

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2024.04.003

运城盐湖生物多样性研究:过去、挑战与未来

张宇¹, 张婕², 郭东罡^{1,3*}

1. 山西大学 环境与资源学院, 山西 太原 030006

2. 山西大学 生命科学学院, 山西 太原 030006

3. 山西大学 环境与资源学院 山西黄河实验室, 山西 太原 030006

摘要: 运城盐湖由于其特殊的地理环境条件, 生境异质性高, 生物多样性资源丰富。“退盐还湖”政策的实施, 使其成为我国同等体量盐湖中唯一退出工业生产的存在, 同时对该地区生物多样性保护与研究带来了新的挑战和发展机遇。本文梳理了运城盐湖生物多样性研究的简要发展过程, 并基于微生物、浮游植物、浮游动物、底栖动物和鱼类、维管束植物和鸟类等方面对其过去生物多样性研究成果进行了综述, 并系统地整理了其多样性研究的最新进展, 并对该地区生物多样性面临的挑战包括盐湖生态系统评价指标体系与标准建立、盐湖生物多样性维持与脆弱生境之间的关系等和未来研究的重点领域进行了探讨。为该地区今后加强生态环境保护管理, 指导生物多样性保护实践提供一定的方向。

关键词: 盐湖; 生态系统; 生物多样性; 保护对策

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 2097-1486(2024)04-0333-12

Research on biodiversity in Yuncheng salt lake: the past, the challenges, and the future

ZHANG Yu¹, ZHANG Jie², GUO Donggang^{1,3*}

1. School of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

3. Shanxi Laboratory for Yellow River, School of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Due to its special geographical environment, Yuncheng salt lake has high heterogeneity of habitats and rich biodiversity of resources. The implementation of “returning salt to lake” policy has made it the only salt lake of the same volume in China that has withdrawn from industrial production, and has also brought new challenges and developmental opportunities for the conservation and study of biodiversity in the region. This paper briefly reviews the development process of biodiversity research in Yuncheng salt lake, and summarizes the past research achievements on biodiversity in terms of microorganisms, phytoplankton, zooplankton, benthic animals and fish, vascular plants and birds. It systematically sorts out the latest progress in diversity research, and discusses the challenges of biodiversity in this area, including the establishment of evaluation index systems and standards for salt lake ecosystems, the relationship between the maintenance of salt lake biodiversity and fragile habitats, and key areas for future research, etc. It provides guidance to this region for strengthening ecological and environmental protection management and guiding biodiversity conservation practices in the future.

Key words: salt lake; ecosystem; biodiversity; conservation measures

*通信作者

基金项目: 运城盐湖生态环境本底调查与研究(01140123015001)

收稿日期: 2024-10-13; 修回日期: 2024-11-10

生物多样性是人类赖以生存的物质基础,生物多样性的丧失现已成为备受关注的全球问题。盐湖还是一种非常特殊的湿地生态系统类型,由于其特殊的地理环境条件,不仅蕴藏着丰富的矿产资源,还生存着众多依赖盐水特有的藻类和菌类等嗜盐生物。运城盐湖地处中条山北麓,总面积 132 km²,为华北地区最大的内陆咸水湖。其形成于新生纪第四代,有着四千年多年的开采历史,是“古中国”人类繁衍生息的重要历史文脉,是我国黄河中游冬季候鸟的主要越冬栖息地和生物物种的避难所,是黄河中游鸟类多样性最为丰富的区域之一。独特的生态服务功能和丰富的生物多样性使其成为黄河中游生态安全格局的重要组成部分,在生物多样性保持、气候调节、储碳固碳、净化环境等方面发挥重要作用。

随着 2020 年“退盐还湖”政策的实施,盐湖的工业生产完全停止,盐湖向生态保护、风貌重塑、产业转型、全域旅游的“绿色发展”转变。这一转变也对运城盐湖生态修复和生物多样性保护提出了更高的要求。

1 运城盐湖——独特的生态系统

1.1 特殊的地理区位

盐湖是一种特殊的地理环境条件下形成的生态

系统和资源系统,同时受到气候变化及人类活动的影响。我国西北内陆干旱含盐盆地水资源普遍缺乏,水资源是盐湖资源开发的主要环境约束和重要生产要素。由于特殊地理位置和干旱气候的影响,区内植被稀疏,覆盖度低,土壤风蚀、盐渍化严重,为典型的生态脆弱区。盐湖作为盆地汇水中心,区域内水资源不仅是支撑当地经济社会发展的战略性经济资源,更是处于干旱区的生态环境良性维持的重要物质基础。

运城盐湖位于中国山西省运城市盐湖区,地处东经 110°05′00″~110°07′30″,北纬 34°54′00″~35°04′00″之间(见图 1)。地处秦晋豫黄河转弯处,运城盐湖的气候类型为温带大陆性季风气候,降雨量集中在 7、8、9 月,年平均降雨量 559.3 mm,年平均日照时数为 2 247.4 h,年平均气温大约在 13.6℃。通常,盐湖的形成离不开干旱至半干旱的气候、合适的低洼地形以及持续的水盐补给三个基本要素^[1]。在中国,现代盐湖大多集中在年降水量少于 500 mm 的地区,这样的环境有利于蒸发量超过降水量,促进矿物质积累形成盐湖。然而运城盐湖位于一个相对湿润的气候带中,这里的年平均降雨量达到了 559.3 mm,远高于一般认为适合盐湖发育的标准。

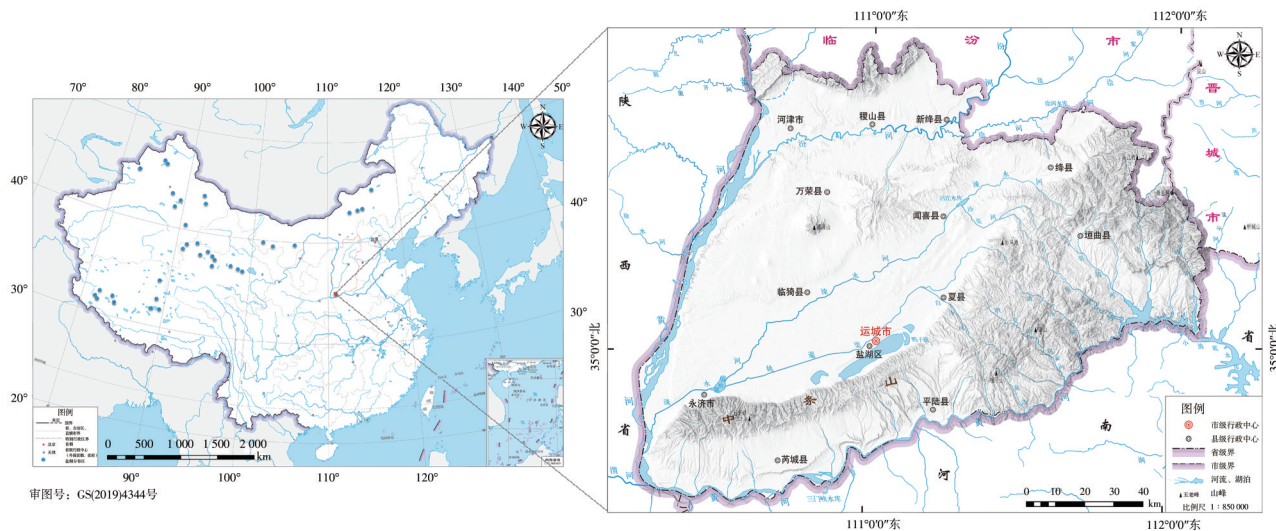


图 1 运城盐湖区位图

Figure 1 Map of Yuncheng Salt Lake District

运城盐湖位于暖温带落叶阔叶林地带的南暖温带落叶阔叶林亚地带,具体处于“临汾运城盆地,以棉麦种植为主的一年两熟栽培植被区”与“中条山山地,栓皮栎、蒙古栎、华北松、油松林及次生灌丛区”的交界地带。运城盐湖周边分布着由耐盐植物构成

的盐生草甸,其中主要的植物种类包括盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、二色补血草(*Limonium bicolor*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)等。由于地势低洼和排水不畅,这里还生长着芦苇(*Phragmites australis*)和香蒲(*Typha orientalis*)等植物^[2]。

在运城盐湖内主要分布着盐土和沼泽土。盐土面积为570 hm²,多见于凹地及盐池边缘,土层含盐量高;沼泽土分布在盐湖边缘低凹地的鸭子池、北门滩一带,面积为495.25 hm²。盐湖湿地土壤的pH值为8.1~9.5,整体表现为碱性及强碱性。土壤盐渍化分级以中、重度为主,土壤颗粒组成以砂质土壤为主。

运城盐湖的主要水源补给方式有两种:一是通过地表水,特别是黄河水,每年向盐湖输送大量盐分;二是通过地下水,勘察结果显示,地下水是盐湖水分和盐分的重要来源。中条山作为盐湖水资源和矿物质的重要补给源,每年通过地表水和地下水向盐湖进行动态补给。经过洪积、湖积淤积作用以及自然蒸发和盐类沉淀作用,运城盐湖富含钾盐、石灰石、镁盐、硫酸盐以及食盐等多种矿物质。

生存在运城盐湖的高盐生境下的生物必须适应高盐度、高光照和低氧等极端条件,这对生物的适应性和进化具有重要的促进作用。在水分蒸发、地下水潜水和人类活动的综合作用下,盐湖的生物多样性表现出明显的区域性分布特征。

1.2 特殊的复合生态系统

运城盐湖不仅包括水体生态系统,还包括周边的湿地、沼泽、盐生植物群落等生态系统。这些生态系统相互作用,形成了一个复杂的复合生态系统结构(见图2)。水域生态系统是运城盐湖复合生态系统的主体,其面积广阔,水质丰富。湖泊湿地的组成主要包括水体、水生植物和水生动物。水体主要由盐湖水体构成,其中含有丰富的盐类物质。水生植物主要有芦苇,它们能够吸收水中的营养物质,起到净化水质的作用。水生动物包括鱼类、虾类等,它们是湖泊湿地的重要组成部分,对维持湖泊生态平衡起着重要作用。这些生物种类繁多,形成了一个复杂的食物链和食物网。同时,运城盐湖湿地生态系统的盐分含量较高。这里的湖水中含有大量的钠、镁、钙等矿物质,使得水质呈现出独特的咸味。这种高盐分的环境对于一些特殊的生物种群具有很大的吸引力,如卤虫(*Artemia sinica*)、杜氏盐藻(*Dunaliella salina*)。这些生物在高盐分的环境中繁衍生息,为湿地生态系统增添了独特的生态价值。

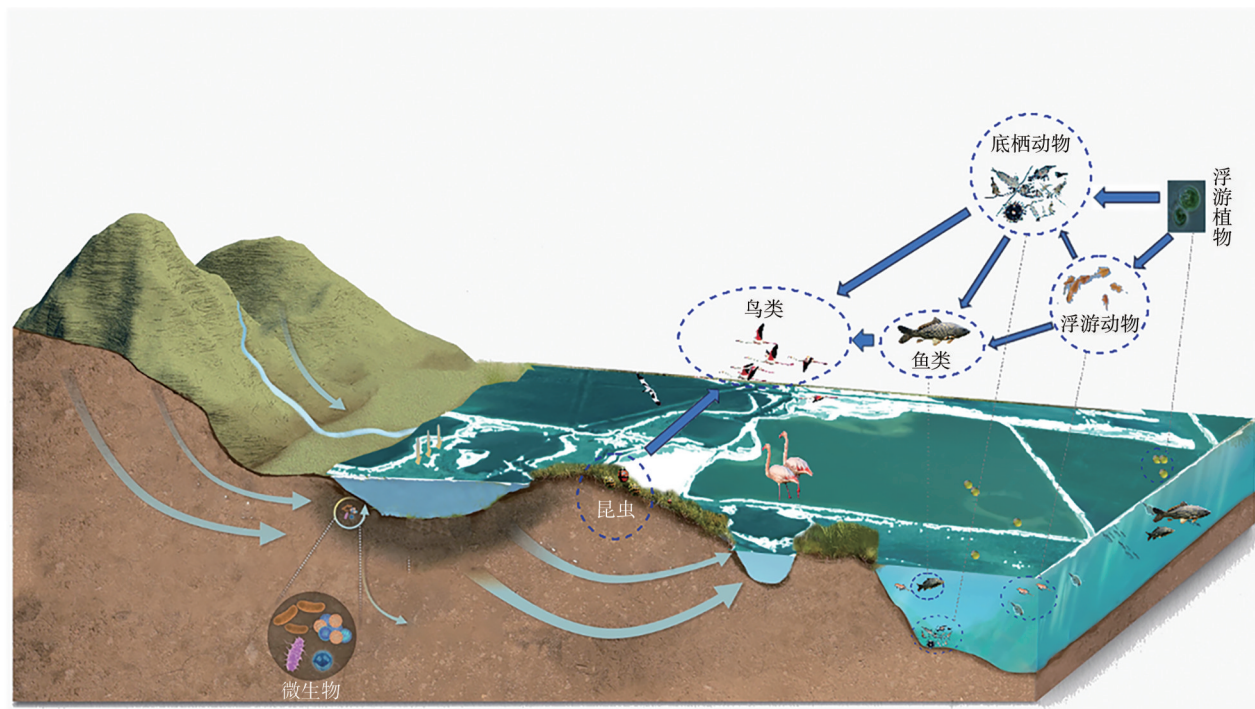


图2 运城盐湖:特殊复合生态系统

Figure 2 Yuncheng Salt Lake: A Unique Complex Ecosystem

运城盐湖是多种生物的栖息地,包括藻类、细菌、真菌、昆虫、鸟类等。这些生物在盐湖的高盐度环境中形成了独特的适应机制和生态关系。运城盐

湖在调节区域气候、维持生物多样性、提供生态服务等方面发挥着重要作用。例如,盐湖的水体和湿地生态系统有助于调节区域的水分循环和气候条件。

运城盐湖历史上曾是重要的盐业生产基地,人们通过修建盐田、晒盐池等设施进行盐业生产,人类活动对其生态环境产生了显著影响。

运城盐湖是一个特殊的复合生态系统,其独特的地理环境、高盐度环境、复合生态系统结构、丰富的生物多样性、重要的生态功能以及人类活动的影响共同构成了其特殊性。

1.3 生产盐湖转向生态盐湖

黄河流域被誉为中华民族的摇篮,位于黄河中游的河东地区(即山西省西南部)更是这一文明起源的核心地带。运城盐湖便坐落在这片古老的土地上,其悠久的历史 and 深厚的盐文化底蕴构成了河东文化宝库中的一颗璀璨明珠。运城盐湖有着4600年食盐开采史,大致可以分为以下几个时期^[3]。

在先秦时期,盐池的记载最早可追溯至黄帝、炎帝和蚩尤的时代。当时,人们利用太阳蒸发的方式制盐,并通过集体劳作来采集盐分。相关史料如《左传》等有记载显示,在西周时期已有河东盐业开采记录,此时的河东盐主要作为重要物资被进献或被用于祭祀。其次是秦朝至元代,河东盐业经历了从官营制度到开放生产再到官营制度。唐朝时期,原始制盐方法被人工制盐畦浇晒法取代,产盐量得以大幅提升。元代建立了运盐专城——运城。最后是明朝至现代,明代河东盐生产方式基本以捞采与畦地相结合并以捞采为主的制盐法。民国时期为社会动荡时期,各方势力争夺河东盐业的控制权,河东盐业一度得以恢复。自新中国成立后,河东地区的盐化产业以南风化工集团为代表,在20世纪80年代停止了食盐的生产。从那时起,该地区的盐湖开始逐步减少食用盐的产量,转而专注于芒硝、无水硫酸钠等化工产品的开发。

到2020年9月,运城正式启动“退盐还湖”“还湖于民”,盐湖保护范围内停止一切工业生产,因地制宜推动产业转型升级。2023年5月,习近平总书记来到盐湖并指出“盐湖的生态价值和功能越来越重要,要统筹做好保护利用工作,让盐湖独特的人文历史资源和生态资源一代代传承下去,逐步恢复其生态功能,更好保护其历史文化价值”^[4]。

2 运城盐湖生物多样性研究成果

根据盐湖研究侧重点时间序列分析,运城盐湖生物多样性研究分为3个阶段,分别是物种普查阶段、深入研究阶段与生态恢复研究阶段。(1)物种普查阶段(20世纪80年代至90年代)。部分学者开始

了对盐湖生物多样性的基础调查研究,研究多集中于对盐湖各个水域水生生物的标本采集与鉴定。(2)深入研究阶段(20世纪90年代至2020年)。运城盐湖生物多样性研究逐渐起步,随着技术手段与研究方法的不断进步,诸多学者对运城盐湖各生物类群的生物学特性与适盐机制进行了深入研究。(3)生态恢复研究阶段(2020年至今)。2020年9月,运城市全面停止了盐湖范围内的工业生产活动,转向生态保护、风貌重塑、产业转型和全域旅游的“绿色发展”模式,实施了“退盐还湖”政策。盐湖逐渐恢复其自然状态。这一转变使得对盐湖生物多样性的研究进入了一个全新的阶段,充满了未知和新发现的机遇,研究的侧重点由往昔聚焦物种资源开发利用,过渡为重视生态系统功能与生物多样性保护。运城盐湖的生物多样性研究工作也因此迈入了一个新的时期。

2.1 微生物

盐湖的高盐度环境对微生物的生长产生显著影响,这些微生物不仅能够适应极端的高盐条件,而且往往还具备耐寒、耐热、抗辐射以及耐受有机溶剂等特性,构成了在特殊环境下形成的独特生物资源,具有巨大的开发价值和广泛的应用前景。

自20世纪80年代起,运城盐湖微生物成为学术界关注的重点,30多年来该领域的成就斐然。在研究的旅程中,科学家们不断发掘新的生物种类。他们深入探索并分析盐湖中的微生物多样性及其对环境变迁的适应性,从而揭示了特定环境下的微生物群落特性及其在群落中的分布。此外,他们还揭示了诸如重金属含量、pH值、盐度等环境因素对微生物群落结构和功能的影响,也深入探讨了微生物如何适应这种极端的生存环境。

2.1.1 微生物多样性

迄今为止,发现运城盐湖湖水中的细菌共有15门27纲77目128科175属^[5];发现运城盐湖土壤微生物中细菌共有52门165纲410目719科1526属;真菌共16门52纲125目270科625属^[6]。其中陆续发现诸多新种,如杨依凡等(2012)发现嗜盐古菌YC71与YC88,并将其初步命名为*Halorubrum sp.* YC71与*Halo arcula sp.* YC88^[7];QIU XX等(2012)发现嗜盐古细菌菌株YC87T和YCA11,其代表了*Halorubrum*属的一个新种,其名称为*Halorubrum sp. nov.*^[8];ZHANG WJ等(2013)发现嗜古细菌菌株YC21T和YC77,其代表了*Halobellus*属的一个新种,其名称为*Halobellus rarus sp. nov.*^[9];王菲等

(2014)发现一株细菌 K1-L, 确定该菌株 K1-L 为弧菌属 (*Vibrio*)^[10]; YUAN PP 等 (2015) 发现嗜盐古细菌菌株 YC93T, 其代表了 *Haloarchaeobius* 属的一个新物种, 其名称为 *Haloarchaeobius salinus* sp. nov.^[11]; 黄建蓉 (2017) 发现 2 个新物种 (*Halomonas halodurans* sp. nov. 和 *Paracoccus halotolerans* sp. nov.)^[12]; 郭浩然等 (2024) 发现运城盐湖首个新属级物种, 将其命名为“*Yunchengibacter salinarum* YC-2023-2T”^[13]。

2.1.2 主要研究方向与成果

运城盐湖微生物多样性研究主要分两大方向: 微生物多样性及群落结构分析、微生物群落与环境因子的相关性分析。

部分学者致力于构建盐湖宏基因组文库^[14-15], 部分学者通过采集和分析运城盐湖不同区域的土壤样本, 并结合分子生物学技术如高通量测序, 研究者们对该地区的微生物群落结构进行了详细描述与分析。研究评估了盐湖各区域细菌、真菌和放线菌的多样性, 发现微生物群落具有丰富的物种组成和复杂的结构多样性^[16-19]。具体来说, 通过 Alpha 多样性指数反映了样品内物种的多样性^[20], 而 Beta 多样性分析则探讨了样本间的微生物群落结构差异。通过对优势功能基因的丰度进行分析, 研究发现特定功能基因在各地区的相对丰度存在差异, 暗示这些基因的分布与盐湖的环境条件密切相关。结果表明, 细菌群落在多样性和丰富度上均大于真菌群落, 特别是在湖心区域, 细菌群落的丰富度和真菌群落的多样性相对较低^[21]。从盐湖水体中分离出一种碱性条件下活性强的嗜盐病毒 CJL-7^[22], 识别出 175 属细菌, 这表明盐湖蕴藏着丰富的嗜盐细菌资源, 这些细菌作为宿主增加了盐病毒多样性的可能性, 但目前研究显示大部分病毒及其宿主仍然未知^[23]。

通过对多样性分析的结果进行评估, 可以推断出微生物群落的构成受到环境条件的显著影响。通过 CCA 分析发现, 土壤温度、全盐量和有效磷等理化因子对微生物群落结构的影响较为显著^[24]。此外, pH 值以及砷、镉、锌、铅、铬、铜、镍和汞等重金属也在微生物群落构成中扮演关键角色^[6]。研究还发现了特定微生物对特定环境因子的响应, 例如在重金属含量较高的区域, 一些特定的微生物群如变形菌门 (*Proteobacteria*) 与重金属呈负相关。重金属的存在改变了微生物的理想生存环境, 从而改变了某些优势微生物群的比例, 并可能促进了其他更具适应性微生物群的扩张。此外, 通过对土壤微生物

功能的预测分析, 研究还揭示了盐湖微生物在能量流动和物质循环中可能扮演的角色。

运城盐湖的微生物多样性研究不仅丰富了对微生物多样性的认识, 而且为盐湖的环境保护和资源的合理开发提供了新的视角。

2.2 浮游植物

藻类作为地球上最早的生命形式之一, 在全球碳循环、氮循环和硫循环中扮演着不可忽视的角色, 而在盐湖这种极端环境中, 藻类的分布与生理特性更显得独特而珍贵。通过对运城盐湖不同水体中的藻类进行系统的采样和分析, 深入探讨了运城盐湖藻类植物的种类多样性、群落结构、生态效应及其对环境变化的响应机制。

2.2.1 浮游植物多样性

从 1987 年首次对盐湖浮游藻类进行初步调查到 2019 年《运城盐池湖区的藻类植物》专著的出版, 对藻类的理解和分类已经取得了显著进展。最初调查发现了盐湖中的 4 门 9 种藻类^[28]。至 2024 年底, 已经识别出盐湖藻类共 8 门 59 科 148 属 473 种 (包括变种)^[29]。

在漫长的鉴定调查过程中, 众多研究者揭示了包括凌元洁等 (1991) 发现了运城轮藻 (*Chara yunchengensis*) 与拟灰色轮藻 (*C. pseudocanescens*)^[30]; 谢淑琦等 (1994) 发现了运城菱形藻 (*Nitzschia yunchengensis*)^[31]; 谢树莲等 (1999) 发现了喜盐变胞藻 (*Astasia halophilus*)、结实囊裸藻瘤状变种 (*Trachelomonas felix* var. *tubercularis*) 与密刺班裸藻无领变种 (*Trachelomonas sydneyensis* var. *acollum*)^[32]; LÜ HR 等 (2017) 发现了盐泽聚球藻 (*Synechococcus salsa*) 在内的多个新种^[33], 以及 26 个新纪录种^[34-35]。

2.2.2 主要研究方向与成果

自 1987 年起, 众多研究人员已对该地的藻类进行了 12 轮深入调查, 旨在梳理出其种类、群落结构和分布特性等关键信息^[36-45]。借助形态学和分子生物学手段, 鉴定出了包括运城轮藻在内的多种藻类。这些藻类在盐湖的淡水、混盐、真盐和高盐各类水体环境中, 呈现了繁多的物种和错综复杂的种间关系。它们不仅构成了局部食物链的主要生产基础, 也是次级生产者的取食源, 更是维持盐湖生物地球化学循环的关键环节。

运城盐湖的藻类组成呈绿藻门-火藻门-芽孢菌门型结构, 绿藻门在所有盐度水域中都显示出绝对优势^[46]。这些藻类的种类繁多, 适应性强, 不仅涵盖了浮游生活方式的种类, 还包括了附着生长的种

类。例如,杜氏盐藻能在盐湖高盐环境中生长,其体内富含 β -胡萝卜素等有用成分,因此在医药、食品等行业应用广泛。藻类分布受盐湖的物理化学条件如盐度、pH值、光照强度等因素影响,这些因素共同作用下塑造了特有的藻类群落结构^[47-49]。

在高盐度水体环境中生存的藻类通常表现出良好的适应能力,如能耐受高盐环境的杜氏盐藻在盐湖中广泛分布。相比之下,低盐度水体中的藻类多为喜盐和随遇类型,其分布受水体矿化度、pH值等环境因素影响。藻类在盐湖中的多样性不仅体现在数量上,也反映了其对特定环境的适应性。例如,适应高盐环境的半丰满鞘丝藻(*Lyngbya major*)和螺旋藻(*Spirulina major*)在高矿化度区域中占据优势,而在有机质丰富的水体中,则多呈现出较高的种类和数量优势。

运城盐湖藻类植物的研究不仅提升了对该地区浮游植物生物多样性的理解,而且对于理解和调控盐湖的生态系统服务具有重要的科学意义。

2.3 浮游动物

盐湖作为一个独特的生态系统,拥有丰富的生物资源,其中卤虫是该地区的一个显著特征。卤虫作为一种重要的浮游生物,对于维持盐湖生态系统的健康和平衡起着至关重要的作用。

2.3.1 浮游动物多样性

至今发现硝池共有浮游动物62种,其中原生动物16种,轮虫31种,鳃足类7种,桡足类8种,浮游动物生物量均值0.07~20.1 mg/L^[37];北门滩共有64种浮游动物,其中原生动物20种,轮虫30种,鳃足类6种,桡足类8种,浮游动物生物量均值0.89~18.52 mg/L^[38];盐池共有47种浮游动物,其中原生动物12种,轮虫22种,足类6种,桡足类7种^[39]。

2.3.2 主要研究方向与成果

在浮游动物的研究中,卤虫成为学者们关注的焦点。通过采集盐湖不同水域的水样,对浮游动物的种类进行了全面的野外调查。在现场调查的基础上,利用显微镜和其他形态学方法对捕获的浮游动物进行了详细的分类学鉴定^[50-53]。此外,通过使用分子生物学的方法,如PCR和测序,对部分物种进行了分子水平的鉴定,增加了研究的精确性。

在数据分析方面,部分学者使用了统计软件进行数据的统计分析,通过主成分分析(PCA)和聚类分析(CA)来揭示不同浮游动物种群间的关系和差异。为了更好地理解这些浮游动物在盐湖生态系统中的作用,对其种群动态进行了研究,并分析了其生

态位。这些包括了对卤虫的食性、生长速率、繁殖能力和生存率的综合研究,旨在揭示它们在盐湖食物网中的角色和提供的生态系统服务价值^[54-58]。

研究发现,在矿化度较低的内陆盐湖,卤虫卵胎生的比例大大增加。同时,卤虫对常用消毒剂的耐受力在发育早期随着时间逐渐减弱^[58]。另外,碳酸铵和氨水对中华卤虫产仔总数具有极显著影响。在此期间,学者们揭示了多个基因和蛋白质在卤虫胚胎发育及重启动过程中的关键作用,包括As-Kip2、LEA和DRRB、CDC23与CDH1、ATF4、RAD9、SKP1、EIF2 α K1与eIF2B等^[59-62]。这些发现不仅丰富了我们对于卤虫适应极端环境机制的理解,也为进一步探索其生物学特性提供了重要线索。

2.4 底栖动物与鱼类

关于运城盐湖底栖动物与鱼类的研究,由于研究时段已长达20多年,现有数据可能已不适应当前需要,该领域的研究工作仍有待深入。

已知的文献资料中仅有:1993年,在硝池发现的底栖动物与鱼类种类很少,底栖动物生物量平均6.6(<1~42.5) mg/m²,1990年做过调查,仅见到以二齿沼摇蚊幼虫(*Limnochironomus sp*)与亚洲瘦螳(*Ischnura asiatica*)。鱼类有鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫(*Carassius auratus*)、鲶(*Silurus asotus*)等十余种淡水鱼^[37]。1995年在北门滩发现的浮游动物仅见到颤蚓(*Tubifex tubifex*)等,此外还在浮游生物样中见到一种介形虫和一种线虫。底栖动物数量平均为17(5~29)个/m²。鱼类区系较简单,有鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、鲤、鲫、青鳉(*Oryzias latipes*)^[38]。1998年,在盐池调查发现共有5种底栖动物和1种鱼类,鱼类仅在低盐区发现有青鳉^[39]。

2.5 维管束植物

在运城盐湖及其周边地区,自然条件的极端性促使了植物种群的快速进化,形成了一系列适应盐碱环境的生理和形态特征。这些植物的生态位特点、种间竞争关系及种群动态是研究该地区植物多样性及其适应性的关键内容。

在这漫长的研究过程中,学者们深入研究了我国山西省运城盐湖地区维管束植物的多样性及其对盐碱环境的适应性。通过分析该地区的植物群落结构和特有植物种群的生态位特征,研究揭示了维管束植物种群的分布模式、数量动态、生态位特性以及其对环境的适应机制。

2.5.1 维管束植物多样性

根据调查统计结果,迄今为止山西运城盐湖湿地的植物共117种,隶属于34科93属,均为被子植物,其中双子叶植物34科76属100种;单子叶植物2科17属17种,其中发现国家二级重点保护野生植物——野大豆(*Glycine soja*)。

2.5.2 主要研究方向与成果

根据现有的研究文献,针对运城盐湖的高等植物多样性已经进行了三次较为全面的物种普查。1998年的全面调查覆盖了包括该盐湖在内的山西湿地植物^[63]。2003年的专项研究重点对运城盐湖的高等植物进行了探究,揭示出该地区的植物种类约有20余种,以藜科、菊科、禾本科和十字花科为主^[64]。2010年的再度研究发现了13科21属24种野生植物,主要包括双子叶植物,尤其是菊科和藜科以及主要的单子叶植物禾本科^[65]。

在探讨维管束植物多样性及其适应性的过程中,生态位的概念扮演着至关重要的角色。通过对该地区主要植物种群的生态位进行深入分析,可以揭示这些植物种群对环境资源的利用状况和种间关系,为盐碱地区生态环境的改善和开发利用提供理论依据^[66]。例如,研究发现虽然某些植物种群的生态位宽度较小,但它们可能表现出较高的生态位重叠,这反映了该地区资源的高度空间异质性和种群间的激烈竞争关系。

盐湖地区的植被覆盖度和组成受到土壤盐渍化的强烈影响,导致植物群落结构趋于简单化且种类单一,主要的植物种类以藜科、菊科、禾本科等为主。这些植物通常具有较强的耐盐性和适应性,能够在高盐、高碱、低土壤肥力的条件下生存和繁衍。通过对盐地碱蓬、盐角草(*Salicornia europaea*)等植物种群的特征进行研究,揭示了这些植物在高盐环境下的生存策略,包括它们的耐盐生理反应、特殊的耐盐机制以及这些性状的比较研究^[67-69]。某些物种可能在特定的土壤pH值、盐分含量或其他环境因素上有特殊的适应性,从而减少了与其他物种的直接竞争。

此外,一些物种在离湖不同距离的样地中表现出的生长差异性,进一步证实了环境因素对植物生长的影响^[70-71]。通过对这些植物体内的无机和有机溶质含量的比较研究,发现它们在遭遇盐胁迫时会积累防御性物质如脯氨酸、可溶性糖等,这有助于保护细胞结构和功能,减少盐分胁迫带来的伤害^[72-73]。同时,植物体内的一系列防御酶如超氧化物歧化酶

(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)的活性提高,有助于清除过量的活性氧,防止细胞受损^[74-75]。植物并非仅采取单一方式响应外界变化,而是展现出高度的可塑性,根据具体情境灵活调整自身状态以最佳方式存活下去。

此外,在药用植物资源研究方面,运城市盐湖区已经进行了两次调查。2019年,盐湖区野生药用植物235种,涉及73科194属^[76];调查发现耐盐及盐生药用植物主要集中在海拔300~500 m的盐碱地,大部分处于自生自灭状态,资源利用率低^[77]。

从2020年至2024年,最近一次对运城盐湖高等植物的普查是在“盐湖环境本底调查与研究项目”的支持下,于2023年由我们课题组完成。此次调查覆盖了盐湖的1930个网格样地,对植物种类、群落类型、景观格局及生境进行了全面系统的实地勘查。外来入侵植物的扩散加剧了区域生物多样性的丧失,对当地的生态环境构成了严重威胁。近年来,盐湖旅游业的飞速发展加快了外来入侵植物的传播。李沛蓉等^[78](2024)通过在运城盐湖开展为期半个月的植物野外实地考察,共调查385个1 m×1 m的草本植物样方,探讨了运城盐湖湿地入侵植物的数量及其生态学特征,发现该区域入侵植物共13科30属35种,以菊科和豆科为优势科,这对于盐湖生态管理和保护具有重要参考意义。

2.6 鸟类

运城盐湖作为重要的水禽栖息地,是各种鸟类迁徙的必经之地,其地理位置和特有的盐沼、水体环境为多种鸟类提供了重要的食物资源和适宜的生境。研究运城盐湖的鸟类多样性及其生态影响,不仅是生物多样性保护的需求,也是推进生态文明建设、实现可持续发展的重要课题。根据文献资料记载,目前尚无针对运城盐湖鸟类的独立研究,但该区域在2013年山西省运城湿地自然保护区成立时被纳入其中,并在保护区建设过程中进行了初步的鸟类调查。

随着生态学的发展,学者们对运城盐湖的鸟类多样性进行了多次调查和研究。这些研究主要集中在运城湿地自然保护区鸟类种群的种类、数量和分布上,旨在了解这些鸟类的分布特点及其在区域生态系统中的作用。通过野外调查、样本采集和数据分析,学者们对保护区的鸟类组成进行了全面记录和分类^[79-84]。迄今为止,保护区内共有鸟类205种,隶属于18目54科^[84]。随着“退盐还湖”政策的全面

实行以及公众关注度的提高,鸟类的照片不断涌现,尤其是鲍东升曾拍摄到运城盐湖迎来了火烈鸟(*Phoenicopteridae*)^[85]。2014年,运城盐湖首次发现2只火烈鸟。从2014年至2016年,根据摄影爱好者的跟踪拍摄,盐湖的火烈鸟数量增加到8只。2019年至2021年期间,盐湖的火烈鸟数量保持在6只。运城盐湖的火烈鸟在不同年份出现过2只、8只、6只和3只等数量变化。每年它们均在4月下旬离开盐湖,次年10月下旬又返回越冬栖息,停留约半年时间。

3 运城盐湖生物多样性面临的挑战

3.1 盐湖生态系统评价指标体系与标准建立

在过往研究中,有部分学者通过对运城盐湖湿地城市边缘带植物景观的研究,揭示了植物景观的现状,并发现了存在的问题,提出了优化改善的方向和对策^[86];选取了运城盐湖湿地公园及周边4个景观单元,每个单元选取2块样地进行景观评价研究,进一步细化了对植物景观的评价^[87]。尽管研究者们已经开始对运城盐湖的景观进行评价,但是在2020年运城盐湖实施了“退盐还湖”政策之后,尚未建立起一个全面且科学的生态系统评价指标体系 and 标准。

考虑到盐湖生态系统的独特性和复杂性,其健康状况的判断需要依靠一个全面而科学的评价指标体系。确立合理的评价标准,尤其是定量标准的制定,需要大量的科学研究和实地数据支持,而这些数据的获取和分析往往受限于当前的技术和资源条件。此外,评价指标和标准的一致性和可比性也是一大挑战,因为这需要跨学科的知识整合和多方利益相关者的协调。同时,由于盐湖生态系统受到人类活动的强烈影响,如何将社会经济因素有效地融入评价指标体系,以反映人类活动对生物多样性的影响,也是建立评价体系时需要考虑的问题。最后,随着生态环境的变化,评价指标体系与标准也需要不断更新和完善,以适应动态的生态系统变化,这要求有一个持续监测和评估机制,以及相应的管理和政策支持。这些挑战使得运城盐湖生物多样性的维持和保护工作变得更加复杂和紧迫。

3.2 盐湖生物多样性维持与脆弱生境之间的关系

盐湖的水盐平衡是盐湖生物多样性得以维持的关键因素,这一平衡不仅直接影响着盐湖的盐度、水位,还间接影响着营养物质的循环、生物的生态位、适应性以及对干扰的抵抗和恢复能力。此外,它还关系到生态系统服务的提供,进而对生物多样性产

生深远的影响。

首先,不同生物种群对盐度的适应能力存在差异。盐度的变化直接关系到盐湖中生物种群的生存和繁衍能力。例如,一些适应于高盐环境的生物,如卤虫,可能会因为盐度的降低而面临生存威胁,进而影响生物多样性。此外,水盐平衡的变化还会影响盐湖中营养物质的循环和可用性,这对于生物种群的生长和繁衍至关重要。然而,目前对运城盐湖的研究还不够深入和全面。许多研究主要集中在单个生物种群如何适应盐环境的机制上,而对于盐湖中的一些重要生物类群,如底栖动物、鱼类、鸟类和古菌等,研究还存在较大的空缺。这些研究空白领域表明,我们对于盐湖生态系统的整体性和复杂性的理解和把握还不够系统和深入。

盐湖生物多样性的维持还依赖于物种对盐度变化的适应性。盐湖生境的脆弱性使得适应性差的物种更容易受到威胁,导致生物多样性下降。因此,保护盐湖生物多样性,维护盐湖脆弱生境的稳定性,需要加强环境监测、科学规划、合理开发和严格管理,以实现人与自然和谐共生。

3.3 生态恢复工程对盐湖生物多样性的影响

自2020年实施“退盐还湖”政策以来,运城市在盐湖实施了多项生态恢复措施,包括限制或终止周边盐业活动,加固和修复湖岸堤坝,以及在湖区周边和岛屿上种植耐盐植被。然而,这些恢复措施对盐湖生物多样性的具体影响仍有待进一步明确。例如,新种植的植物是否会对原有本土植物构成竞争,以及是否可能导致外来物种入侵,都是需要关注的问题。此外,生态修复施工期间可能会对施工区域内的动植物造成一定的短期影响和不便。此外,生态恢复工程的实施需要大量的人力和物力投入,如何平衡恢复成本与生物多样性保护也是一个重要的挑战。

因此,在运城盐湖生物多样性的维持过程中,需要充分考虑生态恢复工程对生物多样性的影响,采取科学合理的措施,以实现生态恢复与生物多样性保护的双赢。

3.4 盐湖生物多样性对文旅开发的承载力

2020年,运城正式启动“退盐还湖”“还湖于民”,盐湖保护范围内停止一切工业生产。近几年,运城市依托其独特的盐湖资源,已经成功地将盐湖打造成了一个集旅游观光、休闲娱乐和文化体验于一体的综合性旅游目的地。作为核心景区,运城盐湖提供了多种旅游体验,包括观光盐湖景观、体验盐

疗、参与特色文化活动等。在盐湖周边建设了完善的旅游基础设施,包括道路、酒店、餐饮和娱乐设施。

随着游客数量的上升,各种旅游活动导致的旅游垃圾、植被践踏、交通量增加和噪声等均对盐湖生物多样性构成了潜在威胁。游船等活动可能对湖中生物造成干扰,影响它们的生存环境。尽管文旅开发的迅猛发展吸引了众多游客,但是盐湖是否能够持续承受这样的人流压力,以及当地的管理能力是否能够与之相匹配,这些问题都值得我们深入思考。因此,文旅开发必须考虑盐湖生态系统的承载能力,防止过度开发,确保旅游活动不对生物多样性造成负面影响。为此,应制定合理的游客承载量标准,并对敏感区域实施访问限制等措施。

4 讨论与展望

4.1 构建盐湖生物多样性长期固定监测体系

长期固定监测不仅能够提供生物多样性的时间序列数据,还能够揭示生物多样性变化的长期趋势和影响因素,有助于预测未来的生物多样性变化,为制定长期保护策略提供支持。需要建立一个多层次的监测网络,涵盖盐湖的水质、植被、底栖动物、鱼类、鸟类和微生物等多个生物和生态要素。设立固定的监测站点,配置专业的监测设备和技术人员,定期收集和记录数据;制定标准化的监测方法和指标,确保数据的准确性和可比性;采用遥感技术和地面调查相结合的方式,对盐湖的生态环境进行全面监测;建立生物多样性数据库,对长期积累的数据进行整理、分析和存储,以便于追踪生态变化趋势;邀请生态学家、生物学家、环境科学家等专家参与监测体系的设计和评估,确保监测体系的科学性和有效性。

总之,构建盐湖生物多样性长期固定监测是保护生物多样性的重要手段,通过建立完善的监测网络、采用多种监测方法、发展先进的监测技术以及定期发布监测报告等措施,共同推动生物多样性监测工作的深入开展。

4.2 推动盐湖生物多样性系统研究

系统思维在生物多样性研究中的作用体现在其对生态系统的全面、动态和综合的理解能力上。它主张研究者不应该将生态系统的各个组成部分视为孤立的实体,而应该将其视为一个相互关联、相互依赖的整体。

借助系统思维,研究者可以更深入地理解生物多样性的保护机制,预测环境变化对生态系统可能产生的影响,以及评估人类活动可能对生物多样性

产生的潜在影响。此外,系统思维还鼓励跨学科的合作,整合生物学、生态学、环境科学等多个领域的知识,形成一个更丰富和全面的研究视角,从而为生物多样性保护和可持续管理提供科学的依据和有效的策略。通过运用系统动力学模型和复杂性科学工具,我们可以从多个维度,如生态系统服务功能、物种互动网络、生态过程等,全面评估盐湖生物多样性的价值,实现“人与盐湖生命共同体”系统研究的目标。总之,从局部到全局的综合理解,可以为生态系统的保护和恢复提供更为精准和系统的解决方案。

4.3 优化盐湖生物多样性适应性管理

在运城盐湖生物多样性保护中,适应性管理策略至关重要,其核心是通过数据分析调整管理措施以适应环境变化和目標物种的需求。

适应性管理策略的实施依赖于对盐湖生态系统深入地理解,包括自然条件、生物多样性挑战和人类影响的认识。需建立全面监测系统,涵盖生物多样性、水质和生态系统服务功能,同时引入人工智能、高科技技术手段。基于科学分析,利用生态学、环境科学等方法评估数据,确保管理决策的科学有效。并且结合学者们的研究成果,综合考虑多方因素,例如目前已知的运城盐湖35种入侵植物需多加关注,加强管理,控制去除,在今后的生态修复过程中防范入侵,多植本土种。同时,考虑可持续性和生态系统服务,平衡生物多样性保护与人类经济、社会需求,在生物多样性保护管理与文旅开发中寻求平衡点。

综上所述,运城盐湖的生物多样性保护的适应性管理策略的发展,需要基于对盐湖生态系统的深入理解、建立有效的监测系统、科学的数据分析以及可持续的目标设定。通过这样的管理策略,确保运城盐湖的生物多样性得到有效保护和可持续利用。

参考文献:

- [1] 郑绵平. 中国盐湖资源与生态环境[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1613-1622. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2010.11.007.
- [2] 马子清. 山西植被[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [3] 王明云. 古代河东盐业发展脉络[J]. 中国盐业, 2022(24): 53-58. DOI: 10.19396/j.cnki.issn1004-9169.2022.24.002.
- [4] 运城市人民政府. 七彩盐湖辉映千年文明: 山西省运城市盐湖文化保护之路[N]. 运城日报, 2024-07-08(02).
- [5] 王传旭, 杨静, 王卓, 等. 运城盐湖细菌群落结构及生态多样性分析[J]. 微生物学报, 2024, 64(6): 1906-1921.

- DOI:10.13343/j.cnki.wsxb.20230636.
- [6] 李元,杨海鑫,喻其林,等. 运城盐湖湿地土壤微生物多样性及其对重金属的响应[J/OL]. 环境科学, [2024-10-29]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202405153>.
- [7] 杨依凡,王璐,王宇,等. 极端嗜盐古菌 YC71、YC8816S rDNA 序列克隆及系统发育学分析[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(07): 39-42. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2012.07.001.
- [8] QIU X X, ZHAO M L, HAN D, *et al.* Halorubrum ru-brum sp. nov., an extremely halophilic archaeon from a Chinese salt lake[J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2013, 104(5): 885-891. DOI:10.1007/s10482-013-0002-6.
- [9] ZHANG W J, HAN D, QIU X X. *et al.* Halobellus rarus sp. nov., a halophilic archaeon from an inland salt lake of China[J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2013, 104(3): 377-384. DOI:10.1007/s10482-013-9960-y.
- [10] 王菲,刘抗,范家同,等. 一株耐盐弧菌 *Vibrio* sp.K1-L 的分离与鉴定[J]. 生物技术通报, 2014, 30(04): 127-131. DOI:10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2014.04.028.
- [11] YUAN P P, YE W T, PAN J X, *et al.* Halorussus amylo-lyticus Sp. Nov., Isolated from an Inland Salt Lake[J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2015, 65(10): 3734-3738. DOI: 10.1099/ijsem.0.000487.
- [12] 黄建蓉. 运城盐湖嗜盐细菌多样性研究及产酶菌株筛选[D]. 新乡:河南师范大学, 2017.
- [13] GUO H R, WANG F, YU H Y, *et al.* *Yunchengi-bacter salinarum* gen. nov., sp. nov., a novel bacterium of the family *Kordiimonadaceae* isolated from sediment in Yuncheng salt lake[J]. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2025, 118(1): 1-10. DOI:10.1007/s10482-024-02011-6.
- [14] 李坤珺,龙健. 山西运城盐湖嗜盐细菌的系统发育与种群多样性[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(11): 95-101. DOI:10.3969/j.issn.1001-3601.2015.11.025.
- [15] 苗莉云,张鹏. 盐湖土壤微生物总 DNA 提取方法的比较[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(06): 1086-1090.
- [16] 刘德容,李晓虹. 山西运城盐湖放线菌区系研究[J]. 微生物学报, 1998, 38(2): 137-141. DOI:10.13343/j.cnki.wsxb.1998.02.011.
- [17] 鲍雪,蒋继志,林亚静,等. YH-1 菌株作为筛选抗真菌模型菌株的初步研究[J]. 安徽农学通报(上半月刊), 2011, 17(03): 35-36+53. DOI:10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2011.03.028.
- [18] 于慧瑛,曹建斌,高文庚,等. 耐盐细菌芽孢杆菌 L1 抗金黄色葡萄球菌活性及其功能基因筛选分析[J]. 中国抗生素杂志, 2015, 40(11): 808-812. DOI:10.13461/j.cnki.cja.005631.
- [19] 刘艳芳. 运城盐湖多功能中度嗜盐菌的分离筛选及发酵条件优化[D]. 太原:山西师范大学, 2016.
- [20] 桑进. 运城盐湖嗜盐细菌多样性分析及四株嗜盐新菌的多相分类[D]. 济南:山东大学, 2018.
- [21] ZENG F F, ZHU Y H, ZHANG D L, *et al.* Metagenomic analysis of the soil microbial composition and salt tolerance mechanism in Yuncheng Salt Lake, Shanxi Province [J]. *Front Microbiol*, 2022, 13: 1004556. DOI:10.3389/fmicb.2022.1004556.
- [22] 刘中华,于慧瑛,伍芳艺,等. 1 株盐湖嗜菌体 CJL-7 的分离及其生物学特性研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2021, 45(03): 241-245. DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2021.03.04.
- [23] 于慧瑛,王传旭,王卓,等. 运城盐湖嗜盐细菌嗜菌体的分离筛选及其生物学特性研究[J/OL]. 山西大学学报(自然科学版), [2024-11-01]. <https://doi.org/10.13451/j.sxu.ns.2024072>.
- [24] 郭浩然,王帆,田连祥,等. 山西运城盐湖土壤沉积物细菌多样性及影响因素分析[J]. 微生物学报, 2024, 64(06): 1891-1905. DOI:10.13343/j.cnki.wsxb.20230763.
- [25] HEIDELBERG K B, NELSON W C, HOLM J B, *et al.* Characterization of eukaryotic microbial diversity in hypersaline Lake Tyrrell, Australia[J]. *Front Microbiol*, 2014, 4(MAY): 115. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00115.
- [26] 王飞鹏,李超,李砧,等. 运城盐湖藻类植物资源研究进展[J]. 盐业与化工, 2014, 43(03): 5-7. DOI:10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2014.03.001.
- [27] 谢树莲,冯佳,高帆,等. 近十年运城盐湖藻类植物资源研究进展[J]. 新兴科学技术趋势, 2023, 2(04): 376-381. DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2023.04.005.
- [28] 常明昌. 运城盐池区域藻类植物初报[J]. 山西农业大学学报, 1987(02): 234-236. DOI:10.13842/j.cnki.issn1671-8151.1987.02.002.
- [29] 谢树莲,李砧,石瑛. 运城盐池湖区的藻类植物[M]. 北京:海洋出版社, 2019.
- [30] 凌元洁,谢树莲,邱丽甯. 山西轮藻属新植物[J]. 水生生物学报, 1991, 15(04): 350-355. DOI:10.3724/issn1000-3207-1991-4-350-v.
- [31] 谢淑琦,李婷. 山西省盐池硅藻一新种[J]. 植物分类学报, 1994, 32(03): 273-274+302.
- [32] 谢树莲,凌元洁,李砧. 裸藻植物新种和新记录[J]. 水生生物学报, 1999, 23(01): 90-92. DOI:10.3724/issn1000-3207-1999-1-90-k.
- [33] LÜ H R, WANG J, FENG J, *et al.* *Synechococcus sal-sus* sp. nov. (Cyanobacteria): a new unicellular, coccoid species from Yuncheng salt lake, North China[J]. *Bangladesh Journal of Plant Taxonomy*, 2017, 24(2): 137-147. DOI:10.3329/bjpt.v24i2.35109.

- [34] 凌元洁. 中国无隔藻属一新记录[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1990(04): 444-445. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).1990.04.019.
- [35] 谢淑琦, 辛晓云, 李婷. 运城盐池浮游硅藻的研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1993(03): 332-339. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).1993.03.019.
- [36] 王宏毅, 张志端, 高仁恒, 等. 山西运城盐湖浮游生物初步研究[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1988(S1): 28-40. DOI: 10.16207/j.cnki.1009-4490.1988.s1.004.
- [37] 何志辉, 秦克静, 王岩, 等. 晋南盐湖水域生物资源调查[J]. 大连水产学院学报, 1993(04): 1-15. DOI: 10.16535/j.cnki.dlhyxb.1993.04.001.
- [38] 何志辉, 秦克静, 王岩, 等. 晋南盐湖水域生物资源调查二、北门滩[J]. 大连水产学院学报, 1995(03): 1-11. DOI: 10.16535/j.cnki.dlhyxb.1995.03.001.
- [39] 赵文, 王岩, 秦克静, 等. 晋南盐湖水域生物资源调查三、盐池[J]. 大连水产学院学报, 1998(03): 11-12+14-16+18-20. DOI: 10.16535/j.cnki.dlhyxb.1998.03.011.
- [40] 李砧, 谢树莲. 山西运城盐池湖区藻类及分布[J]. 湖泊科学, 2006, 18(02): 189-192. DOI: 10.18307/2006.0214.
- [41] 谢树莲, 凌元洁, 李砧. 山西运城盐池湖区裸藻植物及其分布特点[J]. 水生生物学报, 1998, 22(01): 33-38. DOI: 10.3724/issn1000-3207-1998-1-33-2.
- [42] 谢树莲, 凌元洁, 李砧, 等. 山西运城盐池湖区浮游绿藻及其分布特点[J]. 湖泊科学, 2000, 12(02): 189-192. DOI: 10.18307/2000.0216.
- [43] 李砧, 谢树莲. 山西运城盐池湖区蓝藻种类组成及分布特点[J]. 西北植物学报, 2006, 26(02): 384-388. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.02.027.
- [44] 李砧, 谢树莲. 山西运城盐池湖区藻类及分布[J]. 湖泊科学, 2006, 18(02): 189-192. DOI: 10.18307/2006.0214.
- [45] 李超. 山西运城盐池湖区藻类群落结构的研究[D]. 太原: 山西大学, 2012.
- [46] YANG J, WANG C, WANG Z, *et al.* Distribution patterns and co-occurrence network of eukaryotic algae in different salinity waters of Yuncheng Salt Lake, China[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 1-11. DOI: 10.1038/s41598-024-58636-0.
- [47] 吕虹瑞, 王飞鹏, 李超, 等. 运城盐池湖区藻类植物组成及与盐度关系[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2016, 39(01): 140-145. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2016.01.024.
- [48] BOROWITZKA L J, BOROWITZKA M A. β -Carotene (Provitamin A) Production with Algae [M]// VANDAMME E J. *Biotechnology of Vitamins, Pigments and Growth Factors*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1989: 15-26. DOI: 10.1007/978-94-009-1111-6_2.
- [49] GAO F, NAN F R, FENG J, *et al.* Transcriptome profile of *Dunaliella salina* in uncheng Salt Lake re-reveals salt-stress-related genes under different salinity stresses[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2021, 39(6): 2336-2362. DOI: 10.1007/s00343-021-0164-4.
- [50] 郭保庆, 高仁恒, 张志端, 等. 山西运城盐湖卤虫(*Artemia* Sp)染色体组型的初步研究[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1988(S1): 93-97. DOI: 10.16207/j.cnki.1009-4490.1988.s1.011.
- [51] 侯林, 蔡含筠, 邹向阳. 我国卤虫(*Artemia*)两种同工酶的研究[J]. 辽宁师范大学自然科学学报, 1991, 14(02): 128-132.
- [52] 杨光, 蔡含筠, 侯林. 中国六个盐湖卤虫品系生物学特征的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1995(03): 39-47. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.1995.03.006.
- [53] 山西运城盐湖卤虫 *Artemia* Sp 生物学及其开发利用的研究报告[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1988(S1): 1-6. DOI: 10.16207/j.cnki.1009-4490.1988.s1.001.
- [54] 蔡生力, 陈汇远, 王素平, 等. 山西解池卤虫品系的特征及其投喂对虾幼体的饵料效果分析[J]. 海洋科学, 1989(02): 48-52.
- [55] 王宏毅, 张志端, 高仁恒, 等. 运城内陆盐湖卤虫 *Artemia* Sp 形态和习性的初步观察[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1988(S1): 41-52. DOI: 10.16207/j.cnki.1009-4490.1988.s1.005.
- [56] 曲若竹. 两性生殖卤虫的遗传多样性与进化[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2003.
- [57] 高仁恒, 张志端, 王宏毅, 等. 山西运城盐湖卤虫生物量的测定[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1988(S1): 78-86. DOI: 10.16207/j.cnki.1009-4490.1988.s1.008.
- [58] 于利, 张志峰, 廖承义, 等. 几种消毒剂对不同发育时期卤虫的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2000(02): 16-20. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2000.02.004.
- [59] 秦彤. As-Kip2 在中国卤虫滞育胚胎重启过程中的作用[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015.
- [60] 赵澈. LEA 和 DRRB 在中国卤虫早期胚胎发育和低温高盐胁迫中的作用[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2017.
- [61] 张梦辰. CDC23(Cell division cycle 23)和 CDH1 在中国卤虫早期胚胎发育中的作用[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2017.
- [62] 张弘. ATF4 在中国卤虫滞育胚胎解除过程中的作用及表达模式[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2018.
- [63] 张龙胜, 宋伯为, 王汝清, 等. 山西湿地野生植物资源研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1998(03): 77-81. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).1998.03.018.
- [64] 张海燕, 李琪, 单玉蓉, 等. 运城盐湖群落生物生态学特征研究[J]. 植物研究, 2003, 23(04): 449-452. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5102.2003.04.018.

- [65] 崔东亚,杨美玲,裴广仁. 山西省运城盐湖植物资源调查[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 11877-11879. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.22.054.:
- [66] 苗莉云,程朝霞. 运城盐湖主要植物种的生态位研究[J]. 农业与技术, 2008, 28(06): 77-79. DOI: 10.3969/j.issn.1671-962X.2008.06.028.
- [67] 滕红梅,苏仙绒,崔东亚. 运城盐湖4种藜科盐生植物叶的比较解剖研究[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(03): 250-255. DOI:10.3969/j.issn.2095-0837.2009.03.004.
- [68] 张莹莹. 运城盐湖盐角草的生物学特征及其影响因素[D]. 太原:山西师范大学, 2012.
- [69] 张莹莹,余慧,刘维仲. 对运城盐湖地区盐角草和盐地碱蓬耐盐性的分析[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2012, 26(04): 66-70. DOI:10.16207/j.cnki.1009-4490.2012.04.009.
- [70] 卫晓雅,合展,赵瑞华,等. 盐地碱蓬二型性种子的萌发和休眠及生态适应特性[J]. 西北植物学报, 2017, 37(04): 758-766. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2017.04.0758.
- [71] 王凯. 盐分和异型性种子对盐角草植株生长和结实的影响[D]. 太原:山西师范大学, 2018.
- [72] 张海燕,范哲峰. 运城盐湖十种耐盐植物体内无机及有机溶质含量的比较研究[J]. 生态学报, 2002, 22(03): 352-358. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2002.03.010.
- [73] 张海燕,芦英梅,苏俊霞. 运城盐湖植物有机渗透剂的比较研究[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2000, 14(04): 64-67. DOI:10.16207/j.cnki.1009-4490.2000.04.015.
- [74] 苗莉云,王霞,程朝霞. 运城盐湖9种盐生植物几种防御酶活性的研究[J]. 农业与技术, 2009, 29(01): 48-50. DOI:10.3969/j.issn.1671-962X.2009.01.017.
- [75] 卫晓雅. 盐地碱蓬种子休眠与萌发及其对盐生生境的适应对策[D]. 太原:山西师范大学, 2017.
- [76] 郭敏娜,张孟容,蔡翠芳,等. 山西省运城市盐湖区药用植物资源多样性研究[J]. 中药材, 2021, 44(02): 294-298. DOI:10.13863/j.issn1001-4454.2021.02.007.
- [77] 郭敏娜,张孟容,苏珍枝,等. 运城市盐湖区耐盐及盐生药用植物资源研究[J]. 山西中医药大学学报, 2021, 22(03): 222-226. DOI: 10.19763/j.cnki.2096-7403.2021.03.18.
- [78] 李沛蓉,樊青卓,李蓉蓉,等. 运城盐湖湿地入侵植物多样性及区系特征[J/OL]. 生态学杂志, [2024-10-9]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20240912.1754.013.html>.
- [79] 水禽调查组. 运城盆地主要水域水禽调查[J]. 山西林业科技, 1986(02): 15-20.
- [80] 樊龙锁,刘荣,张龙胜,等. 山西省运城硝池盐池冬季游禽调查报告[J]. 山西林业科技, 1997, 26(01): 32-36.
- [81] 张峰,上官铁梁,张龙胜. 山西省湿地生物多样性及其保护[J]. 地理科学, 1999, 19(03): 25-28. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.1999.03.005.
- [82] 赵天樑. 运城湿地自然保护区生物多样性及其保护[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2005, 28(01): 101-105. DOI:10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2005.01.029.
- [83] 苗蕾,郭东龙. 山西运城盐湖区白骨顶羽毛 Pb、Cu、Cd 的含量及分布[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2011, 34(02): 311-314. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2011.02.021.
- [84] 赵文强. 山西运城湿地省级自然保护区鸟类多样性研究[D]. 太原:山西大学, 2016.
- [85] 鲍东升. 山西运城盐湖迎来火烈鸟栖息[J]. 环境, 2016(12): 10-11. DOI: 10.3969/j.issn.0257-0300.2016.12.003.
- [86] 何晓彤. 运城盐湖湿地城市边缘带植物景观评价及其优化策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2019. DOI:10.27393/d.cnki.gxazu.2019.000092.
- [87] 程朝霞,李光耀,韩瑞婷. 基于 AHP 模型的运城盐湖湿地及周边景观综合评价[J]. 天津农业科学, 2019, 25(08): 69-72. DOI:10.3969/j.issn.1006-6500.2019.08.015.



郭东罡,男,教授,博士,硕士生导师。山西省生态学会秘书长、生态地理系主任、学院工会主席;主持完成各类项目10余项,包括国家基金重点项目、山西省基础研究计划青年科技研究基金项目等;发表期刊论文30余篇,参与出版著作5部;获国土资源科学技术一等奖;被评为“山西省高校教学名师”;被运城市授予“最美盐湖守护者”称号;获山西省教学成果奖(高等教学本科)一等奖;主要从事生态学和生物地理学专业的教学与科研工作。E-mail:gdghjx@126.com