

DOI: 10.5846/stxb202107191949

荣义峰,班璇,周杨浩,刘文成,祁红芳,杨建新,张宏,周卫国,俞录贤,杜浩.青海湖裸鲤自然产卵场的生境特征及无人机遥测判别——以泉吉河为例.生态学报,2022,42(22):9371-9382.

Rong Y F, Ban X, Zhou Y H, Liu W C, Qi H F, Yang J X, Zhang H, Zhou W G, Yu L X, Du H. The spawning habitat characteristics of *Gymnocypris przewalskii* and its identification by the UAV in tributary of Qinghai Lake -taking Quanji River as an example. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9371-9382.

青海湖裸鲤自然产卵场的生境特征及无人机遥测判别 ——以泉吉河为例

荣义峰^{1,2},班璇³,周杨浩^{1,5},刘文成^{1,2},祁红芳⁴,杨建新⁴,张宏⁴,周卫国⁴,俞录贤⁴,
杜浩^{1,2,4,5,*}

1 农业部淡水生物多样性保护重点实验室,中国水产科学研究院长江水产研究所,武汉 430223

2 上海海洋大学海洋科学学院,上海 201306

3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,武汉 430071

4 青海湖裸鲤繁育与保护重点实验室,青海湖裸鲤救护中心,西宁 810016

5 华中农业大学,武汉 430070

摘要:自然产卵场是维持物种延续最关键的栖息地,青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)的自然繁殖栖息地状况和生境特征尚缺乏详细的定量研究。以青海湖入湖河流泉吉河为例,在平水期采用现场调查和无人机遥测的方法对青海湖裸鲤的自然产卵场分布及生境状况进行调查,确定其产卵场生境特征参数,建立基于无人机遥测识别产卵场的方法并进行复核验证。结果表明:泉吉河河道形态可分为弯曲型、分汊型和顺直型等三种典型河型,青海湖裸鲤自然产卵场主要分布在弯曲型和分汊型河道中,分汊型河道几乎 100% 都有产卵场分布,弯曲型河道有 70% 为产卵场;产卵场河道平均长度(135.13±61.13)m,平均宽度(30.01±17.51)m,平均曲折度 1.09±0.07;平均面积(4586.6±4201.61)m²;产卵场常位于缓水浅滩处,平均水深(0.19±0.10)m(范围:0.03—0.44m),平均流速(0.24±0.20)m/s(范围:0.01—0.81m/s),河床质为含有沙粒的卵石(粒径:163—256mm)底质。河道形态、沙洲分布、水深特征等特征参数可作为无人机遥测识别产卵场的判断条件,并实现验证成功。研究结果可为开展整个流域的青海湖裸鲤自然产卵场现状评估及保护对策制定提供技术支撑。

关键词:青海湖裸鲤;产卵场;河道形态;流速;无人机

The spawning habitat characteristics of *Gymnocypris przewalskii* and its identification by the UAV in tributary of Qinghai Lake -taking Quanji River as an example

RONG Yifeng^{1,2}, BAN Xuan³, ZHOU Yanghao^{1,5}, LIU Wencheng^{1,2}, QI Hongfang⁴, YANG Jianxin⁴, ZHANG Hong⁴, ZHOU Weiguo⁴, YU Luxian⁴, DU Hao^{1,2,4,5,*}

1 Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

2 College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

3 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

4 Key Laboratory of *Gymnocypris przewalskii* Conservation, Qinghai naked Carp Rescue Center, Xining 810016, China

5 Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

基金项目:青海省自然科学基金面上项目(2018-ZJ-908);中央公益性基本科研业务费项目(2020TD08, 2019 HY-JC01)

收稿日期:2021-07-19; **采用日期:**2022-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duhao@yfi.ac.cn

Abstract: The natural spawning grounds are the most critical habitat for maintaining the *Gymnocypris przewalskii* resources in the Qinghai Lake, while they were not well studied yet. This study aims at analyzing the habitat characteristics of the spawning grounds of *G. przewalskii* in one of the tributaries of the Qinghai Lake, Quanjia River, via field survey and unmanned aerial vehicle (UAV) identification technique. The results showed that the morphology of Quanjia River could be divided into three types: meandering, braided and straight river channels. The natural spawning grounds of *G. przewalskii* were mostly located in the braided river channel (100%), less in the meandering channel (70%), and rare in the straight channel. The average length, width, tortuosity and area of the spawning grounds in the Quanjia River was (135.13 ± 61.13) m, (30.01 ± 17.51) m, (1.09 ± 0.07) and the (4586.60 ± 4201.61) m^2 , respectively. The spawning grounds often located in the river with riffles, the average water depth was (0.19 ± 0.10) m (range 0.03—0.44 m) and an average velocity was (0.24 ± 0.20) m/s (range 0.01—0.81 m/s), the substrate was pebble and sand (particle size 16—256 mm). The riverbank morphology, the distribution of the island and the water depth could be used in UAV image for identifying the potential spawning grounds in the whole Quanjia River, the result can be verified by the field data. The research is benefit for the assessment and protection of the natural spawning grounds for *G. przewalskii* and provides a case study for future spawning grounds investigation in some tough field survey areas.

Key Words: *Gymnocypris przewalskii*; spawning grounds; morphology; velocity; unmanned aerial vehicle

产卵场是鱼类栖息地中重要且敏感的场所,为鱼类提供产卵繁殖的区域,而在鱼类的整个生活史中,繁殖是一个极其重要的环节,这个环节与其它环节相互联系起来,保证了物种的延续。目前,有很多研究表明,鱼类产卵场具有特殊的生境特征,如对河鲢 (*Grayling*)^[1]、大西洋鲑 (*Atlantic salmon*)^[2]、中华鲟 (*Acipenser sinensis*)^[3]、珠星三块鱼 (*Tribolodon hakonensis*)^[4] 等的研究,得出河道形态、水深、流速、河床质等是产卵场栖息生境的关键生态环境参数。近年来,鱼类产卵场生境特征的研究在物种保护工作中得到越来越多的应用^[5-6]。因产卵场破坏导致的繁殖失败是造成鱼类资源衰退的重要原因之一,围绕鱼类产卵场,揭示其独特的生境,在鱼类资源增殖与保护实践活动中具有重要意义。

青海湖裸鲤 (*Gymnocypris przewalskii*), 俗称“湟鱼”, 属鲤形目, 鲤科, 裂腹鱼亚科、裸鲤属, 仅分布在青海湖及其附属水系, 是青海湖中独一无二的经济鱼类, 在青海湖整个生态系统中处于核心地位^[7]。青海湖裸鲤生长缓慢, 性成熟较晚, 由于人类活动的加剧以及过度捕捞, 青海湖裸鲤的资源急剧衰退, 近乎枯竭^[8]。目前, 人工增殖放流和自然产卵场保护是青海湖裸鲤资源养护的重要工作, 然而由于修堤筑坝、河道改造等导致自然河漫滩的消失或改变, 对青海湖裸鲤自然产卵场造成了影响, 使青海湖裸鲤自然繁殖受限, 从而对青海湖裸鲤资源的恢复造成了损害。目前, 关于青海湖裸鲤自然产卵场生境特征仅有一些描述性的观察研究^[9-10], 这些研究只是表明青海湖裸鲤自然产卵场位于流速缓慢的河漫滩, 沙砾底, 但这种描述不够详尽, 青海湖裸鲤自然产卵场的河道形态分类及定量分析, 水深和流速的主要特征, 河床质的类型及分类, 与非产卵场的区别等都没有进行较为详细的研究。开展青海湖裸鲤自然产卵场生境特征的研究对进行青海湖裸鲤自然产卵场的评估和保护等活动都具有重要的意义。青海湖裸鲤属于溯河洄游产沉性卵鱼类^[11], 产卵繁殖时伴随着繁殖行为的出现——尾部剧烈击打水面, 造成水花^[9]。每年 5—8 月青海湖裸鲤从青海湖中溯河而上进行产卵繁殖, 主要的溯河河流有 5 条, 分别为哈尔盖河、沙流河、泉吉河、黑马河和布哈河^[7], 其中布哈河和沙柳河是青海湖流域最大的两条河流, 两条河流的径流量占青海湖流域总径流量的 64%^[12]; 黑马河最小, 只有十几公里长, 流量较小; 哈尔盖河流量较大, 泉吉河流量适中, 基流在 1—5 m^3/s 之间, 河长 60 km 左右, 没有大型水利工程, 沿岸人烟稀少, 没有明显污染源, 河流水生态保持着较为原始的状态, 能够比较客观的反映青海湖裸鲤产卵场的生境特征, 因此我们以泉吉河为例, 对青海湖裸鲤产卵场生境特征展开研究。

本研究基于现场调查和无人机遥测调查了产卵场与非产卵场江段的栖息生境特征参数, 比较了产卵场与非产卵场生境特征差异, 识别了泉吉河青海湖裸鲤自然产卵场的生境特征参数, 并基此对未进行地面调查的

区域进行了无人机遥测的产卵场判别与验证,旨在为今后青海湖裸鲤产卵场保护、自然产卵场评估及人工产卵场的构建等提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

泉吉河为青海湖入湖河流之一,是目前青海湖裸鲤稳定发生产卵洄游的五大河流之一,河道具有较好的形态多样性,其上游为典型的山谷型河道,河道狭窄,水流湍急;中、下游为冲击平原型河道,河道平缓,支流较少。2018—2019 年对泉吉河湖口至上游 60km(37°14′—37°28′N,99°53′—99°54′E)进行了 30 个位点的无人机航测,由于地理位置原因和平均采样原则,在平水期选取了 10 个代表性的青海湖裸鲤产卵场与 5 个非产卵场河段进行地面栖息生境特征调查(图 1)和无人机航测,并对泉吉河 60km 的河道进行了航测。

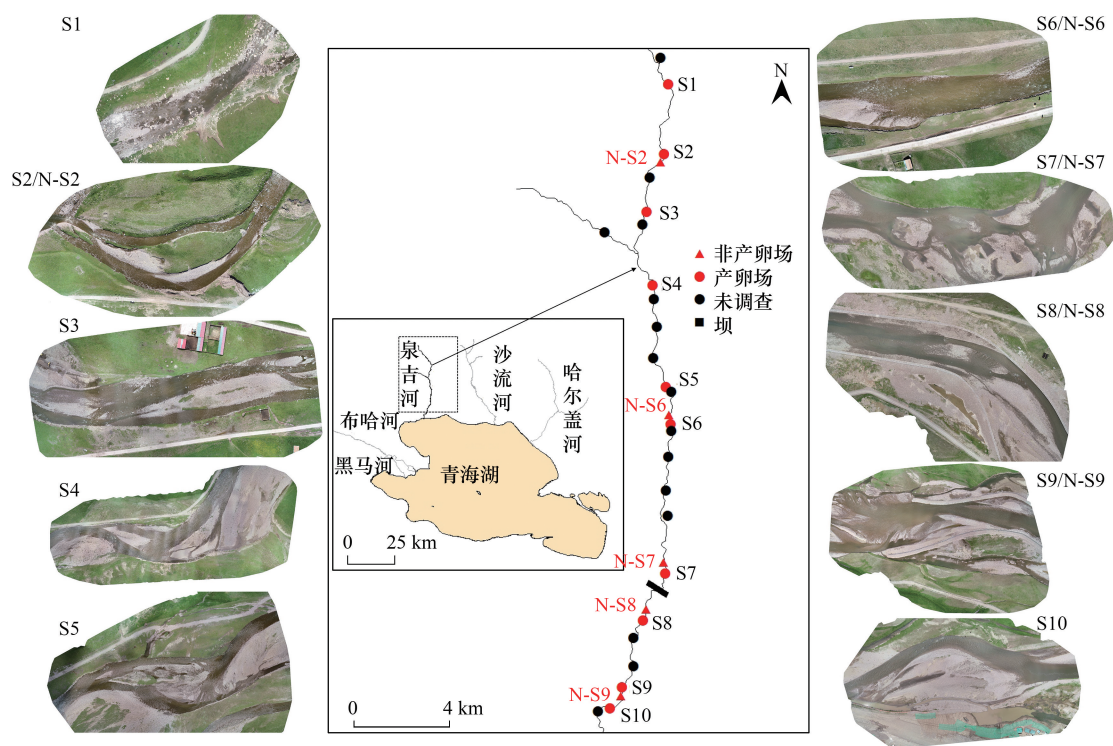


图 1 调查位点及无人机航拍影像

Fig.1 Survey sites and UAV images

S1:产卵场 1 spawning1; S2:产卵场 2 spawning2; S3:产卵场 3 spawning3; S4:产卵场 4 spawning4; S5:产卵场 5 spawning5; S6:产卵场 6 spawning6; S7:产卵场 7 spawning7; S8:产卵场 8 spawning8; S9:产卵场 9 spawning9; S10:产卵场 10 spawning10; N-S2:非产卵场 2 non-spawning2; N-S6:非产卵场 6 non-spawning6; N-S7:非产卵场 7 non-spawning7; N-S8:非产卵场 8 non-spawning8; N-S9:非产卵场 9 non-spawning9

1.2 研究方法

1.2.1 泉吉河繁殖季节水文情势状况

青海湖裸鲤每年 5 月份开始洄游,8 月份洄游结束,在这期间青海湖裸鲤进行产卵繁殖活动。本研究基于泉吉河水文站收集的泉吉河 2018—2020 年 5—8 月份的径流量,对青海湖裸鲤繁殖季节的泉吉河流量进行统计分析,得出青海湖裸鲤繁殖季节泉吉河正常流量范围、天数占比和由强降雨引起的流量突变的天数。在流量突变的状况下,河水泥沙混合,河道未发生青海湖裸鲤繁殖行为,即青海湖裸鲤不进行产卵繁殖活动。

1.2.2 自然产卵场的实地调查与判定

2018—2020 年在青海湖裸鲤繁殖季节(6—8 月)进行调查,调查期间均为正常流量。青海湖裸鲤受精卵

为沉性卵,并且亲鱼在繁殖交尾时通常会伴随着繁殖行为的发生——雌雄鱼剧烈抖动尾部,在水面形成水花^[9]。产卵场的范围主要依据调查的生物数据确定,因此在调查期间,使用 0.45mm 规格网目,网口 0.5m×0.3m,长 0.5m 的网兜固定在调查区域及调查区域下方进行捞卵采集,同时观察调查区域是否有繁殖行为的发生,通过江底捞卵的结果和现场观察亲鱼繁殖行为的发生来判断调查区域是否为产卵场。

1.2.3 河道形态数据采集与分析

使用四轴旋转翼大疆精灵 Phantom4 RTK 无人机对 15 个河段和 60km 的泉吉河河道进行航测(航向重叠率 70%,旁向重叠率 80%),影像数据利用基于 SfM 摄影测量方法的 Pix4D mapper 软件处理得到数字正射影像(DOM),然后通过 Global Mapper 软件中的数字化工具处理得到形态、长度、宽度、面积、曲折率等河道数据(精度为 0.01m)。根据目前对河道类型的划分^[13-15],本研究将泉吉河河道形态分为顺直型、弯曲型和分叉型;河道形态示意图在 Adobe Illustrator 2020 中绘制完成。

1.2.4 河道流速和水深数据采集与分析

将调查区域以 5m 一个横截面,每个横截面 2m 一个点进行均分,然后对每个点进行测量。每个调查位点记录详细的 GPS 数据;水深使用测深杆测量,测量误差小于 0.5cm;流速使用超声波多普勒流速仪测量(精度为 0.001m/s),水深低于 0.15m 时,测量底部流速;水深在 0.15—0.30m 之间时,测量 0.4h 和 0.8h 处的流速;水深高于 0.30m 时,测量 0.2h、0.4h 和 0.8h 处的流速。计算每个调查位点的垂向平均流速作为调查位点的流速。利用 ArcGIS 中的反距离权重法(IDW)对含有流速、水深信息的(X,Y,Z)型数据文件处理分析得到流速水深热区图。使用 Excel 对产卵场与非产卵场数据进行统计分析处理,统计数据均以平均值±标准差(Mean±SD)表示。

1.2.5 河道底质数据采集与分析

采用随机取样法,使用 0.5m×0.5m 的方框在调查区域内进行随机取样,用直尺测量方框内卵石的长径。底质类型划分方法参照 Cummins^[16]改进的 Wentworth 底质类型分类法^[17],本研究中由于采样方法和测量精度的限制,只对卵石进行分类,将卵石分为大型卵石(>256mm)、中型卵石(64—256mm)和小型卵石(16—63mm)。

1.2.6 基于河道生境特征的无人机遥测判定与现场验证

基于河道形态、河漫滩、曲折率、可见水深范围等参数,采用人工目视解译法,从无人机遥测图中对青海湖裸鲤产卵场进行识别,然后选择 5 个进行实地调查,通过江底捞卵、观察是否有繁殖行为的发生及人工在卵石间隙中找卵的方法判断这五个河段是否为产卵场,并对这五个河段的流速、水深和底质进行调查验证。

2 结果

2.1 青海湖裸鲤繁殖期泉吉河河道水文特征

2018—2020 年 5—8 月每日对泉吉河流量进行监测,认为流量 $Q \geq 7\text{m}^3/\text{s}$ 为强降雨造成的流量急剧增大的突变期,会导致青海湖裸鲤自然繁殖的终止。基于对泉吉河河道监测,发现在青海湖裸鲤整个繁殖季节,2018 年、2019 年、2020 年流量突变期的天数分别为 7d、30d、20d,分别占比 6%、24%、16%;未发生流量突变时期的天数分别为 116d、93d、103d,分别占比 94%、76%、84%;其流量范围分别为 $1.93\text{—}5.50\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1.32\text{—}4.64\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.67\text{—}4\text{m}^3/\text{s}$ (图 2)。基于 2018—2020 年数据,泉吉河非流量突变期的流量范围为 $1\text{—}4\text{m}^3/\text{s}$ 之间,青海湖裸鲤繁殖季节大部分时间都在处于此流量下(图 2),而青海湖裸鲤基本在此流量下进行产卵繁殖。

2.2 泉吉河青海湖裸鲤产卵场概况

基于对 15 个代表性河段的江底捞卵和现场观察研究,结果表明(表 1),15 个河段中有 10 个为产卵场河段,另外 5 个为非产卵场河段;从自然繁殖监测效果和河段内亲鱼数量来看,青海湖裸鲤主要在下流的产卵场河段内进行自然产卵繁殖,繁殖效果最好;相较于下游,中游的产卵场河段内亲鱼数量和卵量较少,自然产卵繁殖效果较差;而上游,只有极少数的青海湖裸鲤洄游到上游产卵场河段内,自然产卵繁殖效果最差。

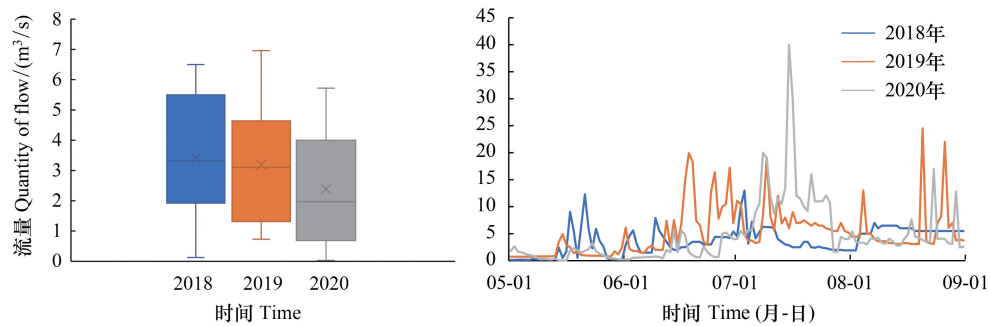


图2 2018—2020年泉吉河水文特征

Fig.2 The hydrological characteristics of the Quanji River 2018 to 2020

表1 青海湖裸鲤自然繁殖监测结果

Table 1 The natural spawning monitoring results of *G. przewalskii*

河段 Reach	监测时间 Monitoring time/h	捞卵量 Amount of eggs/粒	亲鱼数量 Number of broodstock	地理位置 Geographical Location
S1	1.5	9	+	上游
S2	1	13	++	上游
S3	1.5	14	++	上游
S4	1	18	+++	中游
S5	1	20	+++	中游
S6	1.5	26	+++	中游
S7	1	27	++++	下游
S8	1.5	39	++++	下游
S9	2	49	+++++	下游
S10	1	23	+++++	下游
N-S2	1	0	+	上游
N-S6	1	3	++	中游
N-S7	1	0	++	下游
N-S8	1	3	++	下游
N-S9	0.5	0	++	下游

S1:产卵场1 spawning1; S2:产卵场2 spawning2; S3:产卵场3 spawning4; S5:产卵场5 spawning5; S6:产卵场6 spawning6; S7:产卵场7 spawning7; S8:产卵场8 spawning8; S9:产卵场9 spawning9; S10:产卵场10 spawning10; N-S2:非产卵场2 non-spawning2; N-S6:非产卵场6 non-spawning6; N-S7:非产卵场7 non-spawning7; N-S8:非产卵场8 non-spawning8; N-S9:非产卵场9 non-spawning9; +++++、++++、+++、++和+表示亲鱼数量,由多到少

2.3 泉吉河青海湖裸鲤产卵场河段的河道形态特征

泉吉河整体河道形态属于顺直微弯型河道,河道内分布着众多的洲滩,形成了许多河道形态为分汊型的河道微生境。通过30个调查河段的无人机航拍影像图(图3),将泉吉河河道形态分为顺直型、弯曲型和分汊型,其中分汊型河道内基本都存在产卵场,弯曲型河道内也存在产卵场,并且比例较高,为70%,而顺直型河道内很少发现产卵场。

青海湖裸鲤泉吉河产卵场河段与非产卵场河段的河道形态存在显著性差异。产卵场河段河道生境复杂,河道形态以弯曲型和分汊型为主,形成滩涂交错的洲滩,河道转弯处或者洲滩交错处容易出现深潭,深潭浅滩区域内流速较缓,水深较浅,易形成青海湖裸鲤所需的自然繁殖环境;产卵场河段平均长度为135.13m(S.D.=61.13),平均宽度为30.01m(S.D.=17.51),平均曲折率为1.09(S.D.=0.07),最大产卵场位于下游,面积为16380m²,产卵场平均面积为4586.60m²(S.D.=4201.61)。

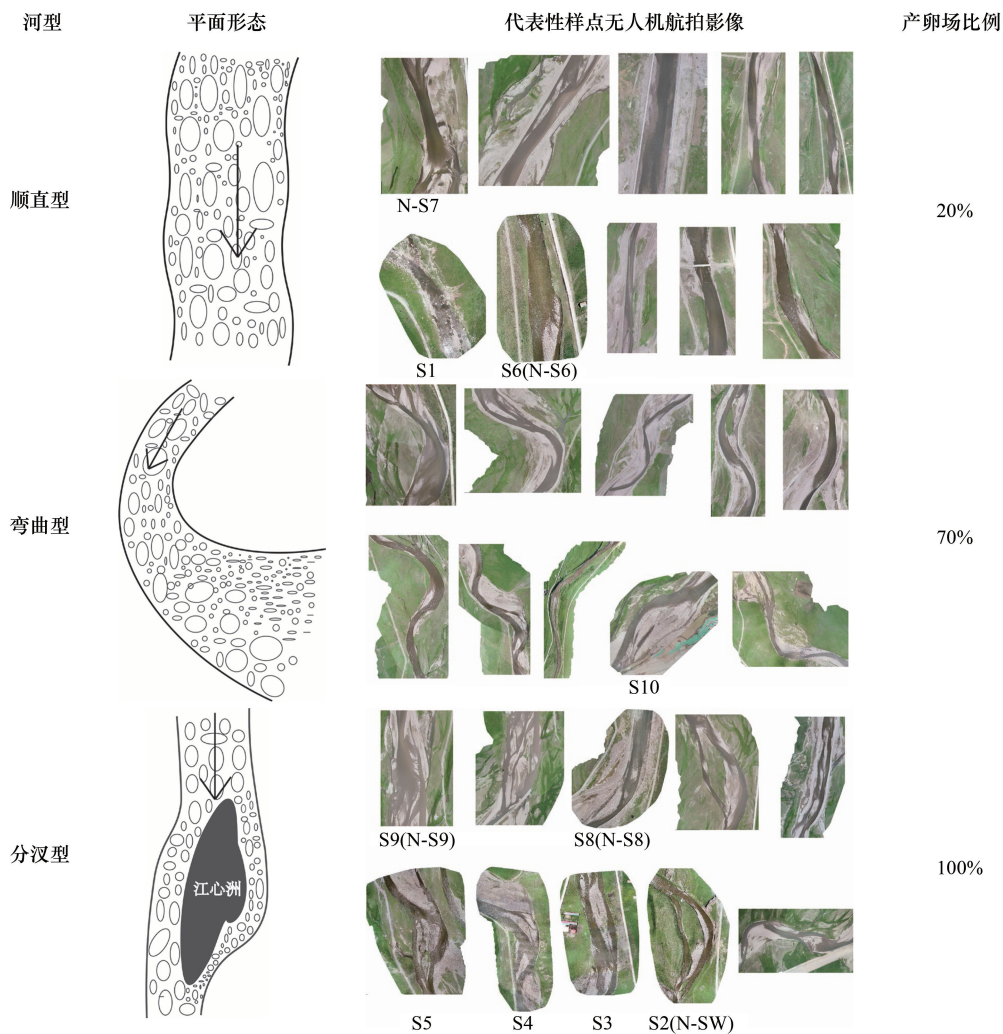


图3 基于无人机航拍影像划分的河道形态

Fig.3 River morphology based on UAV images

UAV: 无人机 unmanned aerial vehicle

非产卵场河段生境较为简单,河道形态基本为顺直型河道,一般没有边滩,流水冲刷,流速较高,水深较深,无法形成青海湖裸鲤所需的自然繁殖环境;非产卵场河段平均宽度为 16.97m (S.D.=6.46),平均曲折率为 1.02 (S.D.=0.02) (表 4)。与非产卵场河段相比,产卵场河段一般较宽,河道也具有一定的弯曲性,非产卵场河段一般较为顺直,不具有弯曲性,从河流纵向来看,自上游至下游,泉吉河河道形态从以弯曲型和顺直型为主,逐渐演变为以分汊型为主,同时产卵场河段宽度值逐渐变大,产卵场面积也随之变大,产卵场规模在下游最大,其次为中游。

2.4 泉吉河青海湖裸鲤产卵场的流速与水深特征

基于对产卵区与非产卵区的水深和流速调查分析,发现产卵区与非产卵区内水深和流速差异性显著 (图 4)。产卵区的流速区间为 0.01—0.81m/s,平均流速为 0.24m/s (S.D.=0.20),水深区间为 0.03—0.44m,平均水深为 0.19m (S.D.=0.10);非产卵区的流速区间为 0.02—1.08m/s,平均流速为 0.52m/s (S.D.=0.27),水深区间为 0.08—0.70m,平均水深为 0.34m (S.D.=0.14)。青海湖裸鲤泉吉河自然繁殖产卵区最适流速为 0.07—0.36m/s,最适水深为 0.11—0.25m。

表 2 河道形态参数
Table 2 Channel morphological parameters

产卵场编号 Spawning ground number	河型 River type	浅滩 Shoal	深潭 Deep pool	河宽 River width/m			长度 Length/m	面积 Area/m ²	曲折率 Tortuosity
				最大 Max	最小 Min	平均 Mean			
S1	S	√	√	22.31	19.82	20.99	25.64	523	1.02
S2	B/M	√		21.88	6.87	13.88	199.14	3163	1.25
S3	B	√		15.84	8.56	11.95	158.79	1812	1.04
S4	B/M	√	√	56.00	8.91	25.31	102.64	3572	1.12
S5	B/M	√	√	28.31	14.21	19.81	137.99	3213	1.13
S6	S	√		49.44	20.61	40.53	134.2	5550	1.01
S7	B	√	√	49.59	30.73	39.56	83.65	3326	1.03
S8	B/M	√		40.67	8.68	24.85	239.62	5810	1.06
S9	B	√	√	116.21	31.71	75.19	190	16380	1.02
S10	M	√	√	39.52	23.43	28.92	79.58	2517	1.14
N-S2	S			38.44	9.06	25.10	\	\	1.03
N-S6	S			24.15	19.17	20.31	\	\	1.01
N-S7	S			15.46	13.02	14.29	\	\	1.01
N-S8	M			11.60	6.30	8.27	\	\	1.06
N-S9	S			20.59	13.46	16.86	\	\	1.01

S:顺直型 straight;M:弯曲型 meandering;B:分汉型 braided;“√”代表该河段内含有浅滩、深潭

顺直型、弯曲型和分汉型这三种河道形态内的产卵区平均流速分别为 0.21m/s (S.D. = 0.14)、0.24m/s (S.D. = 0.21)、0.23m/s (S.D. = 0.20), 基本没有差异;平均水深分别为 0.23m (S.D. = 0.08)、0.19m (S.D. = 0.10)、0.18m (S.D. = 0.10), 顺直型河道的水深相对偏高(图 5)。

通过青海湖裸鲤最适繁殖区域(最适水深与流速叠加)可以看出(图 6),青海湖裸鲤产卵场主要分布在分汉型河道,其次为弯曲型河道,顺直型河道基本没有。分汉型河道的最适水深和最适流速区域面积最大。

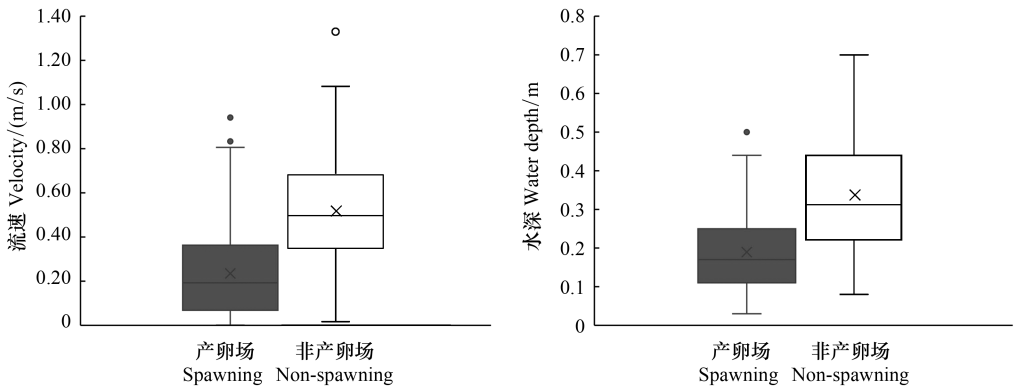


图 4 产卵场与非产卵场的流速与水深对比

Fig.4 Comparison of flow velocity and water depth between spawning ground and non-spawning ground
产卵场数据汇总和非产卵场数据进行对比

2.5 泉吉河青海湖裸鲤产卵场的河床质特征

泉吉河河道表层河床质主要由卵圆、扁圆形卵石及沙粒组成。产卵区与非产卵区底质的区别主要为卵石粒径的大小(图 7)。产卵区中的卵石主要是小型卵石和中型卵石,非产卵区中的卵石主要是中型卵石,其次为大型卵石,无小型卵石(表 3)。

2.6 青海湖裸鲤产卵场生境特征的无人机判定与实测验证

基于以上的研究结果,无人机遥测识别潜在产卵场可以基于以下参数:(1)河道形态:弯曲型和分汉型河

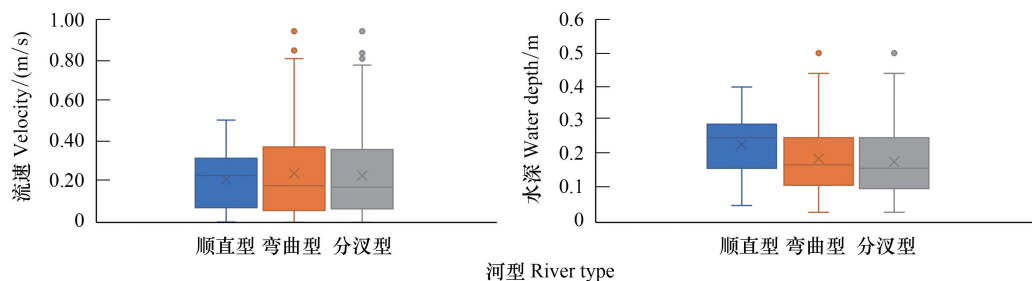


图5 不同河型产卵场的流速与水深对比

Fig.5 Comparison of flow velocity and water depth of spawning grounds of different river types
产卵场数据按照顺直型、弯曲型和分汊型三种类别进行汇总对比

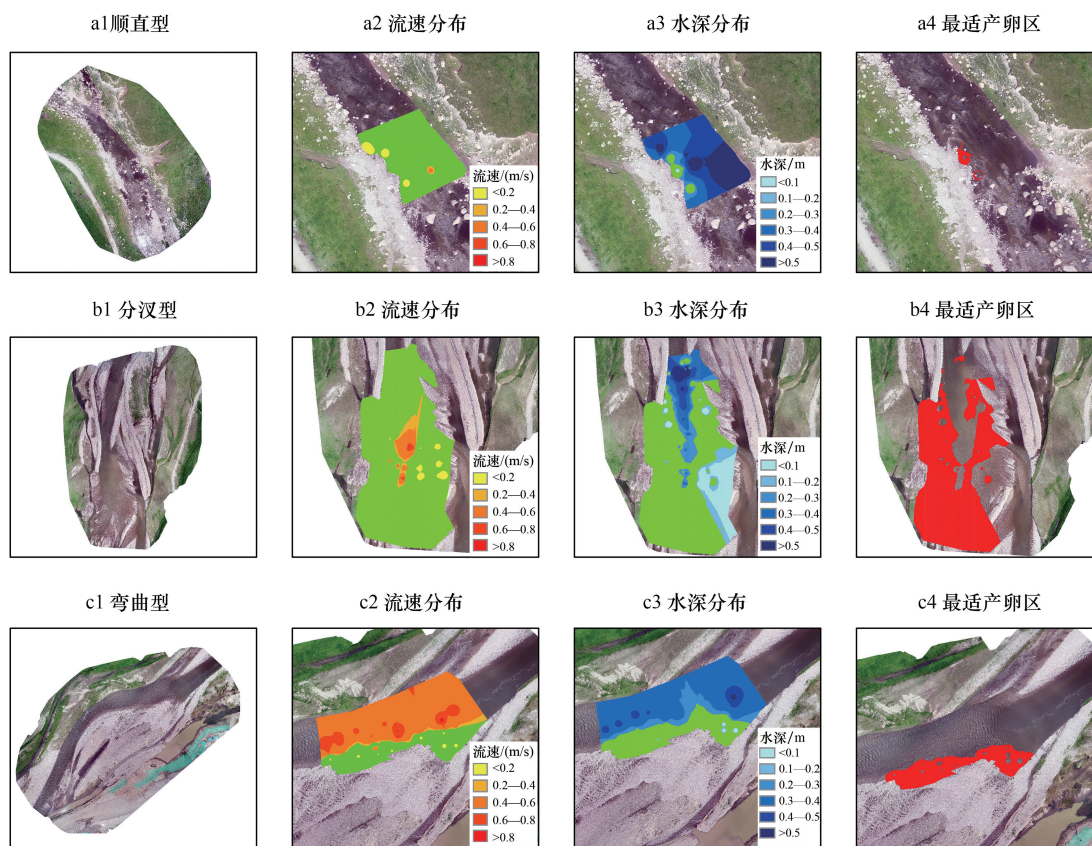


图6 不同河型产卵场流速与水深分布图

Fig.6 Distribution map of flow velocity and water depth of spawning grounds of different river types

a2、b2、c2 中绿色区域代表最适流速区域; a3、b3、c3 中绿色区域代表最适水深区域; a4、b4、c4 中红色区域代表青海湖裸鲤最适产卵区域

段; (2) 河漫滩: 有河漫滩存在的河段, 青海湖裸鲤产卵场都具有边滩, 繁殖活动发生在浅滩上; (3) 可视水深范围: 水深较浅 < 40 cm 时, 从无人机遥测图上可视河床底部; (4) 曲折率: 曲折率大于 > 1.09 的弯曲型河段。

基于这些参数, 在无人机航测图上对泉吉河青海湖裸鲤产卵场河段进行了筛选出潜在产卵场, 随机选取了 5 个进行了验证。验证调查结果显示 (表 4), 现场采卵监测结果证实这 5 个河段为产卵场河段, 其中 3 个为分汊型河道, 2 个为弯曲型河道, 符合上述的研究结果 (结果 2.3); 这 5 个河段的流速分别为 0.16 m/s (S.D. = 0.12)、0.22 m/s (S.D. = 0.18)、0.26 m/s (S.D. = 0.18)、0.23 m/s (S.D. = 0.11)、0.25 m/s (S.D. = 0.22), 水深分别

为 0.16m (S.D. = 0.03)、 0.18m (S.D. = 0.05)、 0.22m (S.D. = 0.06)、 0.20m (S.D. = 0.05)、 0.16m (S.D. = 0.05), 河床质为中小型卵石夹沙, 与上述研究结果(结果 2.4 和 2.5)的流速 ($0.24 \pm 0.20\text{ m/s}$)、水深 ($0.19 \pm 0.10\text{ m}$) 和河床质(中小型卵石夹沙)基本一致。因此,初步建立了通过无人机全区域遥测对青海湖裸鲤的产卵场总体分布和面积进行筛选识别的方法。

3 讨论

3.1 青海湖裸鲤自然产卵场的生境特点

对于鱼类的产卵场,不同种类具有不同的限制性因素,根据目前的研究,认为水深、流速、底质等都是裂腹鱼自然产卵场的关键生态因子,如朱挺兵等^[18]对雅鲁藏布江中游裂腹鱼类栖息地环境特征进行了调查,认为流速是影响裂腹鱼类栖息地选择的主要因素;蔡林钢等^[19]对新疆裸重唇鱼 (*Gymnodiptychus dybowskii* Kessler) 和斑重唇鱼 (*Diptychus maculatus* Steindachner) 的产卵场微环境进行了研究,认为流速、水深、底质和温度是这两种鱼自然繁殖的关键生态因子,且互不相同;王玉荣等^[20]探讨了影响裂腹鱼类自然分布河流的水深和平均流速特征;陈永祥等^[21]对四川裂腹鱼 (*Schizothorax kozlovi* Nikolsky) 的产卵场进行了调研,表明四川裂腹鱼产卵场在卵石、泥沙混合底质的河滩。河道形态影响其河道内的水动力特征,认为河道形态是决定产卵场条件的首要因素^[22],因为河道形态决定了流速场特征,影响了水深、流速,并在一定程度上决定了水流对河道的冲刷,进而影响河床质的组成^[23]。在青海湖裸鲤繁殖季

节,青海湖流域多发洪水,每次洪水过后都会有自然产卵场被破坏,但又有新的产卵场形成,虽然新的产卵场可能是青海湖裸鲤无奈之下的选择,但不可否认新产卵场的形成主要是产卵场河段的河道形态与水流共同作用下的结果。目前暂无研究对青海湖裸鲤甚至裂腹鱼的产卵场河道形态的研究,只是简单的描述为产卵场位于河滩,而为什么位于河滩? 位于什么样的河滩暂无研究。本研究首次观察并抽象总结了青海湖裸鲤泉吉河自然产卵场的形态,认为青海湖裸鲤自然产卵场河道属于分汊型和弯曲型,且以分汊型为主,这种河道形态生境复杂,有深潭、浅滩分布,青海湖裸鲤在繁殖期有集群行为,深潭便于青海湖裸鲤聚集,用于亲鱼产前产后休息,浅滩上合适的水动力环境形成青海湖裸鲤自然繁殖所需的环境。本研究认为可以以本研究得出的青海湖裸鲤泉吉河产卵场的河道形态特征为基础,对整个泉吉河的河道形态特征进行提取和筛选,如 Arndt 等^[24]对 Odra 河及其支流的欧洲鲟 (*Baltic sturgeon*) 产卵场生境的研究,这可能是寻找和评估青海湖裸鲤泉吉河产卵场的一个有效办法,并且可以依据此参数人工构建青海湖裸鲤产卵场。

裂腹鱼类的产卵场一般位于流水浅滩处处,如新疆裸重唇鱼^[19]、四川裂腹鱼^[21]、光唇裂腹鱼 (*Schizothorax lissolabiatu*)^[25]、宝兴裸裂尻鱼 (*Schizopygopsis malacanthus baoxingensis*)^[26] 和花斑裸鲤 (*Gymnocypris eckloni* Herzensten)^[27] 等,青海湖裸鲤在泉吉河的产卵场也类似,产卵场位于浅滩,水深较浅,水流较缓。比较产卵场河段与非产卵场河段水力参数的差异性,发现与非产卵场河段相比,青海湖裸鲤产卵场



图7 产卵区与非产卵区河床质特征

Fig.7 The characteristics of riverbed substrate in spawning area and non-spawning area

河段具有流速、水深较小的特点。陈明千等^[28]分析齐口裂腹鱼(*Schizothorax Prenantis*)产卵场河段与非产卵场河段的水力学参数差异,发现两者的水深、流速、流速梯度、涡量和动能梯度具有显著差异;王远坤等^[29]对葛洲坝下游中华鲟产卵场三维流速分布进行了研究,发现中华鲟产卵区流速在三维上的分布比非产卵区明显具有多样性。在调查过程中发现非产卵场河段内,有些位点的水深和流速与产卵场区域非常类似,但是没有青海湖裸鲤自然繁殖发生,这是否与产卵场独特水力生境有关,下一步应从流速梯度、涡量和动能梯度等水力参数进行分析研究,揭示青海湖裸鲤产卵场的水力生境。

表 3 卵石类型及比例
Table 3 The type and proportion of pebble

卵石类型 Pebble type	产卵场 Spawning ground		非产卵场 Non-spawning ground	
	计数 Count	百分比 Percentage/%	计数 Count	百分比 Percentage/%
小型卵石 Small pebbles	419	53.79	0	0
中型卵石 Medium pebbles	356	45.70	148	84.09
大型卵石 Large pebbles	4	0.51	28	15.91
总计 Total	779	100.00	176	100.00

小型卵石(16—63mm)、中型卵石(64—256mm)、大型卵石(>256mm)

表 4 基于无人机判定的青海湖裸鲤产卵场生境特征的验证参数
Table 4 The habitat parameters characteristics of the spawning ground of *G. przewalskii* predicated by the UAV

验证河段 Verify reach	河型 River type	捞卵量 Amount of eggs/粒	亲鱼数量 Number of broodstock	实测流速	水深 Water depth/m/ 是否符合产卵场特征范围	底质 Substrate/ 是否符合产卵场特征范围
				Measured velocity/ (m/s)		
				是否符合产卵场特征范围 Whether it meets the characteristic range of the spawning ground	Whether it meets the characteristic range of the spawning ground	Whether it meets the characteristic range of the spawning ground
河段 1 Reach 1	B	24	++++	0.16±0.12/符合	0.16±0.03/符合	卵石夹沙/符合
河段 2 Reach 2	M	18	+++	0.22±0.18/符合	0.18±0.05/符合	卵石夹沙/符合
河段 3 Reach 3	M	21	+++	0.26±0.18/符合	0.22±0.06/符合	卵石夹沙/符合
河段 4 Reach 4	B	19	+++	0.23±0.11/符合	0.20±0.05/符合	卵石夹沙/符合
河段 5 Reach 5	B	17	+++	0.25±0.22/符合	0.16±0.05/符合	卵石夹沙/符合

S:顺直型 straight;M:弯曲型 meandering;B:分汊型 braided;++++、++++、+++、++和+表示亲鱼数量,由多到少

对底层产卵鱼类而言,河床质是其自然产卵繁殖的承载体,关于底层产卵鱼类与河床质之间的关系,在鲢鳙鱼^[30]中研究较为深入。通常情况下,这些鱼类对河床质类型有选择性,一般选择卵石河床质,再者就是对卵石粒径大小有选择性,例如珠星三块鱼^[31]。青海湖裸鲤自然繁殖时,不但选择卵石河床质,并且对卵石径大小有一定的选择性。青海湖裸鲤受精卵为沉性卵,大多数散布在卵石间隙中,我们认为,青海湖裸鲤受精卵散布在卵石间隙中,而不是沙粒中,可能有 3 个方面原因:(1)卵石间隙提供足够的空间;(2)躲避鸟类等天敌;(3)卵石间隙容纳水流提供充足的溶氧。卵石间隙中的含氧量问题也备受关注^[32—33], Sowden 和 Power^[34]研究表明,当虹鳟(*Salmo gairdneri*)产卵巢中的平均溶氧低于 4.3mg/L 时,没有受精卵可以孵化。现有许多研究表明^[31—35],卵石间隙中的水流可以为受精卵的孵化提供充足的溶氧。

3.2 用无人机进行产卵场判别的可行性

无人机由于其机动灵活、成本低、精度高等特点,被广泛应用于各行各业。在传统的鱼类栖息地调查中,需要人工走样或者卫星遥感等方法对栖息地的形态、位置、大小等进行研究,这些方法都有一些缺陷。譬如误差大,耗时耗力,花费大等;无人机遥感的出现弥补了这些缺陷,并且拥有很好的可行性。通过无人机可以获取河道形态及参数,如冯双奇^[36]通过无人机对河流进行三维地貌建模,得到了高精度的河道模型;李辉等^[37]通过无人机遥感实现了河流阶地和河漫滩的提取,并有着高精度、高效率、可视化效果好的特点。本研究通过无人机航拍获得了青海湖裸鲤产卵场形态,并对产卵场的形态特征进行分析,通过对这些特征进行识

别,可获取未进行调查的潜在青海湖裸鲤产卵场,郭新磊等^[38]通过识别青藏高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)的洞穴,初步研究了鼠兔的潜在栖息地环境,也说明了可以通过无人机对微地形进行识别研究。通过无人机对鱼类产卵场分析识别,帮助我们在实际调查中快速获取其他未知产卵场,这在濒危水生动物保护中具有重要意义,可为濒危水生动物的自然产卵场查找及人工产卵场构建提供良好的技术支撑。

本研究确定了通过无人机判别鱼类产卵场的可行性,但在判别过程中存在判别误差的可能,例如在顺直型河道中也存在着部分青海湖裸鲤产卵场,但在在无人机遥测判别过程中很难准确判别;判别弯曲型河道中的产卵场时,有时也可能导致判别结果不准确。在下一步研究中,将更加精确无人机识别参数,提高识别准确率和精确度。

3.3 泉吉河青海湖裸鲤的产卵场现状及保护对策建议

泉吉河上游宽窄峡谷相间,中下游河道逐渐平缓,河道形态复杂多变,生境复杂,根据我们调查,泉吉河整体符合青海湖裸鲤繁殖需求,上中下游 60km 的河段都有青海湖裸鲤产卵场存在,但由于拦河坝的原因,青海湖裸鲤洄游通道遭到破坏,导致大部分亲鱼无法上溯,聚集在水坝下,使水坝以下的河段成为青海湖裸鲤自然繁殖主要发生河段;同时由于修堤筑坝、河道改造导致自然产卵场遭到破坏,产卵场面积减少,自然增殖受损,不利于种群恢复,因此有必要对青海湖裸鲤产卵场进行养护。建议从以下几方面开展青海湖裸鲤产卵场的养护工作:(1)建立科学的青海湖裸鲤过鱼通道,疏通青海湖裸鲤洄游通道,使亲鱼能够上溯,增加中上游青海湖裸鲤自然产卵场的利用率;(2)在修堤筑坝、河道改造的同时,对产卵场进行修复或者构建人工产卵场。

4 结论

本研究基于无人机遥测和现场调查的方法对青海湖裸鲤泉吉河自然产卵场进行了调查,以此研究青海湖裸鲤泉吉河自然产卵场分布及生境特征,主要研究结论如下:

1) 青海湖裸鲤繁殖季节,泉吉河正常流量基本在 $1\text{--}4\text{m}^3/\text{s}$ 之间。

2) 泉吉河青海湖裸鲤在下游的繁殖效果最好,即过鱼通道以下。

3) 泉吉河河道形态分为分汊型、弯曲型和顺直型等三种典型特征,分汊型和弯曲型河道易形成流水浅滩,青海湖裸鲤自然产卵场主要分布在这两种河道形态中,产卵场河段平均长度为 $(135.13\pm 61.13)\text{m}$,平均宽度为 $(30.01\pm 17.51)\text{m}$,平均面积 $(4586.6\pm 4201.61)\text{m}^2$,平均曲折率为 1.09 ± 0.07 。

4) 青海湖裸鲤产卵区位于流水浅滩处,平均流速为 $(0.24\pm 0.20)\text{m/s}$ (范围: $0.01\text{--}0.81\text{m/s}$),平均水深为 $(0.19\pm 0.10)\text{m}$ (范围: $0.03\text{--}0.44\text{m}$),最适流速为 $0.07\text{--}0.36\text{m/s}$,最适水深为 $0.11\text{--}0.25\text{m}$ 。河床质为小型卵石和中型卵石加沙。

5) 青海湖裸鲤自然产卵场可通过无人机航测图基于河道形态、河漫滩、可视水深、曲折率等参数进行识别。

参考文献 (References):

- [1] Sempeski P, Gaudin P. Habitat selection by *Grayling*-I. Spawning habitats. *Journal of Fish Biology*, 1995, 47(2): 256-265.
- [2] Moir H J, Soulsby C, Youngson A. Hydraulic and sedimentary characteristics of habitat utilized by *Atlantic salmon* for spawning in the Girnock Burn, Scotland. *Fisheries Management and Ecology*, 1998, 5(3): 241-254.
- [3] 张辉,危起伟,杨德国,杜浩,张慧杰,陈细华. 葛洲坝下游中华鲟(*Acipenser sinensis*)产卵场地形分析. *生态学报*, 2007, 27(10): 3945-3955.
- [4] Hanrahan T P, Geist D R, Arntzen E V. Habitat quality of historic Snake River fall *Chinook salmon* spawning locations and implications for incubation survival. Part 1: substrate quality. *River Research and Applications*, 2005, 21(5): 455-467.
- [5] Johnson J H, LaPan S R, Klindt R M, Schiavone A. *Lake sturgeon* spawning on artificial habitat in the St Lawrence River. *Journal of Applied*
- [6] Marsden J E, Perkins D L, Krueger C C. Recognition of spawning areas by *Lake trout*: deposition and survival of eggs on small, man-made rock piles. *Journal of Great Lakes Research*, 1995, 21: 330-336.
- [7] 陈大庆. 青海湖裸鲤资源评估与繁殖群体遗传多样性[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2004.

- [8] 史建全. 青海湖裸鲤研究现状与资源保护对策. 青海科技, 2008, 15(5): 13-16.
- [9] 青海省生物研究所. 青海湖地区的鱼类区系和青海湖裸鲤的生物学. 北京: 科学出版社, 1975.
- [10] 俞录贤. 青海湖裸鲤亲鱼产卵习性初探. 环球市场信息导报, 2016(22): 107-108.
- [11] 张信. 青海湖裸鲤资源量的水声学评估[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- [12] 李岳坦, 李小雁, 崔步礼, 彭海英, 伊万娟. 青海湖流域 50 年来(1956—2007 年) 河川径流量变化趋势——以布哈河和沙柳河为例. 湖泊科学, 2010, 22(5): 757-766.
- [13] 钱宁. 关于河流分类及成因问题的讨论. 地理学报, 1985, 40(1): 1-10.
- [14] 王随继, 任明达. 根据河道形态和沉积物特征的河流新分类. 沉积学报, 1999, 17(2): 240.[万方]
- [15] Miall A D. A review of the braided-river depositional environment. Earth-Science Reviews, 1977, 13(1): 1-62.
- [16] Cummins K W. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. American Midland Naturalist, 1962, 67(2): 477.
- [17] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [18] 朱挺兵, 陈亮, 杨德国, 马波, 李雷. 雅鲁藏布江中游裂腹鱼类的分布及栖息地特征. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2817-2823.
- [19] 蔡林钢, 牛建功, 李红, 刘建. 巩乃斯河新疆裸重唇鱼和斑重唇鱼产卵场微环境研究. 干旱区研究, 2013, 30(1): 144-148.
- [20] 王玉蓉, 谭燕平. 裂腹鱼自然生境水力学特征的初步分析. 四川水利, 2010, 31(6): 55-59.
- [21] 陈永祥, 罗泉笙. 四川裂腹鱼繁殖生态生物学研究——V、繁殖群体和繁殖习性. 毕节师专学报, 1997, 15(1): 1-5.
- [22] Viñas M D, Negri R M, Ramírez F C, Hernández D. Zooplankton assemblages and hydrography in the spawning area of anchovy (*Engraulis anchoita*) off Río de la Plata Estuary (Argentina-Uruguay). Marine and Freshwater Research, 2002, 53(6): 1031.
- [23] Coulombe-Pontbriand M, Lapointe M. Geomorphic controls, riffle substrate quality, and spawning site selection in two semi-alluvial salmon rivers in the Gaspé Peninsula, Canada. River Research and Applications, 2004, 20(5): 577-590.
- [24] Arndt G M, Gessner J, Bartel R. Characteristics and availability of spawning habitat for *Baltic sturgeon* in the Odra River and its tributaries. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22(s1): 172-181.
- [25] 孙洁. 基于耳石微结构的澜沧江光唇裂腹鱼产卵时间和仔鱼生长研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [26] 周翠萍. 宝兴裸裂尻鱼的繁殖生物学研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.
- [27] 鄢思利. 花斑裸鲤的生物学特性、繁殖特性、胚胎发育及人工培育的研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2016.
- [28] 陈明千, 脱友才, 李嘉, 王庆国. 鱼类产卵场水力生境指标体系初步研究. 水利学报, 2013, 44(11): 1303-1308.
- [29] 王远坤, 夏自强. 长江中华鲟产卵场三维水力学特性研究. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(1): 14-19.
- [30] Sly P G, Evans D O. Suitability of habitat for spawning lake trout. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1996, 5(3): 153-175.
- [31] Groves P A, Chandler J A. Habitat quality of historic Snake River fall *Chinook salmon* spawning locations and implications for incubation survival. Part 2: intra-gravel water quality. River Research and Applications, 2005, 21(5): 469-483.
- [32] Keckeis H. Influence of river morphology and current velocity conditions on spawning site selection of *Chondrostoma nasus* (L.). River Systems, 2001, 12(2/3/4): 341-356.
- [33] Zeh M, Dönni W. Restoration of spawning grounds for trout and grayling in the river High-Rhine. Aquatic Sciences, 1994, 56(1): 59-69.
- [34] Sowden T K, Power G. Prediction of rainbow trout embryo survival in relation to groundwater seepage and particle size of spawning substrates. Transactions of the American Fisheries Society, 1985, 114(6): 804-812.
- [35] Petticrew E, Rex J. The importance of temporal changes in gravel-stored fine sediment on habitat conditions in a salmon spawning stream. IAHS publication, 2006
- [36] 冯双奇, 谭程鹏. 无人机摄影测量在现代河流体系形态定量化研究中的应用. 河南科技, 2020(2): 8-11.
- [37] 李辉, 余忠迪, 蔡晓斌, 胡尊语. 基于无人机遥感的河流阶地提取. 地球科学, 2017, 42(5): 734-742.
- [38] 郭新磊, 宜树华, 秦彧, 陈建军. 基于无人机的青藏高原鼠兔潜在栖息地环境初步研究. 草业科学, 2017, 34(6): 1306-1313.