

海-陆交互作用与海岸带碳中和农业驱动

周启星, 王辉, 欧阳少虎

引用本文:

周启星, 王辉, 欧阳少虎. 海-陆交互作用与海岸带碳中和农业驱动[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(1): 1-10.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-1092>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

农业利用对毛乌素沙地土壤碳氮含量及微生物量的影响

薛英龙, 李春越, 王益, 苗雨, 常顺

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2325-2335 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0472>

中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控

马林, 卢洁, 赵浩, 柏兆海, 胡春胜

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2387-2391 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1369>

发展环水有机农业控制农业面源污染的政策与建议

王磊, 席运官, 肖兴基, 高吉喜

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1590-1594 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0340>

“产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放

刘广龙, 李涛, 薛利红, 樊丹, 戴志刚, 甘晓东, 张凯, 周宇翔, 胡荣桂

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1963-1970 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0369>

国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展

张克强, 杜连柱, 杜会英, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2472-2481 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1031>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周启星, 王辉, 欧阳少虎. 海-陆交互作用与海岸带碳中和农业驱动[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 1-10.

ZHOU Q X, WANG H, OUYANG S H. Sea-land interactions and the drive for carbon-neutral agriculture in the coastal zone[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1): 1-10.



开放科学 OSID

海-陆交互作用与海岸带碳中和农业驱动

周启星, 王辉, 欧阳少虎

(南开大学环境科学与工程学院/南开大学碳中和交叉科学中心, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 海岸带既是生态脆弱区也是低碳农业发展“前哨”。推动和发展碳中和农业符合时代所需, 也符合绿色、可持续发展理念。基于此, 本文阐述了在海岸带区域发展碳中和农业的相关问题和重要性。首先, 本文阐释了海陆交互作用以及海岸带碳中和农业发展理念; 然后, 分析了海岸带碳中和农业驱动中的碳中和农业生物、人工光合作用与农业驱动以及该理念的工程化应用问题; 最后, 深入剖析了如何识别海岸带农业核心碳汇, 包括原位监测、同位素标记与统计学分析方法, 并在此基础上提出了农业碳汇增强技术, 为后续海岸带碳中和农业的构建、发展和实践提供参考, 同时对促进脆弱的海岸带生态系统的保护和绿色低碳农业的发展具有重要意义。

关键词: 碳中和农业; 海岸带; 海陆交互作用; 可持续发展; 人工光合作用

中图分类号: F323; X322 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)01-0001-10 doi:10.11654/jaes.2023-1092

Sea-land interactions and the drive for carbon-neutral agriculture in the coastal zone

ZHOU Qixing, WANG Hui, OUYANG Shaohu

(MOE Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Carbon Neutrality Science Center, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Coastal zones are both ecologically fragile and "outposts" for low-carbon agricultural development. The promotion and development of carbon-neutral agriculture is in line with the needs of the times and the concept of green and sustainable development. Based on this, this paper describes the issues related to the development of carbon-neutral agriculture in coastal zones. Firstly, this paper explains the mechanism of sea-land interaction and the concept of carbon-neutral agriculture development in coastal zones. Then, it analyzes the carbon-neutral agricultural organisms, artificial photosynthesis, and agricultural promotion in the carbon-neutral agricultural driving in coastal zones as well as the engineering application of the concept. Finally, the paper provides insights into how to identify core carbon sinks in coastal zone agriculture, including *in situ* monitoring, isotope labeling, and statistical analysis methods. On this basis, the technology of agricultural carbon sink enhancement is proposed to provide a reference for the subsequent development and promotion of carbon-neutral agriculture in the coastal zone and its practical application. It can also promote the protection of fragile coastal zone ecosystems and the development of green and low-carbon agriculture.

Keywords: carbon-neutral agriculture; coastal zone; sea-land interaction; sustainable development; artificial photosynthesis

碳中和是当今世界绿色发展和可持续发展的必然趋势, 全世界 29.2% (1.49 亿 km²) 的陆地面积和 70.8% 的海洋面积使得海洋与陆地系统之间会沿着漫长海岸线通过海陆交互作用形成广阔的海岸带。海岸带是海洋与陆地交互作用的核心地带, 是一个兼

具动态性和复杂性的自然生态系统, 也是沿海陆地、河流、近海、大气、生物圈和人类活动交汇的关键地带, 既是发展黄金带, 又是生态脆弱区^[1-3]。由于全球气候的影响, 海岸带还是地球表层进行物质流、能量流和信息流交换最活跃的区域之一^[4]。海岸带独特

收稿日期: 2023-12-21 录用日期: 2023-12-29

作者简介: 周启星 (1963—), 男, 浙江人, 教授, 主要从事生态地球化学、环境毒理和生态修复等方面的研究。E-mail: zhouqx@nankai.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3709001)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2023YFC3709001)

的地理位置和气候条件,使得这些区域包含了几乎所有的重要生态系统类型。因此,海岸带还是世界上人口最密集的区域之一。据估计,在全世界近 5×10^6 km长的海岸带陆侧,在沿海约60 km的范围内生活着全世界50%以上的人口,人口超过1 000万的特大城市中有75%位于沿海地带,而人口在250万以上的城市有2/3位于潮汐河口附近^[5-6]。虽然海岸带面积狭小,但这些地方往往地势平坦、土地肥沃、降雨充足,是重要的农业发展带。然而,农业的发展又常伴随着大量的温室气体排放,包括稻田甲烷(CH_4)排放、农地施加氮肥导致氧化亚氮(N_2O)排放、秸秆焚烧或填埋造成二氧化碳(CO_2)排放以及农机使用导致化石燃料燃烧^[7]。据估计,全球农田生态系统每年排放的 CO_2 当量约为15亿t,占全球总温室气体排放量的30%;而且,氮肥作为农田生态系统主要使用的化肥,其也是全球 N_2O 排放的重要来源。通过施肥引起的 N_2O 排放约占全球总土地排放的30%^[8-9]。碳中和作为我国新时代的重大发展战略,如何在高效发展农业的同时减少碳排放甚至增加碳汇成为一个重要的发展议题。因此,了解海陆交互作用机制以及在海岸带开展碳中和农业显得至关重要。

1 海陆交互作用与海岸带碳中和农业

1.1 海陆交互作用及海岸带的形成

1.1.1 海陆交互作用

海陆交互作用主要是指海域生态系统与陆域生态系统之间发生的一系列互作过程(图1),主要包括

地貌过程(如填海造陆、跨海工程、河口淤积和海岸侵蚀等)、气候过程(如海陆风、海平面上升与下降以及沿海风暴潮等)、生物学过程(如红树林、滨海湿地动植物、鸟类迁徙和底栖生物等)和人类活动过程(如居住、工业、农业、渔业、养殖业、交通和航海等)等多种过程的耦合^[4,10]。在人为干扰和自然因素影响下,海陆交互作用以水循环为主要媒介,不断与环境进行物质、信息和能量上的交换,并进一步驱动其间的景观格局演替、物质元素循环、动植物及微生物生长代谢和其他各种生态功能的运行。海域生态系统中的水首先通过蒸发变成水蒸气上升到大气层,在洋流的作用下进行水汽输送,然后通过凝结和降水的方式到达陆域生态系统。这些到达陆域生态系统的水除被生物利用外,部分通过蒸发的方式回到大气,其余通过地表径流或地下径流的方式从海岸带回到海洋,从而完成水的海陆间循环。在这个过程中,降落到陆地的水会溶解土壤中的各种营养物质、无机盐或其他各种污染物,同时也会裹挟泥沙等不溶物质到达海岸带,从而在海岸带发生一系列交互作用^[11-12]。海陆交互作用使得海岸带生态系统成为最复杂也是最活跃的生态系统之一。海陆交互作用产生的生态系统主要由多样的自然资源、复杂的自然环境以及人为活动产生的社会和经济等子系统构成,其具有多样性和复杂性。海岸带生态系统具有丰富的农林资源(如水田、林地和滩涂等)、渔业资源(如鱼塘、海产养殖和人工捕鱼等)、风能与潮汐资源(如发电)、盐业资源(如制盐)以及多种特色生态资源(如红树林、盐碱地、珊瑚

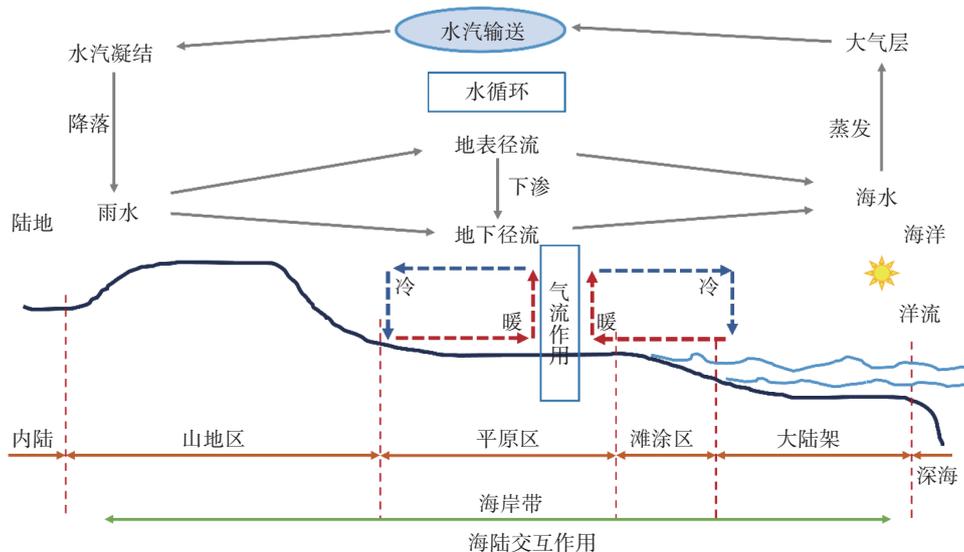


图1 海岸带与海陆交互作用

Figure 1 Coastal zones and sea-land interactions

礁和河口湿地等);既包括了地质运动、物理迁移、化学转化、生物活动和微生物代谢等现象或过程,也有复杂多变的气候条件和自然灾害^[13-14]。海陆交互作用使得该系统中的每一子系统都是开放的,它们之间可以相互进行物质、能量和信息的交流,并可有机协同成为一个整体,从而具有一定强度、韧性和适应力,能对外界的刺激进行很好的自我调节,并在一定程度上保持该生态系统的活力和稳定性^[15-16]。当然,海陆交互作用产生的生态系统也是生态极度敏感脆弱的,这种海陆交互作用可能会受到洋流运动、地质变迁、海平面提升/下降、气候变暖或人为活动(污染或工农业活动)的极大影响,甚至会使得“沧海变桑田”,海域生态系统或陆域生态系统相互变迁^[17]。

1.1.2 海岸带的概念和类型

海陆交互作用的区域称为海岸带。海岸带是基于海岸线而存在的,它是连接陆域生态系统和海域生态系统的中间缓冲区域^[18]。从广义上说,海岸带指的是向海洋和陆地两个方向进行扩散的广阔区域,包括延陆地方向的沿海平原与河口三角洲地区,以及延海洋方向的从浅海大陆架到大陆架边缘的区域^[4,10]。而狭义的海岸带特指陆地向海洋的过渡区域,包括潮上带、潮间带和 underwater 岸坡,但目前关于海岸带区域的划分在世界范围内并没有统一的标准^[19]。1972年美国颁布的《海岸管理费》中将海岸带定义为相互间有强烈相互作用的沿海水域和临海陆地区域(包含岛屿、盐沼地、滨海湿地、海滩、海岸、过渡带和潮间带)^[20]。而我国在20世纪80年代进行全国海岸调研时则将海岸带定义为以潮间带向陆地延伸10 km、向海洋延伸10~15 km的区域,而对于河口区域来说,海岸带的边界则需要向陆地延伸到潮区界、向海洋延伸至浑水线或淡水舍^[21]。1995年,国际上提出海岸线新定义为包含大陆架边坡约100 m等深线和陆地200 m等高线以内的广大区域,并涉及内陆延伸到河流的区域^[22]。这种定义目前并不被广泛接受,通常情况下研究者还是可以根据其实际的研究需求,选择合适的海岸带范围。侯西勇等^[23]利用GIS空间分析技术、条带分割法以及优势度和土地利用程度综合指数分析了21世纪我国海岸带区域土地利用的数量、结构、空间格局和集约化特征,其设置的海岸带范围是全国海岸线向陆地一侧30 km的缓冲区域;唐玉芝等^[24]通过构建新一代海岸带与海域生态承载力及可持续性评估框架系统分析了1990—2019年粤港澳大湾区海岸带与海域空间场景、生态承载力及可持续性变化,其定义的海

岸带为大湾区1990年海岸线向陆延伸10 km和领海基线向海延伸200海里的广阔范围。可见,海岸带既是受人类活动强烈干扰和作用的区域,也是受全球气候变化影响的地区,其具有独特的自然属性,是生物地球化学循环最活跃的区域之一,也是全球生态最脆弱的区域之一。海岸带维系着全球最脆弱和敏感的生态系统,包括林地、河口湿地、海草床、红树林、盐沼地、滩涂地、珊瑚礁和广袤的大陆架,为许多生活在淡水、咸水和淡咸水交接水域的动植物和微生物等提供了独特且关键的生存栖息地,同时其也拥有多种生态维系功能,如物质转化、元素循环、有机污染物降解、食物生产、原材料供给、提供生境和防风浪护海堤等^[25-26]。值得一提的是,大量泥沙通过河流冲刷形成的河口平原和湿地具有较高的土壤肥力,是发展农业生产的重要场所,例如黄河河口区、长江河口区和珠江河口区等,这些地区也成为了重要的人类聚集地和文明发源地。因此,研究海岸带农业生产具有重要的现实意义。

1.2 海岸带碳中和农业

1.2.1 碳中和农业理念的提出

大量的农业生产在保证国家粮食安全的同时,也产生了大量的农业碳排放。这些碳排放与工业制造、能源消耗和交通运输相比,可能更容易受到直接或间接的气候、地形等因素影响^[7]。农业生产中涉及到的温室气体碳排放主要包括种植业(如化肥施加、秸秆焚烧、稻田排放和农用地排放等)、畜牧业(如食草动物肠道发酵、粪便管理)、渔业(如饵料投喂、渔船燃油排放)和农机使用(如化石燃料燃烧)等^[27-28]。农业生产中温室气体的排放主要分为两种形式:厌氧环境下的 CH_4 排放以及氮肥或粪肥输入导致的 N_2O 排放。在淹水的环境(稻田、湿地)下,土壤中的 O_2 被微生物、动物或植物的根系消耗而产生厌氧环境,使得产甲烷菌利用土壤中的有机物发酵产生 CH_4 气体^[29]。同时,为了提高作物产量,大量的氮肥或农家肥施用于土壤,这些氮肥未被及时利用而引起 N_2O 的直接排放,或通过氮的淋溶进入大气和水体引起 N_2O 的间接排放^[30]。农业生产既是巨大的温室气体排放源,又有着巨大的碳汇潜力。有研究表明,通过优化设计可以使我国农业碳排放潜力减少30%~50%。实现“碳减排”作为我国新时代生态文明建设的重要内容,力争2030年实现“碳达峰”、2060年实现“碳中和”的宏伟目标,我们提出发展“碳中和农业”显得势在必行。具体而言,发展碳中和农业就是要摆脱传统农业高投

人、高消耗的模式,转向低碳农业发展方向,包括科学的化肥施用模式、合理的作物配置、秸秆的回收再利用和新能源技术的使用等,通过减少碳源的排放和增加碳汇的吸收实现碳中和农业理念。

1.2.2 海岸带碳中和农业及其发展模式

海岸带特别是河口三角洲或河流下游形成的冲击平原,由于陆地生态系统不断地通过水流作用输入各种营养物质和无机盐离子,这些区域自古以来就是重要的农业发展地区。而且,当代社会的发展模式是要利用更少的土地生产出更高产、更高质量的农产品,同时保证低能耗、低污染和低投入,这就需要发展特色的海岸带碳中和农业模式。而且,根据海岸带的特点,其主要土地类型包括丘陵、平原、湿地、滩涂和海床,因此需要利用不同的土地类型发展特色的海岸带碳中和农业发展模式,包括农业碳中和粮食作物体系、低碳养殖体系、碳中和湿地生态系统、碳中和生物共生或协同体系和基于环境生物修复的碳中和体系^[29-31]。例如,在丘陵地区可以发展传统林木或经济类果树等种植模式,而在平原地区则可以发展粮食或蔬菜类的种植模式,对于湿地则可以进行需水作物种植或耐盐碱农作物种植,并兼顾养殖业的发展,可以利用滩涂和河床区域发展海产养殖或渔业活动。当然,因为不同物种对盐碱度适应能力的差异,必须合理进行农业生产区域的划分和作物的搭配^[12]。为了促进农业生产过程中的碳减排,可以合理地将每种农业活动产生的废物进行回收利用,通过优化设计,将废物变废为宝,既减少了废物处理的碳排放,又增加了农业生产的碳吸收^[17]。同时,利用海岸带丰富的自然资源和富饶且多样的土地类型,科学且合理地规划农业布局,利用当地的优势发展特色低碳农业,既可提高经济收益又能实现最大的碳中和目标。

2 海岸带碳中和农业驱动

2.1 海岸带碳中和农业生物

2.1.1 自然景观水平

海岸带的土地类型主要包括海岸带山区、海岸带平原区和海岸带滩涂区,通常从海洋向陆地大致呈现出“浅海水域→滨海湿地→人工湿地→陆域多类型混合区域”的分布格局^[32]。更进一步,一些学者将海岸带自然景观划分为建设用地、绿地、林地、耕地、裸地、滩涂、陆地水域和浅海以及海水养殖区域^[33]。随着人口和经济的增长、城市化建设的加快,建设用地在海岸带呈现逐年增长的趋势,且增长幅度逐年增加。而

绿地作为海岸带城市化建设的配套设施,虽然总面积在增大,但整体呈现破碎化,板块指数也逐年上升。海岸带林地面积总体呈现减少趋势,这些减少的面积主要转向为建设用地,这就使得利用林地作为农业生产的开发和利用将越来越难。对于耕地来说,其面积也呈现出逐年显著减少的趋势,同样其也转向为建设用地和工业用地,且由于城市化和工业化的发展,耕地被不断占用、切割,使得耕地的平均斑块面积逐年变小,破碎化加剧,且耕地间的连通度也逐年下降,空间分布越来越分散^[12]。然而,这种分散的耕地面积对于发展低碳农业是极为不利的。裸地的出现主要是受到城市化建设的影响,这种待建设地正成为增长速度最快的景观类型。滩涂作为海岸带重要的自然景观类型,其在城市发展中呈现逐渐减少的趋势,其主要转向为建设用地、养殖用地和耕地。对于陆地水域和浅海来说,其面积早期随着人口和经济的发展逐年减少,但随生态文明建设的推进又逐渐增多。对于海水养殖区域来说,目前其正有逐步扩大的趋势,主要原因就是近海渔业资源的枯竭迫使水产养殖的扩张。一些研究者将海岸带自然景观水平划分为农用地(如农田、果园等)、海防林、红树林、盐沼、海草床、砂砾质光滩和淤泥质光滩^[34]。但整体而言,海岸带自然景观水平呈现出一个动态变化过程。

2.1.2 人工调节与强化

海岸带存在着各种碳中和生物,它们都是发展碳中和农业的有效选择。海岸带林地和绿地可以选择碳中和植物中固碳能力较强的林木和灌木,如垂柳(*Salix babylonica* L.)、榆树(*Ulmus glaucescens* Franch.)、乌桕(*Sapium sebiferum* (L.) Roxb.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、乌冈栎(*Quercus phillyraeoides* A. Gray)、木芙蓉(*Hibiscus mutabilis* Linn.)、糙叶树(*Aphananthe aspera* (Thunb.) Planch.)、银中杨(*Populus alba* × *P. Berolinensis*)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)、针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)、紫丁香(*Syringa oblata* Lindl.)、连翘(*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl)、小叶丁香(*Syringa pubescens* Turcz. subsp. *Microphylla* (Diels) M. C. Chang et X. L. Chen)、水蜡(*Ligustrum obtusifolium* Sieb. et Zucc.)、锦带花(*Weigela florida* (Bunge) A. DC.)和红瑞木(*Cornus alba* Linnaeus)等^[35-37]。通过人工筛选和科学的优化配置,将这些高固碳能力的林木或灌木用于发展低碳农业可以起到固土保湿、增加土壤肥力的作用。从碳中和农业的角度,需要积极培育具有高效碳中和能力

的粮食作物(如水稻、玉米、小麦、大麦、荞麦、青稞、高粱、谷子、番薯、大豆和土豆等高固碳品种)、油料作物(如花生、油菜和黄豆等高固碳品种)、糖料作物(如甘蔗、甜菜等高固碳品种)和经济作物(如棉花、天然橡胶、蔬菜、水果、茶叶和食用菌菇等高固碳品种)等^[29-30],并根据不同海岸带的地域情况、气候特征和环境条件,通过优化碳中和农作物的搭配、化肥的施用量,显著提高集约化碳中和农作物种植系统,进而探究不同碳中和农业系统的共性与特性,积极发展具有地方特色的碳中和农业产业,推进海岸带碳中和农业生态工程建设。

2.2 人工光合作用与农业驱动

2.2.1 人工光合作用及其应用潜力

除了优化碳中和农业作物配置,通过人工光合作用增强碳的捕集也是发展碳中和农业的有效途径(图2)。人工光合作用指的是通过模仿植物光合作用过程将太阳能进行转化、存储与利用的过程,通过模拟植物叶绿素的光转化反应将CO₂和水还原为我们需要的有机化合物^[38-39]。在这个工程中,光感材料或其他具有光感效应的特殊材料、半导体材料在光照射情况下其材料中的电子能够发生跃迁,通过电子的定向移动形成电能或化学能,由此引发系统的氧化-还原反应,从而将CO₂和水还原转化为有机物。更进一步,可通过将人造光合系统与更复杂的微流技术相结合,如将人造光合系统封装到双层磷脂中,从而更好地模拟细胞的双层膜结构,与天然系统中的跨膜信号转导更有效地结合起来,进而强化人工光合效应^[40]。例如,Wan等^[41]通过将植物吸收和人工捕获相结合首次提出了利用具有混合氧化价态面的Cu₂O纳米立方体高效异相光催化还原CO₂的方法,实现了在室温无光照条件下裂解H₂以及高效、快速、催化转化还原CO₂,而且这种独特的表面结构使其具有高效催化活性和长期稳定

性。这种利用人工光合作用的方式,可以定向且高效地合成我们所需要的物质,具有巨大的经济价值,并且以光能作为驱动能源,以环境中CO₂和H₂O作为原料,在不产生碳排放的同时还能够吸收大量的环境碳源,不仅具有良好的生态价值,也具有广阔的工业应用潜力,这对于发展碳中和农业具有重要意义。

2.2.2 海岸带碳中和人工农业生态系统构建与实施

由于海岸带基本符合“山-城-海”地理格局,因此进行人工农业生态系统的构建和实施,应该以不破坏海岸带地理格局、维护生态健康安全、确立当地自然资源可识别性为基本原则,优先注重保护当地原有的生态系统、构建符合地方气候特点的人工农业生态系统,并需兼顾土地经济适用性、生态类型多样性、滨海地方特色风貌、资源可持续利用、空间优化配置等要求,合理控制土地农业生态开发力度^[23]。对于滨海山地区域的开发,首先重点加强纵深防护林建设,构建出由防护山体、水源涵养地构成的生态安全格局,只有这样才能保证人工农业生态系统的安全。其次,设立中低强度的生态管制区,划分生态保护区、生态缓冲区和有限开发区,将适合发展林业、农业和旅游业(生态景观)的区域细分开来,注重土地开发强度,合理规划土地的使用^[4,42]。对于滨海平原区的开发,由于其地势平坦、交通便利,是适合农业与工业发展的重要区域,因此首先需要以基础设施引导开发,通过利用区域内原有的河网水系、绿道、雨水花园等打造合适的农田生态系统、旱地种植系统和桑基鱼塘农业系统的人工农业生态网络,将原有区域的农业生态单元总体考虑,将农业布局、土地利用、空间优化、功能协调、景观生态、交通系统等方面与城市功能和社会发展相协调^[43]。其次,设立中高强度的城乡建设管制区,仔细梳理区域生态功能,将发展工业、商业、交通、居住、旅游、农业和养殖业的区域有机协调,在完

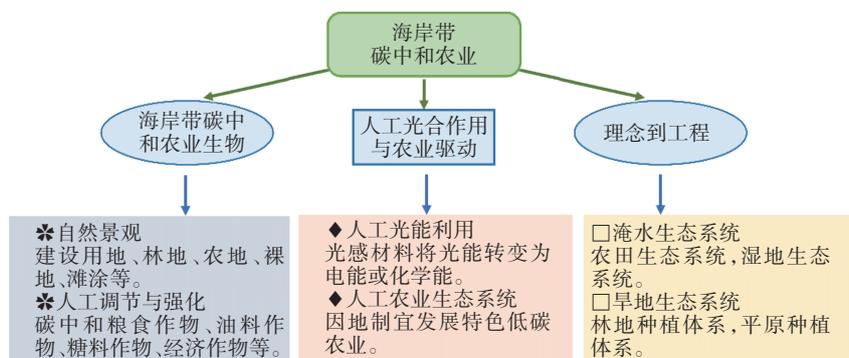


图2 海岸带碳中和农业驱动

Figure 2 Carbon-neutral agriculture drive in coastal zones

善城市功能的同时注重区域的合理规划与有机统一。而对于滨海滩涂区域的开发,需要兼顾其作为生态敏感区、生态脆弱区、生态缓冲区、生态保护区和重要资源储存区的定位,从环境安全、人体健康、生态修复等多角度进行考虑,包括加强湿地生态安全和健康的保护、修复湿地生态受污染状态、设立较低强度的岸线管制区以及适度开发湿地农业生态养殖,减少对滩涂的人为破坏^[10,44]。

2.3 海岸带碳中和农业驱动:从理念到工程

2.3.1 淹水农业系统

海岸带淹水农业系统主要指农田生态系统和人工湿地生态系统。对于海岸带的农田生态系统而言,大量的陆源物质输入使得农田具有较高的肥力,在农作物生长过程中不需要太多化肥或粪肥的加入,因此适合发展低碳农业。此外,在农作物生长过程中兼顾养殖业可以实现更大的经济效益,如利用稻田生长过程吸引的昆虫和产生的稻花进行渔业养殖或家禽养殖,既可以避免农药的施用又可以肥田,在减少碳排放的同时增加了碳汇,是一种安全、健康和可持续发展的生态农业发展方式^[45]。由此发展的桑基鱼塘低碳农业发展模式,利用桑蚕粪便养鱼、鱼粪肥田和污泥养桑,实现了生态低碳农业上的闭环。因此,在海岸带应用这种循环、可持续发展碳中和农业,可以极大减少碳源排放和增加碳汇吸收,并可保护海岸带脆弱且敏感的生态系统。当然,这些农田生态系统一般是淡水种植,而随着海岸带面积缩小,或海水倒灌导致土地盐碱化加剧,新的耐盐碱作物也被陆续开发,这些新品种的种植也需要兼顾碳捕获和生态保护。对于人工湿地生态系统,其包括淡水湿地和盐碱湿地,通常在这些区域进行碳中和农业应用需要兼顾农业种植和养殖业发展,包括水产养殖和家禽养殖^[7]。而对于农业中的养殖业而言,饵料投喂和粪便处理是碳排放的重要来源。因此,发展碳中和农业(养殖业)需要协同多种养殖体系,如将家禽养殖剩余的饵料和产生的粪便作为水产养殖的饲料,而水产养殖产生的粪便可以用来养殖食腐动物或作为海草/海藻的养料,从而在实现废物资源化和无害化处理的同时,也极大减少了碳的排放^[15,46]。

2.3.2 旱地农业系统

海岸带旱地农业系统主要包括山地种植体系和平原种植体系。对于山地农业来说,由于其地势的起伏并不适合进行需要大型机械化的粮食作物种植,反而适合进行经济作物种植,如茶叶种植和果树种植。

这种种植方式往往不需要进行大规模的浇水和施肥,同时农药残留也较少,这对发展碳中和农业是有利的,因为其既减少了碳源(如化肥、农药和农机等)投入,又增加了碳汇(果木生长、有机物产出)输出。与此同时,避免大规模的机械运作也可减少对山地脆弱生态系统的破坏和对土壤有机质层的干扰,有利于农业的可持续发展。对于平原种植体系而言,广阔且肥沃的海岸带平原是发展高质量农业的重要区域,大规模的机械化操作有利于减少人力输出,并提高农作物产量^[47]。科学且合理的化肥施用、农作物残渣的高效收集与资源化处理及喷淋技术的应用可以将物质的投入降到最低,将资源的利用效率显著提高,同时深耕细作、合理搭配不同农作物既可增加经济效益也可减少外部资源的投入,不同作物的轮种能够有效保证土壤的肥力,避免对土地资源过度利用^[48]。总的来说,对于旱地农业系统而言,如何有效减少资源的投入并增加农作物产量是实现碳中和农业的关键。

3 海岸带农业核心碳汇的识别及增强技术

3.1 海岸带农业碳汇的识别方式

3.1.1 原位监测

识别海岸带农业碳汇是发展碳中和农业的必要条件,而原位监测则是最常用也最直接的方式(图3)。碳汇原位监测最常用的方式是设置密闭网箱,通过实时监测网箱里大气流动过程中 CO_2 流入和流出浓度来计算土壤的碳吸收,同时也可计算出土壤的呼吸速率^[49]。当然,通过这种方式监测的土壤碳汇虽然麻烦但较为准确,其缺点是适用的范围较小。新开发

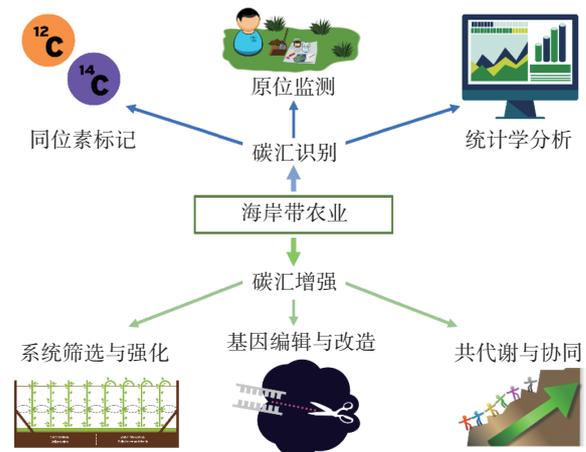


图3 海岸带农业碳汇的识别与增强

Figure 3 Identification and enhancement of agricultural carbon sinks in coastal zones

的一些土壤碳汇监测仪也被用于农业碳汇数据的实时监测,这种方式的优点是监测迅速、操作方便和成本低,但多种环境因素的干扰使得该方式的准确性颇受质疑^[50]。例如,胡乐宁等^[51]利用美国Li-COR公司生产的Li-8100仪对西南喀斯特地区典型土壤碳通量进行了监测和数据采集。随着技术的发展,现代利用遥感技术能够实现对更广阔区域的碳排放进行监测,如ARGUS实时在线系统、多时相极化SAR影像变化检测(极化合成孔径雷达)以及无人机遥感,进而能够实现对大区域、大尺度和长时段的农业碳汇进行监测^[4,52-53]。

3.1.2 同位素标记

利用同位素标记的方式对海岸带土壤碳汇进行监测是目前新发展起来的技术,主要是利用同位素的半衰期效应。同位素标记技术作为一种分析和示踪手段,在农业碳汇监测过程中对稳定同位素的测量可以用于评估土壤呼吸速率、了解土壤中碳的排放与吸收,其中最常用的同位素是 ^{14}C 和 ^{13}C ^[54]。刘文景等^[55]利用水化学-双碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}-\Delta^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$)对怒江流域进行了碳源-汇量化和机制研究,揭示了河流溶质和双碳同位素组成的时空变化规律。张月明等^[56]也利用碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)、氘同位素(δD)和氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)分析了重庆南山8个岩溶泉在不同降水条件下化学性质的变化特征及影响机制。除了碳($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $\delta^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$)、氢(^2H 、 ^3H)和氧($\delta^{18}\text{O}$)同位素可用于监测外,随着同位素标记技术的发展和同位素识别、检测技术的优化, ^{11}B 、 ^{37}Cl 、 ^{81}Br 、 ^{34}S 和 ^{87}Sr 等也有望在海岸带农业碳汇的研究中获得更广泛的应用。

3.1.3 统计学分析

随着现代信息技术的不断发展,利用大数据来进行碳汇分析也逐渐成为一种研究热点。因为不管是原位监测技术还是同位素示踪技术,它们均存在最显著的问题即监测时间较短、监测范围较小,且不能进行宏观尺度上的协同比较分析。因此,现在统计学的应用给碳汇在时间大尺度和空间大尺度上的分析提供了可能,这种分析方式可以将某块区域的碳汇数据从较大的时间跨度上进行比较,并且可以综合造成这种现象的各种影响因素,对其进行溯源分析,更加深刻地剖析碳汇增减的原因,为后续的减碳措施提供更加科学的建议^[57]。例如,鲍丽然等^[58]就采用地统计学分析方法剖析了重庆市表层土壤的有机碳密度空间分布,并进一步采用模型法评估了农田土壤固碳减排潜力。而且,现代人工智能的发展也为全球范围内碳

汇的综合比较分析以及不同区域环境碳汇差异比较分析提供了更多可能,机器学习等新技术甚至可以模拟碳汇在未来的一个变化情况,为后续更好地减少碳排放和增加碳汇提供参考^[59]。

3.2 农业碳汇增强技术

3.2.1 系统筛选与性能强化

增强农业碳汇是发展碳中和农业的关键,其中最简单的方式就是系统性地筛选那些具有强固碳能力的农作物,并对它们的固碳能力进行强化。系统筛选是一项庞大且繁琐的工程,因为自然环境中存在着各种各样的固碳生物,包括固碳植物、固碳动物和固碳微生物或者藻类,如何选择适应于当地气候发展和经济需求的物种是一个重点,同时要保证这个物种在具有高固碳能力的同时不会影响其他物种的生存,不会对当地的生态安全造成影响^[60]。例如我们对污染物超富集植物进行筛选时,不仅需要考虑它的富集能力,还需要考虑它与其他物种的协调关系和后续的环境安全性^[61]。在筛选出合适的物种后,需要对该物种的固碳能力进行强化,包括从育种开始的强化和生长过程的强化,只有通过不断的驯化作用才能使其在实际应用中产生价值。

3.2.2 基因编辑与改造

除了自然的筛选与强化外,基因技术的发展使人们可以通过对功能基因进行编辑和改造从而强化生物的固碳能力,这对于发展碳中和农业也是一条重要途径。例如,通过基因编辑技术可以将碳中和植物的光合作用基因进行强化,使得植物的光合效率提升,与此同时,抑制其呼吸效率,在减少植物碳排放的同时增加碳的吸收,进而增强碳汇^[62]。对于一些光合藻类或光合细菌而言,基因的编辑与改造技术可以人为增强一些碳固定与碳转化的基因,或引入其他物种的高性能基因,进而构建工程菌或工程藻,用于农业生产来提升农业碳汇潜力^[63]。当然,由于目前该技术存在成本较高、操作复杂、不可靠等原因并未受到重视,但随着技术的不断发展与改进,基因编辑与改造技术无疑会在未来碳中和农业发展中占据一席之地。

3.2.3 共代谢与协同

碳中和农业的发展不只是某一种生物的作用,而是常需要多种生物的协同作用,对于一些碳中和微生物或者藻类来说,它们通常需要一个互利共生的共代谢生存空间。而且,农业生态系统是一个有机整体,需要农业植物进行固碳,同时也需要微生物协同作用为农作物的生长提供一个良好的生存环境。因此,构

建农业植物-微生物协同固碳体系对于农业碳汇增强至关重要^[64]。在这个过程中,我们需要了解农业体系中微生物类群的共发生模式和相互作用关系,微生物介导的碳中和植物功能强化作用,环境过滤对根际微生物群落时空格局的调控机制,扩散限制对根际微生物群落时空格局的调控机制^[30,65]。正确理解农业植物与微生物之间的协同合作关系,厘清它们相互作用对碳固定和碳减排的作用机理,从而合理进行农业布局,强化农业生产过程中的碳汇潜力。

4 展望

海岸带是生态敏感带,也是农业发展带,碳中和农业的发展是顺应时代需求和符合人类社会发展的趋势。因此,了解海岸带低碳农业发展理念并发展低碳农业生产方式是推动和实现海岸带碳中和农业的必然选择。然而,目前该领域的发展仍然面临诸多困难。

(1)如何有机协调海岸带农业发展与城市发展规划?在保证海岸带城市经济和社会发展的同时,兼顾海岸带敏感且脆弱的生态系统,发展绿色农业、低碳农业和可持续农业。

(2)如何优化海岸带农业布局模式?不同地形和地域的海岸带拥有不同的气候条件,同一区域海岸带由于海陆距离又划分出不同的土地类型,在这种多样化的海岸带发展碳中和农业需要因地制宜、因时制宜、统筹规划、合理安排。

(3)如何强化海岸带农作物的持续固碳能力?选择高固碳能力的作物是最常见的做法,但农业生态系统是一个复合的整体,提高农业固碳能力需要协同考虑农作物与土壤微生物的作用关系,不仅需要强化农作物固碳还需要促进土壤微生物固碳,两者缺一不可。

此外,碳中和农业新技术的开发也是未来的重点研究方向。

参考文献:

- [1] DARLING E S, MCCLANAHAN T R, MAINA J, et al. Social-environmental drivers inform strategic management of coral reefs in the Anthropocene[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3:1341-1350.
- [2] INNOCENTI A, MUSCO F. Land-sea interactions: a spatial planning perspective[J]. *Sustainability*, 2023, 15:9446.
- [3] WU T, HOU X Y, XU X L. Spatiotemporal characteristics of the mainland coastline utilization degree over the last 70 years in China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 98:150-157.
- [4] 王焰新,甘义群,邓娅敏,等.海岸带海陆交互作用过程及其生态环

- 境效应研究进展[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1):1-10. WANG Y X, GAN Y Q, DENG Y M, et al. Land-ocean interactions and their eco-environmental effects in the coastal zone: current progress and further perspectives[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1):1-10.
- [5] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10):1133-1142. LUO Y M. Sustainability associated coastal eco-environmental problems and coastal science development in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(10):1133-1142.
- [6] 刘小丁,唐力明,孙端,等.广东省海岸带地区资源环境承载力综合评价[J]. *热带地理*, 2023, 43(3):459-473. LIU X D, TANG L M, SUN D, et al. Comprehensive evaluation of resources and environmental carrying capacity in Guangdong coastal zone[J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(3):459-473.
- [7] 邓武军,黄颂,邹鹏,等.浅谈我国粮食主产区农业领域碳中和实现路径:以湖南省为例[J]. *中国工程咨询*, 2023(10):93-96. DENG W J, HUANG S, ZOU P, et al. A brief discussion on the realization path of carbon neutrality in the agricultural field in the main grain producing areas of China: Hunan Province[J]. *China Engineering Consultants*, 2023(10):93-96.
- [8] TERRER C, PHILLIPS R P, HUNGATE B A, et al. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂[J]. *Nature*, 2021, 591(7851):599-603.
- [9] CUI X, ZHOU F, CIAIS P, et al. Global mapping of crop-specific emission factors highlights hotspots of nitrous oxide mitigation[J]. *Nature Food*, 2021, 2(11):886-893.
- [10] 龚蔚霞,张虹鸥,钟肖健.海陆交互作用生态系统下的滨海开发模式研究[J]. *城市发展研究*, 2015, 22(1):79-85. GONG W X, ZHANG H O, ZHONG X J. Research on the development mode of coastal area basing on ecosystem of sea-land interaction[J]. *Urban Development Studies*, 2015, 22(1):79-85.
- [11] XU X, LI X, CHEN M, et al. Land-ocean-human interactions in intensively developing coastal zone: demonstration of case studies[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 133:28-36.
- [12] 周启星,鲍艳宇,刘维涛,等.生态地学[M].北京:科学出版社,2017. ZHOU Q X, BAO Y Y, LIU W T, et al. *Ecological geosciences* [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [13] CAO W Z, WONG M H. Current status of coastal zone issues and management in China: a review[J]. *Environment International*, 2007, 33(7):985-992.
- [14] LI Y, ZHANG H B, TU C, et al. Sources and fate of organic carbon and nitrogen from land to ocean: identified by coupling stable isotopes with C/N ratio[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 181:114-122.
- [15] BARCELO M, VARGAS C A, GELCICH S. Land-sea interactions and ecosystem services: research gaps and future challenges[J]. *Sustainability*, 2023, 15:8068.
- [16] DONEY S C. The growing human footprint on coastal and open ocean biogeochemistry[J]. *Science*, 2010, 328(5985):1512-1516.
- [17] 周启星.资源循环科学与工程概论[M].北京:化学工业出版社,2013. ZHOU Q X. *Resource cycle science and engineering*[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2013.

- [18] BARROS J L, SANTOS P P, TAVARES A O, et al. The complexity of the coastal zone: definition of typologies in Portugal as a contribution to coastal disaster risk reduction and management[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 86(15): 103556.
- [19] YANG F, YANF X, WANG Z, et al. Spatiotemporal evolution of production-living-ecological land and its eco-environmental response in China's coastal zone[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15: 3039.
- [20] 赵锐, 赵鹏. 海岸带概念与范围的国际比较及界定研究[J]. 海洋经济, 2014, 4(1): 58-64. ZHAO R, ZHAO P. Defining and international comparing of conception and scope of coastal zone[J]. *Marine Economy*, 2014, 4(1): 58-64.
- [21] 陈宝红, 杨圣云, 周秋麟. 试论我国海岸带综合管理中的边界问题[J]. 海洋开发与管理, 2001, 5: 27-32. CHEN B H, YANG S Y, ZHOU Q L. On the boundary problem of integrated coastal zone management in China[J]. *Ocean Development and Management*, 2001, 5: 27-32.
- [22] PERNETTA J C, MILLIMAN J D. Land-ocean interactions in the coastal zone: implementation plan[J]. *Oceanographic Literature Review*, 1995, 9(42): 801.
- [23] 侯西勇, 徐新. 21世纪初中国海岸带土地利用空间格局特征[J]. 地理研究, 2011, 30(8): 1370-1379. HOU X Y, XU X. Spatial patterns of land use in coastal zones of China in the early 21st century[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(8): 1370-1379.
- [24] 唐玉芝, 石铁柱, 刘潜, 等. 基于空间场景的海岸带与海域生态承载力及可持续评价[J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2811-2832. TANG Y Z, SHI T Z, LIU Q, et al. Ecological carrying capacity and sustainability assessment for coastal and maritime area based on spatial scene: a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(11): 2811-2832.
- [25] 周启星, 刘家女, 薛生国, 等. 污染环境修复实践与案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021. ZHOU Q X, LIU J N, XUE S G, et al. Pollution environmental remediation practice and cases[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2021.
- [26] SHAMPA M T A, SHIMU N J, CHOWDHURY K M A, et al. A comprehensive review on sustainable coastal zone management in Bangladesh: present status and the way forward[J]. *Heliyon*, 2023, 9(8): e18190.
- [27] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. SUN T H, ZHOU Q X, LI P J. Pollution ecology[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [28] 何可, 李凡略, 刘颖. “双碳”目标下的畜禽养殖业绿色发展[J]. 环境保护, 2022, 50(16): 28-33. HE K, LI F L, LIU Y. Green development of livestock and poultry farming under the goal of carbon peaking and carbon neutrality[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(16): 28-33.
- [29] 周启星, 李晓晶, 欧阳少虎. 关于“碳中和生物”环境科学的新概念与研究展望[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 1-9. ZHOU Q X, LI X J, OUYANG S H. Carbon-neutral organisms as the new concept in environmental sciences and research prospects[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1): 1-9.
- [30] 周启星, 王琦, 郑泽其, 等. 农业粮食生产中的碳中和与生态修复[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 1-10. ZHOU Q X, WANG Q, ZHENG Z Q, et al. Carbon neutrality and ecological remediation in agricultural grain production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 1-10.
- [31] PANT D, NADDA A K, PANT K K, et al. Advances in carbon capture and utilization[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [32] 宋百媛, 侯西勇, 刘玉斌. 黄河三角洲-莱州湾海岸带土地利用变化特征及多情景分析[J]. 海洋科学, 2019, 43(10): 24-34. SONG B Y, HOU X Y, LIU Y B. Land-use change characteristics and scenario analysis in the Yellow River Delta and Laizhou Bay coastal zone [J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(10): 24-34.
- [33] 黄宁, 杨绵海, 林志兰, 等. 厦门市海岸带景观格局变化及其对生态安全的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3193-3202. HUANG N, YANG M H, LIN Z L, et al. Landscape pattern changes of Xiamen coastal zone and their impacts on local ecological security[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(12): 3193-3202.
- [34] 伽红凯, 卢勇, 陈晖. 环境适应与技术选择: 明清以来长三角地区特色农业发展研究[J]. 中国农史, 2021, 40(4): 127-139. QIE H K, LU Y, CHEN H. Environmental adaptation and technology selection: research on the development of characteristic agriculture in the Yangtze River Delta region since Ming and Qing dynasties[J]. *Agricultural History of China*, 2021, 40(4): 127-139.
- [35] 古佳玮, 洗丽铨, 郑峰霖, 等. 9种园林植物幼苗光合特性及固碳释氧能力研究[J]. 林业与环境科学, 2023, 39(2): 46-53. GU J W, XIAN L H, ZHENG F L, et al. Study on photosynthetic characteristics and carbon fixation and oxygen release capacity of nine garden plant seedlings[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2023, 39(2): 46-53.
- [36] 陈高路, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山10种典型植物固碳释氧能力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 206-220. CHEN G L, CHEN L, PANG D B, et al. Study on carbon sequestration and oxygen release capacity of 10 typical plants in Helan Mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 206-220.
- [37] 陈芸, 周启星, 陶宗鑫, 等. 碳中和植物降污固碳及其机制研究进展[J/OL]. 环境科学, 1-19[2023-12-11] <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202307068>. CHEN Y, ZHOU Q X, TAO Z X, et al. Research progress in reducing pollution and sequestration of carbon by carbon neutral plants[J/OL]. *Environmental Science*, 1-19[2023-12-11] <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202307068>.
- [38] LIU L, BAI B, YANG X Y, et al. Anisotropic heavy-metal-free semiconductor nanocrystals: synthesis, properties, and applications[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(7): 3625-3692.
- [39] 黄天芳. 我国人工光合作用研究新进展[J]. 湖北工程学院学报, 2023, 43(6): 29-32. HUANG T F. New research progress of artificial photosynthesis in China[J]. *Journal of Hubei Engineering University*, 2023, 43(6): 29-32.
- [40] WANG J L, TAN H Y, QI M Y, et al. Spatially and temporally understanding dynamic solid-electrolyte interfaces in carbon dioxide electroreduction[J]. *Chemical Society Reviews*, 2023, 52: 5013-5050.
- [41] WAN L L, ZHOU Q X, WANG X, et al. Cu₂O nanocubes with mixed oxidation-state facets for (photo)catalytic hydrogenation of carbon dioxide[J]. *Nature Catalysis*, 2019, 2: 889-898.
- [42] 杨伟明, 张璇, 任大伟, 等. 滨海山地多河地区城市内涝防治研究[J]. 中国水利, 2023(6): 55-59. YANG W M, ZHANG X, REN D W, et al. Research on countermeasures for urban flooding prevention

- and control in coastal, mountainous and multi-river area[J]. *China Water Resources*, 2023(6):55-59.
- [43] 张军辉. 滨海平原区耕地等别空间格局研究:以河北省黄骅市为例[J]. *中国国土资源经济*, 2022, 35(3):38-44. ZHANG J H. Research on the spatial pattern of cultivated land grade in the coastal plain: a case study of Huanghua City of Hebei Province[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022, 35(3):38-44.
- [44] 高鑫, 李国文, 张列宇, 等. 生态修复对中国滨海滩涂土壤特性影响研究进展[J]. *林业科技通讯*, 2023(4):39-46. GAO X, LI G W, ZHANG L Y, et al. Research progress on effects of ecological restoration on soil properties of coastal tidal flats in China[J]. *Forest Science and Technology*, 2023(4):39-46.
- [45] 李晓光. 关于环境保护与农业可持续发展的研究[J]. *现代农业研究*, 2023, 29(11):144-146. LI X G. Research on environmental protection and sustainable agricultural development[J]. *Modern Agriculture Research*, 2023, 29(11):144-146.
- [46] GENUS A, ISKANDAROVA M, BROWN C W. Institutional entrepreneurship and permaculture: a practice theory perspective[J]. *Business Strategy and the Environment*, 2021, 30:1454-1467.
- [47] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4):1389-1402. FAN Z L, CHAI Q, CAO W D, et al. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4):1389-1402.
- [48] 王小彬, 王燕, 代快, 等. 旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡[J]. *生态学报*, 2011, 31(16):4638-4652. WANG X B, WANG Y, DAI K, et al. Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16):4638-4652.
- [49] HUANG C M, YUAN C S, YANG W B, et al. Temporal variations of greenhouse gas emissions and carbon sequestration and stock from a tidal constructed mangrove wetland[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149:110568.
- [50] TANG J, LI J, WANG H, et al. *In-situ* monitoring and analysis of the pitting corrosion of carbon steel by acoustic emission[J]. *Applied Science*, 2019, 9:706.
- [51] 胡乐宁, 苏以荣, 何寻阳. 西南喀斯特地区典型土壤碳通量原位监测的研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(3):109-113. HU L N, SU Y R, HE X Y. *In situ* monitoring of soil carbon fluxes for different typical soils in karst region of southwest China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(3):109-113.
- [52] 刘海江, 时连强. 海岸带实时实地视频观测 ARGUS 技术[J]. *海洋工程*, 2016, 34(2):80-87. LIU H J, SHI L Q. Nearshore real-time *in-situ* video monitoring technique: the ARGUS system[J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(2):80-87.
- [53] QU F F, LU Z, ZHANG Q, et al. Mapping ground deformation over Houston-Galveston, Texas using multi-temporal InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169:290-306.
- [54] ZHOU Z, KONG J, ZHANG F, et al. Study on the carbon and nitrogen isotope characteristics and sources and their influence on carbon sinks in karst reservoirs[J]. *Land*, 2023, 12:429.
- [55] 刘文景, 孙会国, 李源川, 等. 怒江水化学与碳同位素组成对青藏高原岩石风化碳汇效应的指示[J]. *中国科学:地球科学*, 2023, 53(12):2992-3009. LIU W J, SUN H G, LI Y C, et al. Hydrochemistry and carbon isotope characteristics of Nujiang River water: implications for CO₂ budgets of rock weathering in the Tibetan Plateau[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2023, 53(12):2992-3009.
- [56] 张月明, 何迁, 张乾柱, 等. 不同降水条件下岩溶碳汇效应的同位素监测[J]. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(4):82-89. ZHANG Y M, HE Q, ZHANG Q Z, et al. Isotope monitoring of karst springs carbon sink under different precipitation conditions[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2022, 7(4):82-89.
- [57] GU Y X, LYU S, WANG L F, et al. Assessing the carbon sink capacity of coastal mariculture shellfish resources in China from 1981-2020[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022:9.
- [58] 鲍丽然, 李瑜, 张风雷, 等. 重庆市表层土壤有机碳空间分布、影响因素及对碳减排的贡献[J/OL]. *中国地质*, 1-17[2023-12-11] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230731.004.html>. BAO L R, LI Y, ZHANG F L, et al. Spatial distribution, influencing factors and contribution to carbon emission reduction of topsoil organic carbon in Chongqing, China[J/OL]. *Geology in China*, 1-17[2023-12-11] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230731.004.html>.
- [59] LU L C, CHIU S Y, CHIU Y H, et al. Energy performance of European countries by considering the role of forest[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(29):44162-44174.
- [60] 陈月华, 廖建华, 覃事妮. 长沙地区 19 种园林植物光合特性及固碳释氧测定[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(10):116-120. CHEN Y H, LIAO J H, QING S N. Studies on photosynthetic characteristics and carbon fixation and oxygen release capabilities of 19 garden plants in Changsha area[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(10):116-120.
- [61] CLAASSENS N, SOUSA D, DOS SANTOS V, et al. Harnessing the power of microbial autotrophy[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2016, 14:692-706.
- [62] PARK S, PARK B R, JEONG D, et al. Functional expression of RuBisCO reduces CO₂ emission during fermentation by engineered *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Process Biochemistry*, 2023, 134(1):286-293.
- [63] 杨健钊, 朱新广. 面向碳达峰与碳中和的植物合成生物学[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5):847-869. YANG J Z, ZHU X G. Plant synthetic biology for carbon peak and carbon neutrality[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5):847-869.
- [64] JOSE A G, LUCIA G, BEATRIZ R, et al. Combined phytoremediation of metal-working fluids with maize plants inoculated with different microorganisms and toxicity assessment of the phytoremediated waste[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(11):2654-2661.
- [65] 邓蕾, 刘玉林, 李继伟, 等. 植被恢复的土壤固碳效应:动态与驱动机制[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2):1-10. DENG L, LIU Y L, LI J W, et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration: dynamics and its driving mechanisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):1-10.

(责任编辑:李丹)