

基于多要素耦合的舟山农业空间低碳评估与规划

王信¹, 于涵¹, 施雨^{1,2}, 张沂颀³

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 同济城市规划设计研究院有限公司, 上海 200092;

3. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 将食物生产与碳排放分别作为期望与非期望产出, 构建“水—能源—食物—土地—碳排放”耦合(“water-energy-food-land-carbon” nexus, WEFLC)分析框架, 选择舟山海岛的果蔬种植、畜牧养殖以及水产养殖典型农业生产案例, 进行农业空间评估与低碳规划研究。结果表明, 单位产值和单位面积碳排放强度顺序依次为畜牧养殖、水产养殖、果蔬种植, 且畜牧养殖的总产值在碳市场中受到影响较大。在维持食物产出不变的情况下, 畜牧养殖、水产养殖、果蔬种植可分别通过应用光伏、提升用水效率、引入有机废弃物处理技术等措施, 降低水资源、能源、土地资源消耗, 实现农业生产的低碳发展。

关键词: “水—能—食—地—碳”耦合; 低碳农业空间规划; 碳排放; 海岛农业; 长江流域

中图分类号: TU981

文献标志码: A

emissions per unit area is livestock breeding, aquaculture, and farming. The total output value of livestock breeding is greatly affected by the trend of carbon trading. While maintaining the same food output, livestock breeding, aquaculture, and farming section can reduce energy, water, and land resource consumption, and therefore, low carbon emissions are realized for agricultural production by employing photovoltaics and improving the efficiency of water use as well as introducing organic waste-disposal technologies.

Key words: “water-energy-food-land-carbon” nexus; low-carbon agriculture planning; carbon emissions; island agriculture; Yangtze River watershed

Low Carbon Assessment and Planning of Agricultural Space in Zhoushan Based on Multi-element Nexus

WANG Xin¹, YU Han¹, SHI Yu^{1,2}, ZHANG Yidi³

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Urban Planning & Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A “water-energy-food-land-carbon” Nexus (WEFLC) analysis framework was established with food production and carbon emissions as expected and undesired outputs, respectively. Typical agricultural production cases of farming, livestock breeding, and aquaculture in Zhoushan islands were selected to conduct the agricultural space assessment and low carbon planning. The order of unit output value and carbon

农业是全球温室气体的重要来源, 占全球人为源温室气体排放的 17%~32%, 其中占非二氧化碳温室气体排放的 56%^[1]。农业也是中国乡村主要产业之一, 随着技术进步, 我国农业生产规模和产量迅速提升, 但也伴随着土地、水资源、电力、化石能源、化肥和农药等大量消耗, 碳排放量巨大。在我国“2030 碳达峰、2060 碳中和”的战略目标下, 研究农业空间碳排放特征和低碳规划具有重要意义。

农业空间中“水—能源—食物”等物质流之间的相互作用是其核心特征之一。联合国人居署于 2019 年发布了《中国长江三角洲地区净零碳乡村规划指南》^[2], 其中第 8 条原则强调, 净零碳乡村需要在农业生产中建立水—能源—食物和废物的循环。目前国家层面的碳排放研究理论与方法已经相对比较成熟, 但是基于物质流的农业空间碳排放研究尚不完善^[3-4]。当前的农业生产研究多聚焦于“水—能源—食物”关联, 缺乏对生态系统的支持与反馈、土地占

收稿日期: 2021-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFD1100405); 上海市科技创新研发计划(17DZ1202100)

第一作者: 王信(1976—), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为低碳生态城市设计方法与评价体系。E-mail: xin_wang@tongji.edu.cn

通信作者: 施雨(1993—), 女, 工学硕士, 主要研究方向为低碳规划、环境管理与可持续发展。

E-mail: shiyu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

用、温室气体排放等因素的考虑。农业生产若要通过能源清洁化、供水低碳化,以及废弃物处理生态化实现低碳发展,需要进一步扩充关联研究的体系,建立“WEFLC”的分析框架,进而提出农业空间低碳规划^[5]。

海岛地区更易受到气候变化影响,处于应对气候变化的前沿,有必要探索低碳发展和气候变化适应路径^[6]。农业空间可分为农村生活、农业生产及乡村生态空间^[7]。针对海岛地区,已有较多对生活空间低碳化的研究^[8-9],但与农业空间低碳相关的研究较少。海岛乡村的农业生产空间特征与大陆地区有明显差异,平坦的土地资源较少,难以实现规模化种植,主要走小规模、精品化路线,生产成本低,同时农业生产中渔业(捕捞、水产养殖、水产加工)占比相对较高^[10]。海岛乡村碳排放也具有显著特征^[11],其低碳规划要素也与大陆地区存在较大差别^[9]。

舟山是长江流域最大的群岛和港口,农业也是舟山乡村的重要产业之一。本文以舟山市为例,对

该地区果蔬种植、畜牧养殖、水产品养殖等典型农业生产案例进行调研,基于“WEFLC”耦合关系对各类农业空间进行低碳评估和规划。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

选择舟山市定海区乡村为研究对象(图1)。舟山市处于长三角核心区范围内,南北分别与宁波和上海相邻。定海区总面积1 444 km²,大部分陆地区域位于舟山本岛,陆地面积568.8 km²,拥有大小岛屿共128个,海域875.2 km²。全区下辖3个镇、10个街道,共有行政村79个,其中75个为农村社区,4个为城乡结合部。根据2020年人口普查,全区常住人口50.21万人,其中农村常住人口占比为24.09%,乡村居民主要从事农业、渔业、旅游业、建筑业、制造业,以及外出打工^[12]。

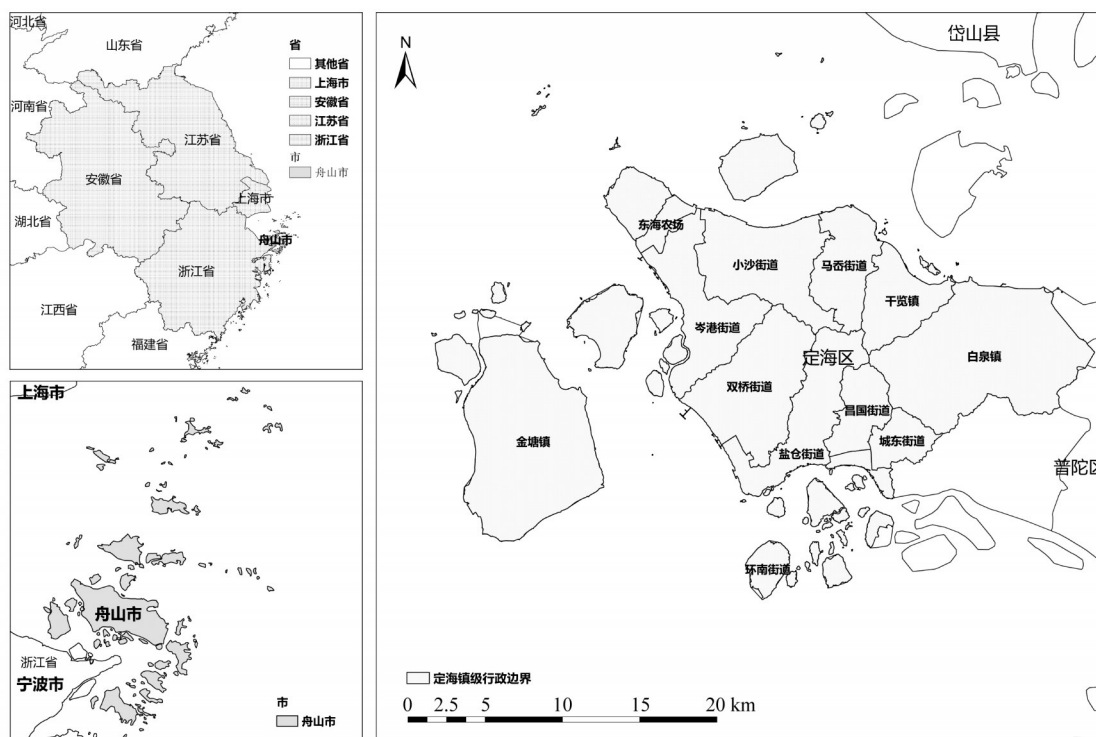


图1 定海区区域位置

Fig.1 Location of Dinghai District

定海区拥有海岸线400多公里,农田共77.09 km²,山林共220.83 km²,乡村兼具从事各类农业生产活动的条件。定海区主要农业产业有渔业养殖和捕捞、农业种植、畜牧业以及林业。其中渔业产值贡献比例最高并不断增长,2008—2019年从40%增加

到60%左右,种植业占比稳定在30%左右,畜牧业产值2008到2019年从20%下降到8%左右,林业产值占比整体相对较低^[12],小于1%。因此分别选取Y生态家庭农场(图2a)、X养殖场(图2b)、S蔬菜专业合作社(图2d)、H牧场(图2c)作为典型案例进行

研究。

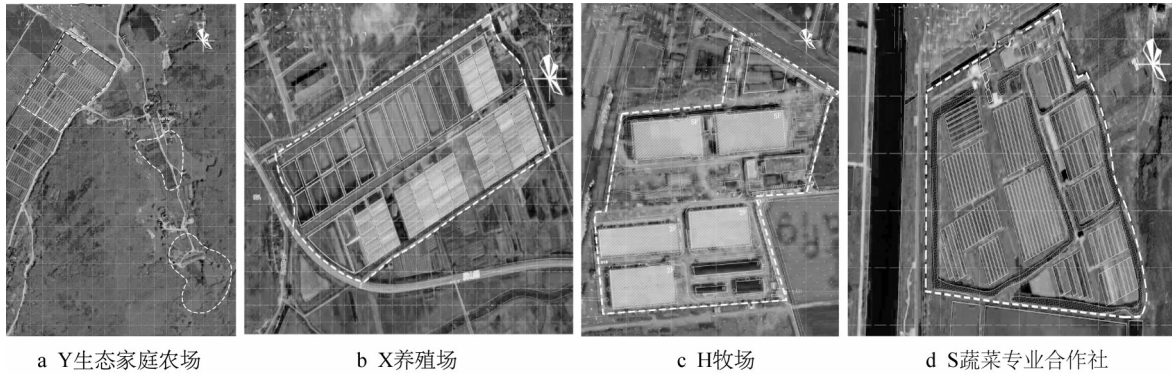


图2 农场平面图(网格:50×50m)

Fig.2 The floor plan of the farm (the grid is 50 × 50m)

1.2 研究方法

(1)分析框架构建

将土地要素、碳排放纳入“水—能源—食物”耦合关系(WEF)中。同时,将碳排放与食物生产作分别作为期望产出与非期望产出,建立了WEFLC耦合分析框架(图3)。

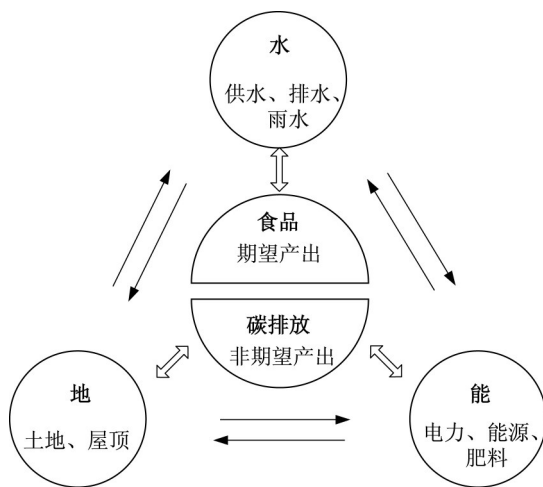


图3 农业生产空间中“WEFLC”关联示意图

Fig.3 A diagram of the WEFLC nexus in agricultural production space

(2)农场投入产出计算

投入包含农场用水、用能以及用地情况,数据由研究者通过实地调研、访谈农场管理者获得。产出分为期望产出、非期望产出以及综合产出,其中期望产出为由研究者通过调研获得农场年产值情况,非期望产出为农场产生碳排放情况。考虑到未来中国以及全球碳市场的建立,将期望产出减去非期望产出结合获得综合产出:

综合产出=期望产出—碳交易价格×碳排放总量 (1)

式(1)中,分别使用中国碳市场和全球碳市场价格进行计算。其中,中国碳市场价格选择上海碳交易市场42 CNY·(t CO₂e)⁻¹,全球碳市场交易价格选取欧盟碳交易市场56 EUR·(t CO₂e)⁻¹(折合人民币400 CNY·(t CO₂e)⁻¹)计算综合产出。

(3)碳排放计算方法

根据IPCC温室气体清单导则推荐方法,对碳排放量进行计算如下:

$$C_{\text{emission}} = \sum_i (E_{F_i} \times A_{\text{activity}_i}) \quad (2)$$

式(2)中, C_{emission} 是农业生产中各类别活动的碳排放量, E_{F_i} 表示第*i*种过程的排放因子, A_{activity_i} 表示第*i*种过程的活动水平。温室气体CO₂、CH₄、N₂O产生的总碳排放量折算成二氧化碳当量,即CO₂e来表示。

农村生产活动进行的碳排放核算包含直接和间接排放(隐含在农业投入品中)两个方面。对于农耕种植活动来说,直接碳排放包括稻田CH₄、肥料施用的N₂O、能源使用的CO₂;间接排放包括肥料、材料和耕作机械等主要投入品在生产过程中由能源消耗引起的CO₂。对于畜牧和渔业养殖活动来说,直接碳排放包括动物肠道发酵产生的CH₄、粪便管理产生的CH₄和N₂O、能源使用的CO₂;间接碳排放包括饲料、医药和养殖设施等主要投入品在生产过程中因能源消耗而产生的CO₂^[13]。

Y生态家庭农场以及S蔬菜合作社均从事蔬菜、水果种植,不存在稻田CH₄排放。H牧场采用堆肥发酵进行动物粪便管理。因此,考虑数据精度以及农场对低碳生产可控性,在计算碳排放包含农业生产中的直接排放,即农场运营中的用电、燃料、用水以及动植物本身产生的碳排放,以及部分间接排放,即化肥生产和使用、农场承担的运输排放,不包

括外购饲料生产过程中的间接排放。计算使用的排放因子如表1所示。

表1 碳排放因子取值

Tab.1 The value of carbon emission factor

类型	碳排放因子	参数来源
电力	5.246 kg CO ₂ e·(kW·h) ⁻¹	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)
柴油	2.73 kg CO ₂ e·L ⁻¹	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)
汽油	2.26 kg CO ₂ e·L ⁻¹	IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)
化肥	3.284 kg CO ₂ e·kg ⁻¹	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
有机肥	0.105 kg CO ₂ e·kg ⁻¹	作者根据本地调研计算
猪的胃肠道发酵	1 kg CH ₄ ·(头·年) ⁻¹	邱子健等 ^[14]
养殖水用水	0.36 kg CO ₂ e·m ⁻³	LIN & KANG. 2019 ^[15]
养殖水处理	0.708 kg CO ₂ e·m ⁻³	GU等. 2019 ^[16]

(4)农业生产空间效率分析

对农业生产空间效率评价分为3个方面,一是碳排放强度,用单位产值碳排放来表示,即每一单位的期望产出伴随出现的非期望产出的量,从效率提升的角度来说,碳排放强度越低,表明农业生产过程中产生的负外部性越小。二是空间的产出效率,即单位用地上期望产出和非期望产出,用单位面积产值和单位面积碳排放来表示。三是综合空间效率,即单位用地上结合了期望产出和非期望产出的综合产出。计算方法如下:

$$\text{碳排放强度}=\text{碳排放总量}/\text{总产值} \quad (3)$$

$$\text{空间产出效率}=\frac{\text{期望产出(或非期望产出)}}{\text{农场占地面积}} \quad (4)$$

$$\text{综合空间产出效率}=\frac{\text{综合产出}}{\text{农场占地面积}} \quad (5)$$

(5)基于WEFLC框架的农业空间低碳规划探讨

结合各类案例的分析结果,平衡期望产出和非期望产出对各类农业生产提出低碳规划建议。基于WELFC耦合分析框架,设定保持食物产量(F)相对稳定的情况,提出为降低农业碳排放(C),实现农业空间低碳优化利用的方法^[17],进一步对框架中用水(W)、用能(E)以及用地(L)之间的耦合关系进行分析。在各个案例中分析其中一个变量的优化提升,对其他变量的影响,从而获得各类农业生产中最优的低碳规划建议。

2 结果与讨论

2.1 典型农业生产空间现状碳排放测算

(1)农耕种植:Y生态家庭农场

Y生态家庭农场占地面积约13.3万m²,如表2所示,其中大棚占2.70万m²,设备管理用房占0.06万m²,其余为露天农田。蔬菜产量约为70t·年⁻¹,水果产量约为30t·年⁻¹,每年产生碳排放量为36.99 tCO₂e。农场使用“网上销售+本地配送”模式,设有储藏冷库,过剩

产品用于小规模畜牧养殖。每年共需消耗电力30000 kW·h,用于灌溉、冷藏储存以及小部分生活用能,其中储藏冷库用电占比最大。灌溉用水从附近河道抽水,约为25880 m³·年⁻¹。农场使用全有机肥种植,施肥量约为70~90t·年⁻¹,其中使用玉米秸秆自行堆肥生产有机肥10~20 t。

(2)农耕种植:S蔬菜专业合作社

S蔬菜专业合作社总占地面积约6万m²,如表3所示,实际种植面积4万m²,蔬菜产品以番茄、四季豆、土豆和黄瓜等蔬菜为主,一年两季,每年产生碳排放量34.35 tCO₂e。灌溉用水来自围绕农场的人工开凿雨水沟,宽5~6m,深1.5m,同时起到防内涝的作用。主要耗电单元灌溉抽水和生活用电,生活用电占比40%。由于与菜贩通过长期预售合同合作,储存需求极小。小型机械农耕作业使用柴油和汽油,产品外运由菜贩承担。生产用肥包含化肥和有机肥,其中有机肥使用量为60 t·年⁻¹,化肥使用量约为6t·年⁻¹,暂未开展本地堆肥。

(3)畜牧养殖:H牧场

H牧场占地面积为20万m²,如表4所示,其中建筑面积5.6万m²,配套种植面积约10.4万m²。H牧场主要产品为生猪,产品由销售商自行拉运,同时生产种植作物,主要由牧场内员工食堂自行消纳。H牧场每年产生碳排放量为7033.70 tCO₂e。在能源消耗方面,H牧场每年共需消耗电力662万kW·h,主要来自国家电网以及自身沼气发电,其中沼气发电的产电量约为103.68万(kW·h)·年⁻¹。耗电单元为猪舍保温、照明以及环保控制设施(臭气处理)。除此之外,牧场在饲料运输和猪舍保温环节都分别消耗柴油28.8万L和14.29万L。在水资源消耗方面,养殖环节使用自来水供牲畜饮用。除此之外,厂区内建有一座设计规模400m³·d⁻¹的污水预处理设施,污水经厌氧和生化处理后2/3纳管进入污水厂,1/3用于厂区内农作物的灌溉。

表2 Y生态家庭农场水、能、食、地以及碳排放信息表

Tab.2 Information on water, energy, products, land use and carbon emission of the Y Eco-family Farm

类型	项目	数量	补充说明
投入	水	灌溉用水	25 880 m ³ ·年 ⁻¹ 采用《舟山市水资源公报2019》中“舟山农田灌溉亩均用水量”估算
		电网电力	30 000 kW·h·年 ⁻¹ 来自国家电网
投入	能源	柴油(农耕作业)	150 L·年 ⁻¹
		汽油(农耕作业)	50 L·年 ⁻¹
		汽油(交通运输)	5 475 L·年 ⁻¹
		有机肥	70~90 t
投入	土地	大棚占地	2.70 万m ² 果蔬大棚
		设施用房占地	0.06 万m ² 农业设施用房,放置农业生产设备
		其他(道路、露天田等)	10.54 万m ² 道路以及露天田
投入	食物 (期望产出)	蔬菜水果	100 t·年 ⁻¹ 蔬菜(叶菜类)70 t·年 ⁻¹ ,水果30 t·年 ⁻¹ (火龙果、蓝莓、桃子)
		产值	200 万元 农场管理人提供
产出	碳排放 (非期望产出)	用电排放	15.74 tCO ₂ e /
		燃料排放	12.90 tCO ₂ e /
		肥料排放	8.36 tCO ₂ e 使用本地有机肥碳排放因子计算
		总碳排放	36.99 tCO ₂ e /
综合产出		综合产值1	199.84 万CNY 按上海碳交易市场:42 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹
		综合产值2	198.52 万CNY 按欧盟碳交易市场:400 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹

表3 S蔬菜专业合作社水、能、食、地以及碳排放信息表

Tab.3 Information on water, energy, products, land use and carbon emission of the S Vegetable Co-operation

类型	项目	数量	补充说明
投入	水	灌溉用水	7 764 m ³ ·年 ⁻¹ 从周边人工开凿的雨水沟进行取水
		电网电力	14 286 (kW·h)·年 ⁻¹ 来自国家电网
投入	能源	柴油(农耕作业)	233 L·年 ⁻¹
		汽油(农耕作业)	57 L·年 ⁻¹
		有机肥	60 t·年 ⁻¹
		化肥	6 t·年 ⁻¹
投入	用地	建筑(大棚)用地	4 万m ² 蔬菜大棚占地
		雨水沟	0.45 万m ² 宽5~6 m,深1.5 m
		道路及其它场地	1.55 万m ² 农场道路;
投入	食物 (期望产出)	蔬菜	27 t·年 ⁻¹ 番茄10 t·年 ⁻¹ ,四季豆3 t·年 ⁻¹ ,土豆1.5 t·年 ⁻¹ ,黄瓜7 t·年 ⁻¹ ,樱桃番茄5 t·年 ⁻¹
		产值	100 万CNY 农场管理人提供
产出	碳排放 (非期望产出)	用电排放	7.49 tCO ₂ e /
		燃料排放	0.77 tCO ₂ e /
		肥料排放	26.09 tCO ₂ e 包含化肥和有机肥排放总量
		总碳排放	34.35 tCO ₂ e /
综合产出		综合产值1	99.85 万CNY 按上海碳交易市场:42 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹
		综合产值2	98.63 万CNY 按欧盟碳交易市场:400 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹

在污废回收利用方面,牧场自设5个容积为120m³的智能高温畜禽粪便发酵罐,产生的有机肥部分用于厂区种植,其余约为3 000t·年⁻¹销售给当地种植户。同时,牧场配有1台180kW的沼气发电机,回收利用污水处理阶段产生的沼气,污泥用作有机肥原料。

(4)水产养殖:X养殖场

X养殖场占地总面积40万m²,如表5所示,大棚占地面积8.7万m²,配套设施面积约8万m²,其余23.3万m²为露天混养池。养殖场总产量约为100万kg·年⁻¹,每年产生碳排放量为1 844.51 tCO₂e。养殖场用水量约为104万m³·年⁻¹,抽取临近海水处理

达到养殖标准后引入池塘,换水频率为3 d·次⁻¹。由于养殖行业对于病害防控的高要求,养殖废水处理后排,不进行回用。X养殖场的能源主要为电力消耗,用于池塘的曝气增氧。柴油发电机仅用于停电时应急,平均每年运转1~2次,发电量极小。养殖饲料和产品运输均由供应商或销售商负责。

2.2 典型农业生产空间低碳规划要素分析

(1)碳排放占比及强度分析

从碳排放强度(表6)来看,H牧场的单位产值碳排放最高,其次为X养殖场、S蔬菜专业合作社,碳排放强度最低为Y生态家庭农场。从碳排放总量及占比来看(图4),H牧场碳排总量最高,其次为X养殖

表4 H牧场有限公司水、能、食、地以及碳排放信息表

Tab.4 Information on water, energy, products, land use and carbon emission of the H Ranch Ltd.

类型	项目	数量	补充说明
水	养殖用水	146 900 m ³ ·年 ⁻¹	来自自来水管网,主要用于畜禽饮用
	灌溉用水	20 186 m ³ ·年 ⁻¹	从临近河道抽水灌溉,取水量随种植需求变化
	处理污水	109 500 m ³ ·年 ⁻¹	实际处理量为300m ³ ·d ⁻¹ ,耗电量65.7万(kW·h)·年 ⁻¹
投入 能源	电网电力	6 620 000 kW·h·年 ⁻¹	来自国家电网
	沼气发电	1 036 800 kW·h·年 ⁻¹	1台180kw的沼气发电机,平均发电240 d·年 ⁻¹
	柴油(交通运输)	288 000 L·年 ⁻¹	4辆饲料运输车,油耗0.8L·(km·辆) ⁻¹
	柴油(生产过程)	142 857 L·年 ⁻¹	主要用于猪舍保温
投入 用地	建筑占地	5.6万m ²	其中猪舍占地面积为5万m ²
	种植用地面积	10.4万m ²	种植粮食、蔬菜,主要供应农场自用
	其他	4万m ²	道路、绿化等
投入 食物 (期望产出)	猪及少量作物	11 400 t·年 ⁻¹	出栏60 000头、存栏超过35 000头、种猪3 000头;大麦、小麦、玉米、水稻、少量蔬菜
	产值	9 600万CNY	农场管理人提供
产出 (非预期产出)	用电排放	3 732.05 tCO ₂ e	/
	燃料排放	1 176.24 tCO ₂ e	/
	用水排放	130.41 tCO ₂ e	/
	动物肠道排放	1 995.00 tCO ₂ e	农场动物肠道产生的甲烷气体折算为二氧化碳当量
	总碳排放	7 033.70 tCO ₂ e	/
综合产出	综合产值1	9 570.28万CNY	按上海碳交易市场:42 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹
	综合产值2	9 318.65万CNY	按欧盟碳交易市场:400 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹

表5 X养殖场水、能、食、地以及碳排放信息表

Tab.5 Information on water, energy, products, land use and carbon emission of the X Shrimp Farm

类型	项目	数量	补充说明
水	养殖用水	1 044 000 m ³ ·年 ⁻¹	抽取临近海水(距离400m)进行处理后引入养殖塘
	处理污水	1 000 000 m ³ ·年 ⁻¹	经过沉淀池、曝气池和消毒池处理后排放
投入 用能	电网电力	1 450 000 (kW·h)·年 ⁻¹	来自国家电网
	柴油(生产过程)	极少	备用柴油发电机,平均运转1~2次·年 ⁻¹
投入 用地	建筑(大棚)用地	8.7万m ²	64个大棚,用于室内养殖
	配套设施等	8万m ²	海水、污水处理设施等
	露天混养池	23.3万m ²	用于室外养殖
投入 食物 (期望产出)	水产品	1 000 t·年 ⁻¹	大棚南美白对虾750 t·年 ⁻¹ ,混养池文蛤一梭子蟹一水白虾250 t·年 ⁻¹
	产值	4 950万元	农场管理人提供
产出 (非预期产出)	用电排放	760.67 tCO ₂ e	/
	用水排放	1 083.84 tCO ₂ e	/
	总碳排放	1 844.51 tCO ₂ e	/
综合产出	综合产值1	4 942.21万CNY	按上海碳交易市场:42 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹
	综合产值2	4 876.22万CNY	按欧盟碳交易市场:400 CNY·(t CO ₂ e) ⁻¹

场,蔬菜、水果种植产业的碳排放总量较低。

Y生态家庭农场主要碳排放来源于用电(42.54%)、燃料燃烧(34.86%),S蔬菜合作社碳排放主要来源于肥料施用(75.95%)以及用电(21.80)。同样是从从事果蔬种植的农场,种植、运营模式会导致用水、用能、用地以及碳排放的差异。在肥料使用方面,Y家庭农场全部使用有机肥,S农场使用化肥和有机肥相结合的施肥方法,导致肥料碳排放较高。在运营模式方面,S农场的销售模式为供货商预定拿货,因此储藏需求很小,并且不存在送货运输需求。Y农场通过网上销售进行本地配送,需要使用大型冷库储存尚未销售的产品,并使用车

辆进行产品外运活动,带来较高的燃料排放。

H牧场碳排放主要来源于用电(53.06%)、动物肠道(28.36%)以及燃料燃烧(16.72%)。电力主要用于猪舍保温、自动化控制系统以及工作人员生活,动物肠道排放通过农场管理方降低空间较小。燃料燃烧排放主要来源于饲料运输过程以及猪舍保温中的柴油消耗。H牧场已经利用部分生物质能进行沼气发电,占总用电消耗的13.54%。

X水产养殖场的碳排放主要来源于用水(58.76%)以及用电(41.24%)。用水排放主要来源于水产养殖中供排水处理以及运输,电力排放主要来源于全天运行的增氧曝气设备,以维持高密度养

殖的富氧环境。

表 6 定海区 4 种典型农业生产活动的空间效率分析

Tab.6 Efficiency of four typical agricultural production activities in Dinghai District

内容		单位	Y生态家庭农场	S蔬菜专业合作社	H牧场	X养殖场
碳排放强度	单位产值碳排放	$tCO_2e \cdot (万CNY)^{-1}$	0.18	0.34	0.73	0.37
	单位面积碳排放	$tCO_2e \cdot (万m^2)^{-1}$	2.78	5.73	351.69	46.11
空间产出效率	单位面积产值 (按实际产值)	$CNY \cdot m^{-2}$	15.04	16.67	480.00	123.75
	单位面积产值 (中国碳市场)	$CNY \cdot m^{-2}$	15.03	16.64	478.51	123.56
综合空间产出效率	单位面积产值 (欧盟碳市场)	$CNY \cdot m^{-2}$	14.93	16.44	465.93	121.91

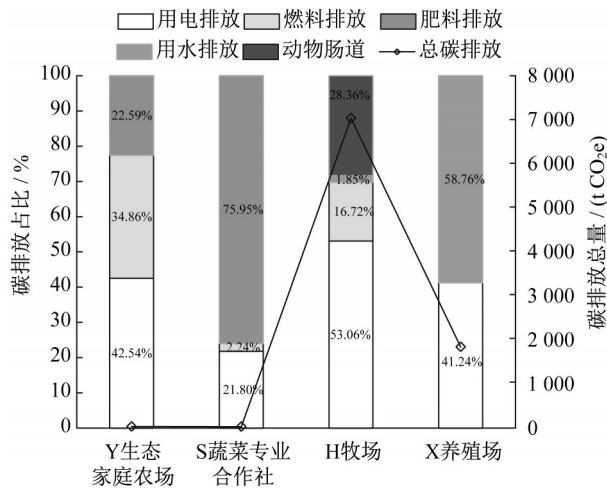


图 4 4 类典型农业生产碳排放总量对比及占比分析

Fig.4 Comparison of total carbon emissions from four types of typical agricultural production and analysis of their proportions

(2)空间产出效率分析

从空间产出效率(图 5a)来看,单位面积产值排序为:H牧场>X水产养殖场>S蔬菜专业合作社>Y生态家庭农场。即H牧场的单位面积上的期望产出效率最高,经济效益最高。而单位面积碳排放排序为:Y生态家庭农场<S蔬菜专业合作社<X水产养殖场<H牧场, Y生态家庭农场的非期望产出强度最小,H牧场在农业生产中带来的碳排放最高。

从综合空间产出效率分析(图 5b),4类典型农业生产活动的单位面积产值将会有所下降。按照目前的中国上海碳交易价格,H牧场、X水产养殖场、S蔬菜专业合作社、Y生态家庭农场单位面积产值将分别下降0.31%、0.16%、0.15%、0.08%。按照欧盟碳交易的价格,将分别下降2.93%、1.49%、1.37%、0.74%。牧场和水产养殖场的碳排放强度较高,参考市场平均利润率为25%,则碳排放成本参考欧盟价格可分别占利润的12%和6%左右。

由此可见,虽然H牧场的空间产出效率明显优

于其他农业产业,但在未来碳市场真正建立完善后,将面临更大的低碳转型压力。X养殖场(养虾)在4类典型农业生产空间中,经济效益和环境效益平衡较好,但也有降碳空间。S蔬菜专业合作社、Y家庭农场的压力,来自于经济效益提升,以及降低化肥使用带来的碳排放。

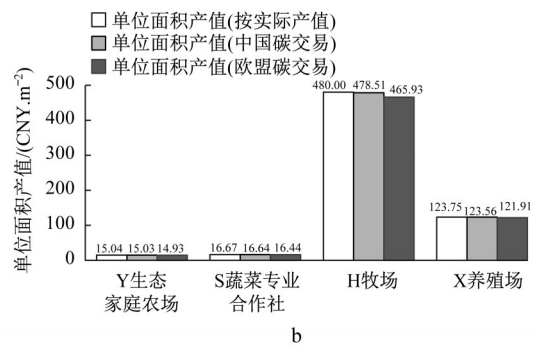
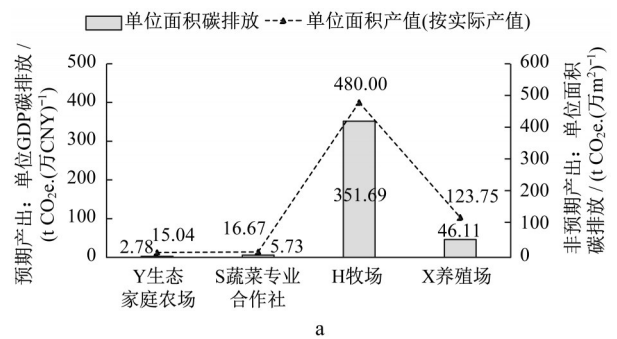


图 5 4 类农业生产单位空间预期产出、非预期产出以及综合产值对比

Fig.5 Comparison of the expected output, unexpected output and comprehensive output of the four types of agriculture

2.3 典型农业空间低碳规划策略耦合分析

根据上文分析结果,H牧场能源排放较高,更需要关注能一地、能一食关系。X养殖场用水带来的排放较高,更需要关注水一能、水一食物关系。对于S蔬菜合作社,化肥施用排放占比较高,需要更加关

注水—能、食—地关系。Y家庭农场排放主要来源于果蔬保存、运输中的能源消耗,需要关注能—地关系。因此,低碳规划策略从增加新能源使用、优化水资源利用以及加大有机肥利用3个方面展开。

2.3.1 增加新能源使用与土地、水的耦合

能源消耗量较大的农场为H牧场以及X养殖场,可考虑光伏等新能源的使用。以下分析中按照可安装光伏 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,发电量 $1(\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$,电价 $0.8\text{CNY}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$,减排因子 $0.69\text{kgCO}_2\text{e}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ 估算^[18]。具体分析如下:

(1)H牧场(图6c):屋顶总面积约为 $14\,300\text{m}^2$,考虑屋顶设备和检修通道,按50%面积可安装光伏计算,则全年可以发电71.5万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,减排493 tCO_2e ,占总排放量7%。H牧场2020年全年用电量为662万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,而且每日用电负荷稳定,光伏发电量基本可以被本地消纳。同时猪舍的钢筋混凝土平屋顶无需进行结构改造,按照投资 $4\text{CNY}\cdot\text{W}^{-1}$ 计算,投资回收期为5年。

(2)X养殖场(图6b):X养殖场的养虾大棚是标准化的单元,每个单元长65m,宽25m,屋檐高度

2m,拱顶最高点3.5m,屋顶总面积为 $1\,625\text{m}^2$ 。安装光伏面积按照60%计算,则全年可以发电9.75万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,减排67 tCO_2e 。每个养殖大棚年耗电量2.27万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,光伏发电量可本地消纳。养殖场全年总用电量145万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,相当于15个大棚(共64个)的光伏全年发电量。大棚的钢结构需要重建以符合光伏安装承载力要求,按照投资 $7\text{CNY}\cdot\text{W}^{-1}$ 估算,投资回收期为8.75年。

(3)Y农场(图6a):考虑到Y农场的冷藏用电以及运输能源消耗,也可安装一定比例的光伏,并更新新能源运输车辆。若在大棚安装光伏,本地消纳比例较低,重建钢结构将对土地造成压力,不符合基本农田的国土空间管理要求。因此,种植大棚目前不宜大规模安装光伏,可结合农场现有 600m^2 农业设施管理用房的屋顶安装,50%安装比例下,每年可发电约3万 $\text{kW}\cdot\text{h}$,可满足农场每年3万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 的用电需求,减排20.7 tCO_2e 。设施管理用房无需进行结构改造,按照投资 $4\text{CNY}\cdot\text{W}^{-1}$ 计算,投资回收期约为5年。

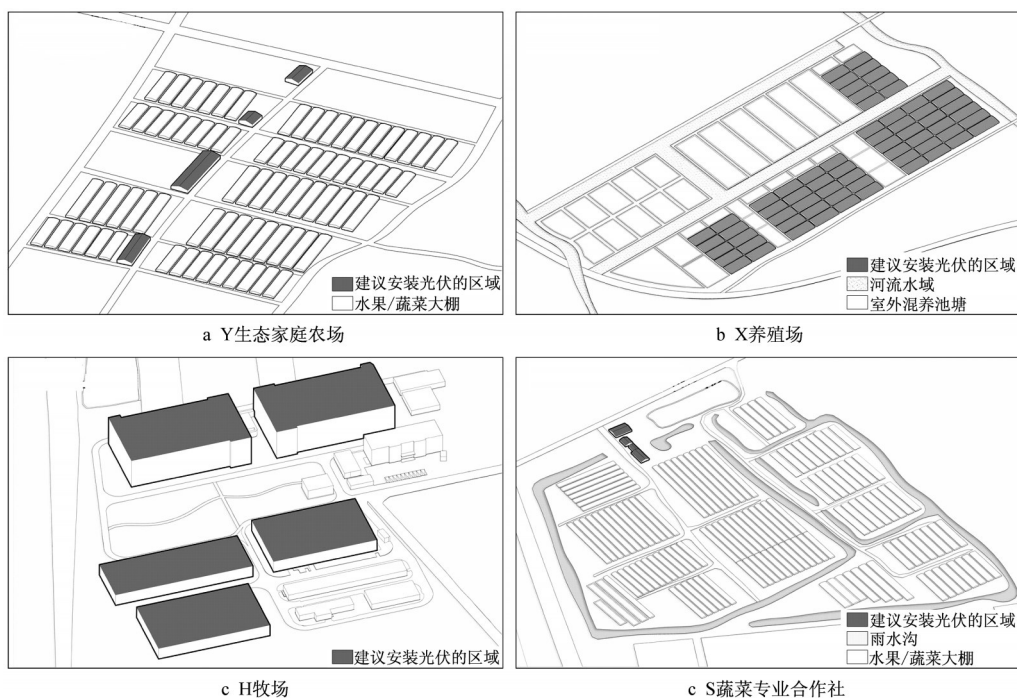


图6 农业空间光伏安装建议

Fig.6 The space of agricultural spaces recommended for photovoltaic installation

总体来说,在H牧场猪舍厂房屋顶、X养殖场部分养殖大棚、Y农场的设施管理用房安装光伏,经济效益和减排效益明显,且无需额外消耗土地和水资源。

2.3.2 水资源利用优化与土地、能源的耦合

(1)X养殖场:通过技术改进将换水频率从每 $1-3\text{d}\cdot\text{次}^{-1}$ 改成 $3-5\text{d}\cdot\text{次}^{-1}$,换水总量将减少50%。一方面能可减少50%来自远海输水、废水处理的能耗以

及饵料投入,减排约为541.95 tCO₂e,另一方面,减少水处理量可以将原有水处理设施占用的土地用于食品生产,提升期望产出。

(2)S蔬菜合作社以及Y家庭农场:定海的年降雨量较大,2019年降水量达到2 125.1mm^[19],但是全年分布不均。合理建设一定规模的雨水蓄积设施,可减少抽水灌溉的距离,从而降低能耗,同时起到防涝的作用。但蓄水明沟要占用较大比例的土地,如S蔬菜合作社蓄水沟占总用地面积的7.5%,因此可根据灌溉、防涝需求合理确定规模和选址。

2.3.3 加大有机肥利用与土地、能源的耦合

(1)S蔬菜专业合作社:由于化肥的碳排放效应为有机肥的30倍,虽然S蔬菜合作社化肥使用仅占比10%,但导致肥料排放占比为75.95%,远高于Y家庭农场全有机肥种植的22.59%。若在农场通过堆肥自制有机肥,将增加土地占用,也无法完全满足施肥需求。需要引入采用占地面积小的堆肥技术和设备,降低堆肥对土地的压力。

(2)H牧场:果蔬农场可通过与周边畜禽养殖农场的协作,通过有机肥的就近采购,既解决有机肥生产的占地问题,也可减少有机肥长距离运输过程中的能源消耗碳排放。

3 结论

以浙江省舟山市定海区乡村为例,开展了基于“WEFLC”耦合分析的海岛典型农业空间评估与低碳规划研究。主要结论如下:

(1)将传统的“水—能—食”线性关系转变为“WEFLC”循环关系,为降低非期望产出(碳排放),在期望产出(食品产量)不变或者增加的条件下,重点考虑农业生产投入中水—能—地的相关关系,实现资源的高效利用。

(2)4种农业生产模式投入和产出具有较大差异。单位面积产值(期望产出)和单位面积碳排放(非期望产出)均为:H牧场>X养殖场>S蔬菜合作社>Y家庭农场,单位产值碳排放为:Y家庭农场<S蔬菜合作社<X养殖场<H牧场。

(3)在碳市场机制下,H牧场的综合单位面积产值将会下降,利润下降明显,减排压力较大;X养殖场的期望产出和非期望产出较为均衡,在提升用能、用水的情况下较为适合海岛地区发展;S蔬菜合作社、Y家庭农场减排压力不大,但需要通过产业升级提升期望产出。

(4)利用农业设施的屋顶安装光伏,适用于养猪和养虾产业,对用水、用地压力较小,且经济效益较好;对家庭农场和蔬菜合作社,可能会带来土地占用,降低作物产量,且投资较大,建议在有较大用能需求的情况下适当设置。

(5)水产养殖可以通过提高用水效率,降低水处理、输送带来的能源消耗,同时降低用地压力。农业种植可通过雨水沟保证用水安全,同时降低用水能耗,但会增加占地面积,需要根据需求进行设置。

(6)在种植基地内和周边利用秸秆等废物制作有机肥,可减少化肥使用、运输,从而降低农业种植碳排放,但将产生额外占地。建议结合新能源,使用高效的堆肥发酵设备,或就近采购周边畜禽养殖场生产的有机肥。

作者贡献声明:

王信:论文的构思者及负责人,指导论文构思、论文写作修改。

于涵:参与实地调研,完成论文绘图分析以及论文修改。

施雨:参与论文构思,完成论文数据分析、初稿写作及修改。

张沂頔:参与实地调研,完成数据整理、论文写作及修改。

参考文献:

- [1] CAMERON E. Climate change: implications for agriculture [R]. London: University of Cambridge, 2014.
- [2] WU J, BUTERA F M, WANG X, *et al.* Net zero carbon village planning guidelines for the Yangtze River Delta region in China [R]. Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2019.
- [3] 罗晓予. 基于碳排放核算的乡村低碳生态评价体系研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
LUO Xiaoyu. Study on low-carbon ecological evaluation system of villages based on carbon emission accounting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [4] 石斌. 城乡融合型村镇社区低碳营建体系研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2020.
SHI Bin. Research on low carbon construction system of community in desakota [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [5] 王奕佳, 刘焱序, 宋爽, 等. 水-粮食-能源-生态系统关联研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(7): 684.
WANG Yijia, LIU Yanxu, SONG Shuang, *et al.* Research progress of the water-food-energy-ecosystem nexus [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(7): 684.
- [6] 联合国政府间气候变化专门委员会. 气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告[R]. [S.l.]: 联合国政府间气候变化专门委员会

- 会, 2019.
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate [R]. Monaco: IPCC, 2019.
- [7] 中华人民共和国国务院. 全国主体功能区规划[EB/OL]. [2021-11-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-06/08/content_1441.htm.
- The State Council of the People's Republic of China. National main functional area planning[EB/OL]. [2021-11-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-06/08/content_1441.htm.
- [8] 宋丽美, 徐峰. 乡村振兴背景下农村人居环境碳排放测算与影响因素研究[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(2): 36.
- SONG Limei, XU Feng. Research on carbon emission calculation and influencing factors of rural human settlement environment under the background of rural revitalization [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2021, 36(2): 36.
- [9] 李王鸣, 倪彬. 海岛型乡村人居环境低碳规划要素研究——以浙江省象山县石浦镇东门岛为例[J]. 西部人居环境学刊, 2016, 31(3): 75.
- LI Wangming, NI Bin. Study on low-carbon planning elements of living environment in island type villages: A case study of Dongmen Island in Xiangshan County, Zhejiang Province [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2016, 31(3): 75.
- [10] SIVARAMAN I, KRISHNAN M, RADHAKRISHNAN K. Better management practices for sustainable small-scale shrimp farming[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214(3): 559.
- [11] GE J, LUO X, LU J. Evaluation system and case study for carbon emission of villages in Yangtze River Delta Region of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 153(1): 220.
- [12] 舟山市定海区统计局. 定海统计年鉴2020[M]. 舟山: 舟山市定海区统计局, 2021.
- Bureau of Statistics in Dinghai District, Zhoushan. Dinghai District statistical yearbook (2020) [M]. Zhoushan: Bureau of Statistics in Dinghai District, Zhoushan, 2021.
- [13] 黄葳, 胡元超, 任艳, 等. 满足城市食物消费需求的农业生产碳排放研究——以宁波为例[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4102.
- HUANG Wei, HU Yuanchao, REN Yan, *et al.* Carbon emission of agricultural production associated with urban food consumption: Ningbo as a case study [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12): 4102.
- [14] 邱子健, 靳红梅, 高南, 等. 江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J/OL]. 农业环境科学学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20211019.1154.003.html>
- QIU Zijian, JIN Hongmei, GAO Nan, *et al.* Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China [J/OL]. Journal of Agro-Environment Science. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20211019.1154.003.html>
- [15] LIN J L, KANG S F. Analysis of carbon emission hot spot and pumping energy efficiency in water supply system [J]. Water Science & Technology, 2019, 19(1): 200.
- [16] GU Y F, WANG H T, XU J, *et al.* Quantification of interlinked environmental footprints on a sustainable university campus: A nexus analysis perspective [J]. Applied Energy, 2019, 246(7): 65.
- [17] RINGLER C, BHADURI A, LAWFORD R. The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency? [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6): 617.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区电网基准线排放因子[S]. 北京: 国家气候战略中心, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Emission factors of China's regional power grid baseline in emission reduction projects (2019) [S]. Beijing: National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation (NCSC), 2020.
- [19] 阙成蛟. 定海区2019年天气气候公报[R]. 舟山: 定海区气象台, 2020.
- QUE Chengjiao. Weather and climate Bulletin in Dinghai District (2019) [R]. Zhoushan: Meteorological Observatory in Dinghai, 2020.