样性保护价值同水域生态系统,此处不做重复评估。由于台田农业系统中农田与水域相间分布的景观格局使得景观内众多生态过程发生变化,对其食物供应等生态系统服务产生影响,因此单独计算台田农业系统的食物供应价值、气体调节价值、盐碱地改良价值和休闲游憩价值。

食物供应:2019 年台田农业系统花椰菜产量约 25.25 t/hm^2 ,批发价格约 2 元/ kg ,依据公式(14),得到台田农业系统食物供应价值为 1.75 亿元。

气体调节:根据花椰菜产量,得到台田农业系统共吸收 $14.26 \times 10^4 \text{ tCO}_2$,释放 $10.5 \times 10^4 \text{ tO}_2$,依据公式(15),得到台田农业系统气体调节价值为 2.33 亿元。

盐碱地改良:参考浙江省相关信息,每公顷盐碱地平均改良费用为 3.04 万元 [25],依据公式(16),得到台田农业系统盐碱地改良的价值为 1.01 亿元。

休闲游憩:根据瑞安市政府提供的统计资料,2019 年瑞安市旅游总收入为 172.41 亿元,因此其休闲游憩价值为 172.41 亿元。

3.4 浙江瑞安滨海塘河台田系统生态系统服务计算结果

浙江瑞安滨海塘河台田系统 2019 年生态系统服务价值总量为 187.72 亿元,其中供给服务价值为 1.75 亿元,占比 0.9%;调节服务价值为 13.37 亿元,占比 7.1%;支持服务价值为 0.19 亿元,占比 0.1%;文化服务价值为 172.41 亿元,占比 91.8%,各项生态系统服务类型价值如表 2。

表 2 生态系统服务计算结果
Table 2 The results of ecosystem services value

生态系统服务 Ecosystem services	生态系统服务类型 Type	水域生态 系统服务价值 Ecosystem services value of aquatic ecosystem/($\times 10^8$ 元/a)	农田生态系统服务价值 Ecosystem services value of farmland ecosystem/($\times 10^8$ 元/a)	台田农业系统 生态系统服务价值 Ecosystem services value of raised-field agricultural system/($\times 10^8$ 元/a)
供给服务 Providing services	食物供应		1.7	1.75
调节服务 Regulating services	气体调节		2.26	2.33
	调洪蓄水	5.74		5.74
	水源涵养		1.77	1.77
	盐碱地改良			1.01
	气候调节	2.52		2.52
支持服务 Supporting services	土壤保持		0.3	0.3
	生物多样性保护	-0.11		-0.11
文化服务 Cultural services	休闲游憩			172.41

4 讨论

研究结果显示,农田生态系统服务价值为 6.03 亿元,占总体的 3.2%;水域生态系统服务价值为 8.15 亿元,占总体的 4.3%,农田和水域的生态系统服务价值之和小于台田农业系统的生态系统服务价值。本研究认为农田生态系统和水域生态系统的耦合致使浙江瑞安滨海塘河台田系统产生了生态系统服务复合增益,且生态系统服务复合增益价值为 173.54 亿元,占浙江瑞安滨海塘河台田系统生态系统服务总价值的 92.5% (图 4),生态系统服务复合增益的产生机制主要有三个方面(图 5)。

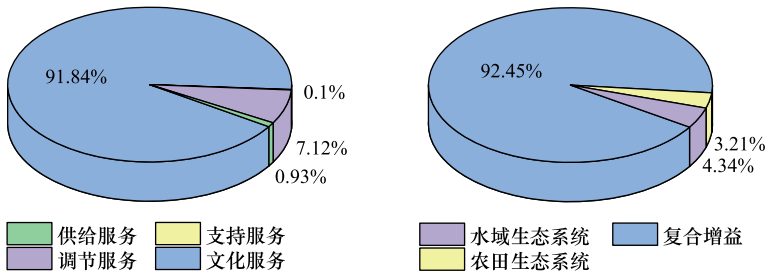


图 4 浙江瑞安滨海塘河台田系统不同生态系统服务价值所占比例
Fig.4 Ratio of various ecosystem services value of Costal Bench Terrace System

一是浙江瑞安滨海塘河台田系统中“农田-水道”相间分布的景观格局,改变了系统内部的热量传递与养分迁移等生态过程,提高了农作物产量。2019 年台田农业系统农作物产量为 37.5 t/hm^2 ,约为农田生态系统农作物产量的 1.5 倍。环绕台田的水道能改善台田周围的小气候,水体作为温度调节器可以在夜晚释放白天储存的热能,Renard 等的研究显示,夜间台田表面最低温度比同海拔地区最低温度高 $1\text{--}2^\circ\text{C}$,从而避免霜冻对台田作物的损害^[26],还有研究表明台田平均气温高于大田约 2°C ^[27],能给作物提供更好的热量条件,抑制花椰菜霜霉病的发生,进而提高花椰菜的产量与质量^[28–29]。台田大部分土壤长期位于水面以下,小部分土壤受降雨影响间歇性被水层覆盖(图 6),因此台田土壤属于淹水土壤,与大田土壤相比呈现出较为特殊的理化性质^[26]。台田土壤的速效钾含量和有效磷含量均高于瑞安市大田土壤(图 7),研究表明,淹水条件下磷的最大吸附量增大,土壤对磷的吸附能力大为提高^[26],且旱作会降低土壤水溶性钾含量,而长期灌水则会提高土壤水溶性钾含量^[30]。淹水土壤通常能提高磷的可用性,使其更易溶解与扩散^[31],同时,种植在淹水土壤中的

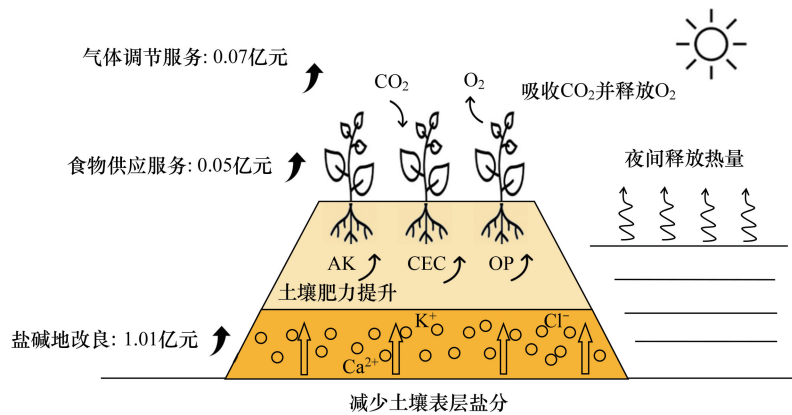


图5 台田农业系统生态系统服务复合增益产生机制

Fig.5 Potential mechanism of the Extra services

农作物能产生较大比例的细根,从而能更有效地吸收磷元素^[32],促进花椰菜的生长。台田土壤 CEC 高出大田土壤约 131.5%,表明其保肥能力远高于大田土壤,这同时也证明了台田土壤持留磷元素与钾元素的能力更为优越。值得注意的是,台田土壤有机质含量、全氮含量均低于大田土壤,这可能是由于台田土壤被水分反复冲刷,导致土壤有机质含量降低,而且在水淹与落干的交替过程中,连续的矿化作用与反硝化作用会导致土壤氮元素大量流失^[33]。

农作物产量的增加不仅提高了台田农业系统的供给服务,还提高了其气体调节服务,台田农业系统吸收 CO₂ 的量为 14.26×10^4 t,释放氧气的量为 10.5×10^4 t,两者均高于农田生态系统。

二是浙江瑞安滨海塘河台田系统的景观格局能有效改善水盐运移情况,降低土壤盐碱度。研究表明,台田农业系统能显著降低土壤总含盐量,有效解决土壤盐渍化问题^[34-35],研究区台田田面高于原地表,相对降低了地下水位,从而减少地下咸水中的盐分通过土壤毛管向地表输送,达到改良土壤盐碱程度的作用^[36]。

三是浙江瑞安滨海塘河台田系统作为一种农业文化遗产,蕴含深厚的历史、悠久的文化和迷人的美学景观,为人们提供了大量文化服务。虽然文化服务难以与某种特定的生态过程建立联系^[37],但浙江瑞安滨海塘河台田系统的历史文化价值和美学价值源于其自身景观格局,属于景观整体的价值,因此本研究将文化服务价值归为生态系统服务复合增益价值。

“面积-价值量”法通过各景观要素的单位面积生态系统服务价值来评估景观整体生态系统服务价值^[38-39]。该方法依据景观要素面积(土地利用面积)与生态系统服务价值为线性关系这一重要前提假设,然而,现实情况中两者并非单纯的线性关系,景观格局会对景观整体生态系统服务价值产生较大影响^[40],同时,部分关于农业文化遗产的研究也显示了景观要素面积与生态系统服务价值间的非线性关系,如湖州桑基鱼塘系统整体的生态系统服务价值为桑园和鱼塘生态系统服务价值之和的 11 倍^[41],因此“面积-价值量”法将各景观要素的生态系统服务价值简单加总作为景观整体的生态系统服务价值可能会使评估结果不够准确。

本研究构建生态系统服务复合增益理论框架,综合评估浙江瑞安滨海塘河台田系统的生态系统服务价值



图6 浙江瑞安滨海塘河台田系统

Fig.6 Coastal Bench Terrace System

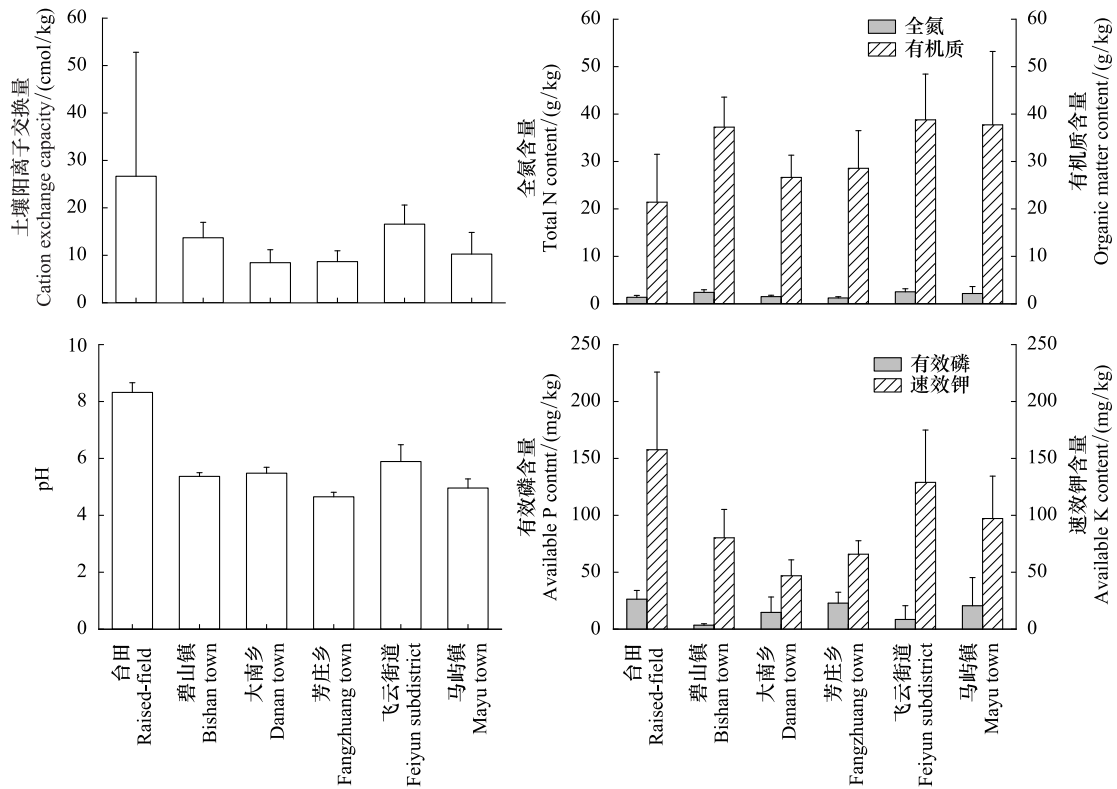


图7 瑞安市台田及部分乡镇耕地土壤理化性质

Fig.7 The physical and chemical properties of soil in raised-field and part of cultivated land in Ruian city

CEC: 土壤阳离子交换量 Cation exchange capacity

及其复合增益价值,实证分析了“农田-水道”相间分布的景观格局会对台田农业系统生态系统服务产生影响,但依然存在以下问题有待解决:(1)由于缺乏实测数据,未评估水质净化、空气净化等生态系统服务的价值,缺少关于生态系统服务复合增益形成机理的分析,景观格局对生态过程的影响机理以及生态过程对复合增益的影响机理尚需进一步研究。(2)本研究通过台田农业系统与农田生态系统的农作物价值之差代替在气候调节和土壤肥力保持上产生的复合增益价值。如需更加准确地评估该部分复合增益价值,需开展田间实验获取实测数据。(3)台田农业系统花椰菜产量受众多因素影响,其农作物产量高于农田生态系统的机理解释还需进一步研究。(4)浙江瑞安滨海塘河台田系统的景观格局对其生态系统服务供应产生了增益作用,然而,不合理的景观格局也可能对景观生态系统服务产生减损作用,如林下养殖会带来林地生物多样性降低^[42]、土壤侵蚀风险增大^[43]等负面作用,因此今后应当选取更多案例点开展实证研究,探讨不同类型的景观、不同尺度的景观是否具有生态系统服务复合增益。

5 结论

景观要素的合理配置能优化景观内的生态过程,提高景观的生态系统服务价值,研究结果表明:(1)浙江瑞安滨海塘河台田系统 2019 年生态系统服务总价值为 187.72 亿元,复合增益价值为 173.54 亿元,占生态系统服务总价值的 92.5%;(2)农田和水域生态系统服务价值之和小于台田农业系统,即两种景观要素的耦合产生了生态系统服务复合增益。本研究综合景观生态学原理和系统科学原理,从景观格局-生态过程-生态系统服务的角度构建了“生态系统服务复合增益”理论框架,综合评估了浙江瑞安滨海塘河台田系统的景观要素生态系统服务价值、景观整体生态系统服务价值和生态系统服务复合增益价值,并分析该农业景观生态系统服务复合增益的产生机制,以期为农业文化遗产生态系统服务评估研究提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] Bianchi F J J A, Booij C J H, Tschamtk T. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2006, 273(1595): 1715-1727.
- [2] 闵庆文, 孙业红. 农业文化遗产的概念、特点与保护要求. *资源科学*, 2009, 31(6): 914-918.
- [3] 闵庆文. 全球重要农业文化遗产——一种新的世界遗产类型. *资源科学*, 2006, 28(4): 206-208.
- [4] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-Being: Desertification Synthesis*. Washington, DC: Island press, 2005.
- [5] 刘某承, 张丹, 李文华. 稻田养鱼与常规稻田耕作模式的综合效益比较研究——以浙江省青田县为例. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 164-169.
- [6] Liu M C, Liu W W, Yang L, Jiao W J, He S Y, Min Q W. A dynamic eco-compensation standard for Hani Rice Terraces System in southwest China. *Ecosystem Services*, 2019, 36: 100897.
- [7] 李禾尧, 何思源, 闵庆文, 朱会林, 吴连勇. 重要农业文化遗产价值体系构建及评估(II): 江苏兴化垛田传统农业系统价值评估. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(9): 1370-1381.
- [8] Liu D, Tang R C, Xie J, Tian J J, Shi R, Zhang K. Valuation of ecosystem services of rice-fish coculture systems in Ruyuan County, China. *Ecosystem Services*, 2020, 41: 101054.
- [9] 骆世明. 传统农业精华与现代生态农业. *地理研究*, 2007, 26(3): 609-615.
- [10] Boscolo D, Tokumoto P M, Ferreira P A, Ribeiro J W, dos Santos J S. Positive responses of flower visiting bees to landscape heterogeneity depend on functional connectivity levels. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2017, 15(1): 18-24.
- [11] Wu J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19(2): 125-138.
- [12] Yin C Q, Zhao M, Jin W G, Lan Z W. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China. *Hydrobiologia*, 1993, 251(1): 321-329.
- [13] 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.
- [14] Olschewski R, Tschamtk T, Benítez P C, Schwarze S, Klein A M. Economic evaluation of pollination services comparing coffee landscapes in Ecuador and Indonesia. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 709-723.
- [15] Priess J A, Mimler M, Klein A M, Schwarze S, Tschamtk T, Steffan-Dewenter I. Linking deforestation scenarios to pollination services and economic returns in coffee agroforestry systems. *Ecological Applications*, 2007, 17(2): 407-417.
- [16] Bertalanffy L V. *General system theory: foundations, development, application*. New York: George Braziller, 1969.
- [17] Xie J, Hu L L, Tang J J, Wu X, Li N N, Yuan Y G, Yang H S, Zhang J E, Luo S M, Chen X. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): E1381-E1387.
- [18] 李小飞, 韩迎春, 王国平, 王占彪, 冯璐, 杨北方, 范正义, 雷亚平, 熊世武, 邢芳芳, 李亚兵. 棉田间套复合体系提升生态系统服务功能研究进展. *棉花学报*, 2020, 32(5): 472-482.
- [19] Bunce H R G, Ryszkowski L, Paoletti M G. *Landscape Ecology and Agroecosystem*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.
- [20] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [21] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [22] 余太平, 何延召, 蔡洪, 李孟. 海绵植物对提高温州高铁新城土壤渗透性的影响. *建材与装饰*, 2018(42): 65-66.
- [23] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 魏彦昌. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 443-452.
- [24] 王云辉, 曾国熙, 张正康. 浙江省水文特性分析. *水文*, 2009, 29(4): 79-82.
- [25] 黄伟, 毛小报, 陈灵敏, 袁国文, 徐红玳. 浙江省盐碱地开发利用概况及政策建议. *浙江农业科学*, 2012, (1): 1-3.
- [26] Renard D, Iriarte J, Birk J J, Rostain S, Glaser B, McKey D. Ecological engineers ahead of their time: the functioning of pre-Columbian raised-field agriculture and its potential contributions to sustainability today. *Ecological Engineering*, 2012, 45: 30-44.
- [27] 李颖, 顾卫, 钞锦龙, 李澜涛. “台田-浅池系统”小气候的温度特征. *气象与环境科学*, 2020, 43(3): 9-17.
- [28] 黄雷, 李光庆, 姚雪琴, 刘春晴, 谢祝捷, 耿春女. 基因型和环境对不同生育期花椰菜霜霉病的影响. *浙江农业学报*, 2020, 32(8): 1420-1426.
- [29] 牛国保, 姚星伟, 单晓政, 文正华, 刘莉莉, 江汉民, 张小丽, 马云生, 孙德岭. 环境对花椰菜保护地制种产量的影响. *中国瓜菜*, 2019,

- 32(1): 28-30.
- [30] 李秀芝, 胡聪月, 杨帆, 韩光中. 土地利用方式改变对紫色水稻土不同形态钾演变特征的影响. 土壤学报, 2021: 1-10. (2021-12-29). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20211228.1428.002.html>.
- [31] 苏玲, 林咸永, 章永松, 杨玉爱. 水稻土淹水过程中不同土层铁形态的变化及对磷吸附解吸特性的影响. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001, 27(2): 124-128.
- [32] Rubio G, Oosterheld M, Alvarez C R, Lavado R S. Mechanisms for the increase in phosphorus uptake of waterlogged plants: soil phosphorus availability, root morphology and uptake kinetics. *Oecologia*, 1997, 112(2): 150-155.
- [33] 常超, 谢宗强, 熊高明, 储立民. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1236-1244.
- [34] 谷孝鸿, 胡文英, 李宽意. 基塘系统改良低洼盐碱地环境效应研究. 环境科学学报, 2000, 20(5): 569-573.
- [35] 刘树堂, 秦韧, 王学锋, 王万志, 杨团结. 滨海盐碱地“上农下渔”改良模式对土壤肥力的影响. 山东农业科学, 2005, (2): 50-51.
- [36] 李颖, 陶军, 钞锦龙, 张化, 顾卫. 滨海盐碱地“台田-浅池”改良措施的研究进展. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 154-160, 167.
- [37] Gould R K, Morse J W, Adams A B. Cultural ecosystem services and decision-making: how researchers describe the applications of their work. *People and Nature*, 2019, 1(4): 457-475.
- [38] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [39] Xie G D, Zhang C X, Zhen L, Zhang L M. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services-ScienceDirect. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 146-154.
- [40] 苏常红, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的关系及其对生态系统服务的影响. 自然杂志, 2012, 34(5): 277-283.
- [41] 王静禹, 周逸斌, 孟留伟, 杨良, 何贇涛, 黄凌霞. 湖州桑基鱼塘生态系统的服务价值评估. 蚕业科学, 2018, 44(4): 615-623.
- [42] 邬泉楠, 缪金莉, 郑颖, 潘飞翔, 刘婷霞, 伊力塔, 夏国华, 温国胜. 林下养鸡对生物多样性的影响. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 689-697.
- [43] 张海明, 乔富强, 张鸿雁, 王辉, 王蒸, 汪丽, 樊林栋. 不同养殖密度的林下养鸡对林地植被及环境质量影响. 北京农学院学报, 2016, 31(4): 98-102.