自然保护地不同水环境下的声景感知*

胡斐然[1] 许晓青[1] 余楚萌[1] 王 燕[2]

1 同济大学建筑与城市规划学院 上海 200000

2 四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟管理局 四川省阿坝藏族羌族自治州 623400

摘要：声景感知在所有感知中占有较为重要的地位，但是人暴露于不同水环境条件下有何主观反应尚不清晰，需要相关研究进一步验证。以九寨沟自然保护地为研究对象，选择瀑布、海子、钙华滩流 3 类水环境条件下的声景指数特征及游客感知特征进行分析，通过声景指数的方法提取录音样本的环境测度值，并与游客的 6 个维度的感知评价进行相关分析。结果表明：1）九寨沟自然保护地的不同水环境条件造就了声景指数的差异，瀑布在 Hf、Ht、M 指数上呈现出与其他两类水环境的差异；海子在 ACI、AEI、NDSI 指数上呈现出与其他两类水环境的差异。2）九寨沟不同水环境条件也造就了游客感知的差异，海子在清晰度、自然度和丰富度方面明显差异于另外两种水环境；钙华滩流在节奏感、悦耳度方面明显差异于另外两类水环境。3）声景指数与游客感知存在相关关系，其中 AEI、ADI、Ht、M 指数是造成总体满意度差异的主要因素。研究结果说明瀑布、海子、钙华滩流因其不同特性带来不同感知体验，即丰富的生物多样性和声音景观可能增强游客的亲近感，而过于复杂的声音可能干扰游客的游憩体验。

关键词：水环境；声景感知；声景指数；九寨沟世界遗产地

DOI：10.12169/zgcsly.2024.04.18.0001

Soundscape Perceptionof Different Water Environments in Protected Natural Area

Hu Feiran[1] Xu Xiaoqing[1] Yu Chumeng[1] Wang Yan[2]

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200000, China; 2. College of Jiuzhaigou Administration Bureau, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture 623400, Sichuan, China)

Abstract: Soundscape perception occupies a relatively important position in all perceptions, and the sound of water is of great significance in making people have pleasant perceptions. It is not clear what subjective reactions people will have when exposed to different water environmental conditions, and relevant research needs to be done for further verification. The paper takes Jiuzhaigou Nature Reserve to select and analyze the soundscape index characteristics and tourist perception characteristics under the environmental conditions of waterfall, haizi and calcerous tufa shoal. The environmental measurement value of the recorded sample is extracted through the method of soundscape index, and the evaluation of tourists' perception in six dimensions is analyzed. The results show that: 1) Different water environment conditions in Jiuzhaigou Nature Reserve have created differences in the soundscape index. The waterfall shows differences from the other two types of water environments in terms of Hf, Ht and M indexes, and haizi is different from waterfall and calcerous tufa shoal in ACI, AEI, NDSI indexes; 2) The different water

收稿日期：2024-04-18

* 基金项目：四川省科学技术厅国际合作创新项目（2022YFH0072）；国家自然科学基金面上项目“国家公园鸟类多样性声纹特征的人为影响机制及其空间管控策略研究（5247080755）、声纹识别技术下的黄龙风景名胜区生物多样性时空格局监测研究（TJW2022795401）”

第一作者：胡斐然（1999- ），男，硕士生，研究方向为国家公园与自然保护地管理。E-mail：Caupfran@163.com

通信作者：王燕（1973- ），女，高级经济师，九寨沟国家级风景名胜区管理局。E-mail：58208885@qq.com

environmental conditions of Jiuzhaigou have also caused differences in the perception of tourists. Haizi is obviously different from the other two water environments in terms of clarity, naturalness and richness. The calcerous tufa shoal is obviously different from the other two water environments in terms of rhythm and pleasantness; and 3) Judging from the correlation between the soundscape index and the perception of tourists, the AEI, ADI, Ht and M indexes are the main factors that cause the difference in overall satisfaction. To sum up, waterfall, haizi and calcerous tufa shoal bring in different perceptions owing to their different attributes, i. e., richer biodiversity and soundscape can enhance tourism affinity for environment while complex sounds could interfere the recreational experience of tourists.

Keywords: water environment; soundscape perception; soundscape index; Jiuzhaigou World Heritage Site

声景是声音、人、声音环境和社会之间的关系，强调个体和群体对所处声音环境的感知和理解。20 世纪 60 年代加拿大作曲家谢弗（R · Murray Schafer）[1] 提出声景的概念，拓展了景观的研究视角。相比于传统的声环境研究，声景观更强调声音对人主观上的感知评价[2]，声音类型、景观特点、个人因素等都应考虑在内[3]。水是自然和人工环境中普遍存在的元素之一，而水声景是声景研究中的重要内容。为更清晰地了解景区水声景感知的主客观影响因素，有必要研究人对水声的感知偏好以及水声对人情绪和心理的影响。目前对水声景的研究主要集中在揭示声音信息对水生生物群落的影响。不同学者尝试运用声学指数结合物种丰富度评估的方法进行研究。Desjonquères 等[4] 通过分析大型无脊椎动物发声的时域和频谱特性发现声学群落可以作为大型无脊椎动物群落组成的指标。Gottesman 等[5] 通过使用声学指标和声音类型度量来测量声景。Desjonquères 等[6] 通过记录无脊椎动物物种的活动和丰度并使用声学指数研究池塘的声音多样性。此外，Decker 等[7] 运用 3 个声学指数（M、H 和 ACI）评估了 12 条低地溪流的声景特点。以上研究为水生态系统的研究和保护提供了重要的参考。

国内学者目前对水声景的研究主要集中于古典园林水声景的分析[8]。多数情况下，水声仅被视为一种通过掩盖或分散人们对城市噪声的注意而创造安静区域的工具，如在酒店、商业中心等公共建筑物或飞机、火车等交通环境中[9]。但也有学者指出，对于水声的掩蔽效果还需进行更准确的研究，以及探究具体拥有何种物理表征的水声会给人带来更好的感受等[9-13]。台湾大学于 2015 年开展了一项研究，探讨如何将水声作为减少居住空间压力的工具[12]。许晓青等[11] 以武陵源世界遗产地为案例，探讨了音频-视觉交互对声景评估的影响。此外，莫尔科夫基纳等[14] 通过声音的知觉反应实验研究水声在声景感知中的重要性，为水声景设计和康复景观设计提供了重要参考。水声景感知的相关研究为保护地旅游管理提供了理论依据及相应基础，但较少有将主观感知与声景指数结合分析的研究。

基于此，本研究将围绕不同水环境条件下声景指数及游客感知差异展开，关注以下方面：1）不同水环境下九寨沟声景指数的差异性特征；2）不同水环境下九寨沟游客感知的差异性特征；3）以水环境为载体，揭示游客主观感知与客观水环境测度之间的关系。

1　研究区概况

九寨沟世界自然遗产地（33.20°N，103.82°E）位于四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县境内，地处青藏高原东缘岷山山脉中段尕尔纳峰北麓，是长江水系嘉陵江源头的一条大支沟，流域面积约 651.34 km^2，因沟内有树正、荷叶、则查洼等 9 个藏族村寨而得名，于 1992 年被列入联合国教科文组织世界遗产名录。九寨沟流域最大相对高差达 2 768 m，最大高差之间水平距离约 46 km，在不同区域间形成了不同的地形、地貌、植被和水文组合，九寨沟是一个以水生态为主的自然风景区，因其美丽的水景而闻名于世。本文选取九寨沟世界自然遗产地作为研究区域，重点关注 3 类水环境的声景感知，包括瀑布、海子和钙华滩流。

2 研究方法

2.1 不同水环境音频提取

1977 年出版的 *The Tuning of the World* 中，加拿大作曲家 R. M. Schafer 通过与“聆听漫步（listening walk）”对比，首次提出“声漫步（Soundwalk）”的概念[15]。随后，声景生态学家 Westerkamp[16] 指出，对整个环境的聆听是声漫步过程的灵魂，并从漫步地点、聆听过程等方面为声漫步的实施前提作了简要分析，Dietze 和 Ruebsaat[17] 强调了参与者的听觉神经需要高度集中。

声漫步法是一种以获取特定区域声环境价值的实地调研方法，其优势是调动感官，较之于实验室方法有更好的现场感。基于九寨沟特殊的水环境自然环境特征、景观结构、交通布局、人流规律、突出景观分布等，选择九寨沟树正沟、则查洼沟、日则沟 3 条声漫步路线以提取不同水环境的音频（图 1）。

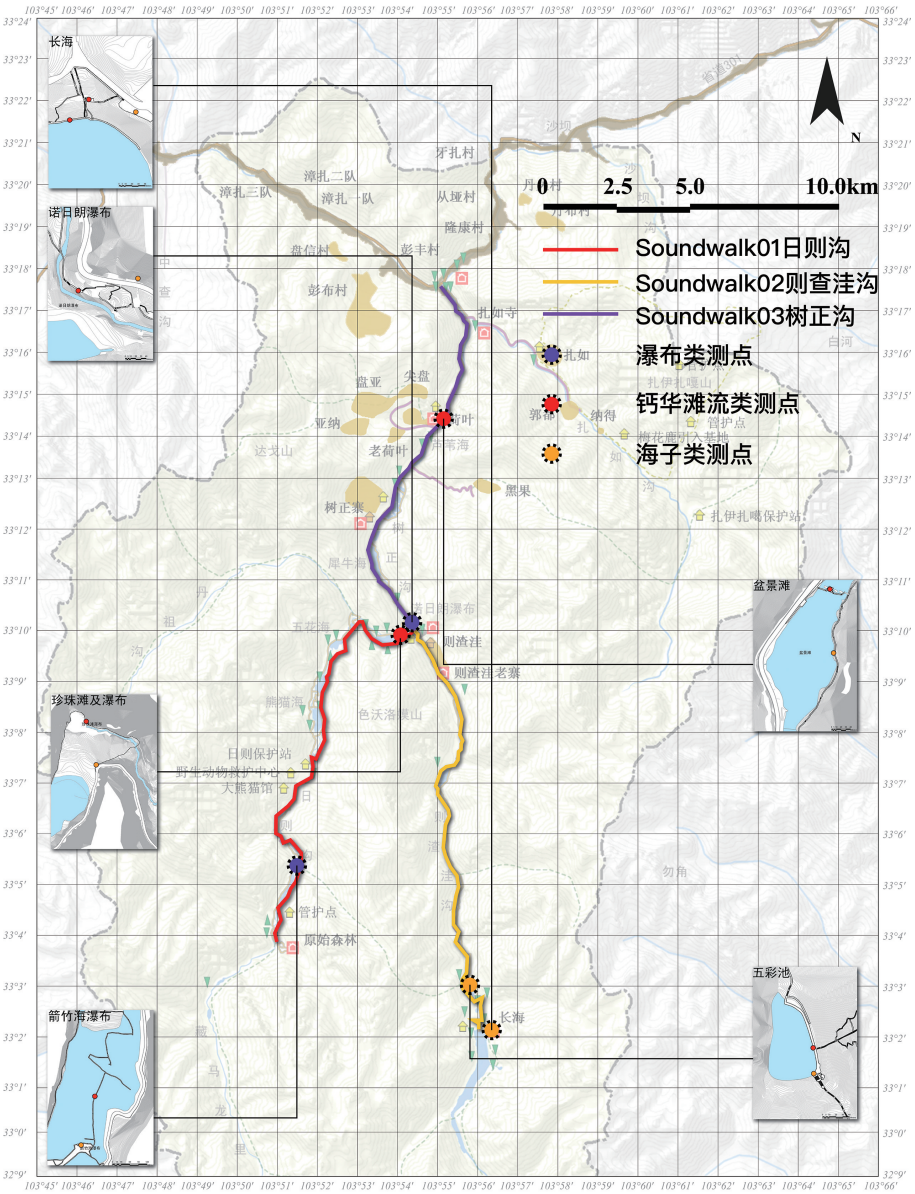


图 1 九寨沟声漫步法调查路线及测点分布图

本次声漫步调研时间选择在 2022 年 7 月夏季天气晴朗、温度在 25 ℃～32 ℃的天气下进行，测量时间为上午（8：00—11：30）和下午（13：00—17：00）。考虑道路可达性，选择在声景和视觉景观都具有代表性的 3 类不同水环境 6 个地点进行声压级测量，分别为箭竹海瀑布、诺

日朗瀑布、五彩池、长海、珍珠滩、盆景滩(图 1)。声漫步调查采用手持式声音收集设备 ZOOMH6 进行声音信号记录，每个测点记录 5 段音频，记录内容包括 A 计权等效声压级及频率，单次记录时间为 1 min，记录时间间隔为 5 min，采样率为 44.1 Khz、16 bit。

2.2　游客感知满意度

在调研过程中，对瀑布、海子、钙华滩流 3 种类型水环境测点分别向游客发放李克特量表问卷。对于主观感知评价，从文献中筛选出频率高、共性关联度高的代表性因子，即 C1 清晰度、C2 节奏感、C3 自然度、C4 悦耳度、C5 丰富度、C6 协调度 6 项指标[18]，这些因子也是进行水声感知满意度评价的主要因子。C1 清晰度是指声音中各种声音元素是否分明、好辨别；C2 节奏感是指声音听起来是否具有很好的节奏感；C3 自然度是指声音来源是人工的还是自然的；C4 悦耳度是指人所听到的声音是否愉悦；C5 丰富度是指听到的声音是否丰富多样；C6 协调度是指各种声音交织在一起与周围环境的和谐程度[18]。

2.3　声景指数

声景指数是指通过计算声能在时间和频率上的连续分布，使得原先依靠图像进行动态变化观测的周期大大缩短。tune R、soundecology、seewave 等基于 R 语言的程序包可以实现指数的计算。

生物多样性评估被认为是群落内多样性（α）和群落间多样性（β）的乘积[19]，声景指数同样也分为 α 和 β 两种。α 指数用于评估单个单元的声学多样性，分析一个种群、一个群落或一个特定时间的景观内的情况；β 指数用于比较两个单元的声学多样性，比较来自两个不同地点的两个群落或同一群落在一年中两个不同时期的区别[20]。表 1 例举了 8 个常用于评估生物多样性的声景指数。在本研究中采用声景指数工具计算 3 类水环境（瀑布、海子、钙华滩流）的录音样本的声景指数，并将其与主观感知建立联系。

表 1　常用声景指数

指数名称	公式
声复杂性指数(Acoustic complexity index, ACI)[21]	$ACI = \frac{D}{\sum_{k=1}^{n} I_k}$ D 为同一个频率相邻帧间的声强绝对差值，I_k 为声强
声多样性指数(Acoustic diversity index, ADI)[22]	$ADI = \sum_{i=1}^{S} p_i \ln p_i$ p_i 为声信号在第 i 个频段所占比例，s 为频段数量
声均匀性指数(Acoustic evenness index, AEI)[22]	$AEI = Gini(x)$ x 为每个频带高于特定声压阈值(默认为-50dB FS)的声信号比例
时间熵指数 H_t(Temporal entropy index)[23]	$H_t = \sum_{t=1}^{n} A(t) \times \log_2 A(t) \times \log_2 (n) - 1$ $H_t \in [0,1]$；t 为时间，$A(t)$ 为振幅
频谱熵 H_f(Spectral entropy index)[23]	$H_f = \sum_{t=1}^{N} S(f) \times \log_2 S(f) \times \log_2 (N) - 1$ $H_f \in [0,1]$；t 为时间，$S(f)$ 为平均频率谱
归一化差异声景指数(Normalised difference soundscape index, NDSI)[24]	$NDSI = \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha}$ $NDSI \in [-1,1]$；β 是生物声功率谱密度，α 是人类声功率谱密度
振幅指数 M(Amplitude index)[23]	$M = median(ai) \times 21 - depth$ $M \in [0,1]$
生物声学指数(Bioacoustic Index)[25]	

2.4　数据分析

首先，借助 R 语言对比 3 类水环境声景指数及游客感知差异，并依据数据的正态性选择非参数检验或单样本 ANOVA 分析，通过 0.01 水平上的显著性检验，识别出对不同水环境类型有显著差异的声景指数及游客感知的相关指标。其次，将游客感知进行加权聚合得到总体满意度并采用斯皮尔曼相关性计算各声景指数与游客感知满意

度的相关系数与显著性水平。最后，结合相关性与显著性讨论分析声景指数与游客感知满意度的关系。

3 结果与分析

3.1 不同水环境的声景指数差异

如表 2 所示：就指数差异性而言，瀑布的 Hf、Ht、M、ADI、BIO 指数较高，海子的 AEI、ACI 指数较高；瀑布、海子、钙华滩流三者的 NDSI 指数组间差异不大。Hf、Ht 通过计算声样本的 Shannon 均匀度表征了声样本的异质性和单位时间/频率的变化度，瀑布的 Hf、Ht 声景指数均大于钙华滩流和海子，表明在九寨沟水环境的测点中，瀑布环境的声音变化较快，异质性较高。M 是振幅指数测度，表征了声样本所处环境的声压级水平，瀑布的 M 指数显著大于钙华滩流和海子，这说明瀑布的声压级水平最高，这也与常识相符。ACI 测量声音频率变化的多样性，AEI 测量声音在不同频段分布的均匀情况，这两个指数都与声样本所处环境的生物多样性水平相关，海子这两个指数较高，说明海子受人类活动影响较小，自然环境比较优越，具有较高的生物多样性水平。

如表 3~4 所示，九寨沟水环境的类型（即瀑布、海子、钙华滩流）对 Hf、AEI、ADI、ACI、BIO、M、Ht 7 类声景指数具有显著（$P<0.01$）影响，对 NDSI 的影响不显著（$P>0.05$）。

表 2 九寨沟 3 类水环境的声景指数描述性统计

指数类型	指数名称	瀑布	海子	钙华滩流
频谱熵	Hf	0.834	0.228	0.743
声均匀性	AEI	0.244	0.900	0.765
声多样性	ADI	2.128	0.012	0.886
声复杂性	ACI	150.876	183.546	151.411
归一化声景差异	NDSI	0.089	0.095	0.138
生物声学	BIO	5.369	3.765	2.591
振幅	M	0.074	0.015	0.029
时间熵	Ht	0.074	0.015	0.029

表 3 九寨沟 3 类水环境的声景指数 Kruskal-Wallis 非参数检验

Index	chi-squared	df	*P*
Hf	20.191	2	4.13E-05 **
AEI	25.129	2	3.50E-06 **
ADI	25.129	2	3.50E-06 **
ACI	21.525	2	2.12E-05 **
M	19.714	2	5.24E-05 **
Ht	19.714	2	5.24E-05 **

注：** 代表 $P<0.01$，下同。

表 4 九寨沟 3 类水环境的声景指数单样本 ANOVA 分析

Index	Df	Sumsq	Meansq	Statistic	*P*
NDSI	2	0.014	0.007	0.131	0.878
BIO	2	38.899	19.450	19.919	4.85E-06 **

3.2 不同水环境的游客感知差异

如表 5 所示，就感知差异性而言，海子的总体满意度最高，明显优于其他两者。从清晰度来看，海子的感知清晰度最高，意味着人们对海子的描述或声音有更清晰、明确的理解；从节奏感来看，钙华滩流的节奏感得分最高，可能意味着它给人的节奏感更强，或者描述中包含了更明显的韵律；从自然度来看，海子的自然度得分最高，表明人们对海子的描述或声音感觉更接近自然，可能是更真实的自然景观或更自然的音效；从悦耳度来看，钙华滩流的悦耳度得分最高，意味着它给人的听觉享受更强；从丰富度来看，海子和钙华滩流的丰富度得分相近，都表现出一定的丰富性，但海子稍高一些；从协调度来看，海子和钙华滩流的协调度得分较高，表明其各方面的元素和谐统一，给人的整体感受较好。

如表 6 所示，九寨沟水环境的类型（瀑布、海子、钙华滩流）对游客的清晰度、节奏感、自然度、悦耳度、丰富度、协调度感知具有显著（$P<0.01$）影响。

表 5 九寨沟 3 类水环境游客感知评价

感知类型	瀑布	海子	钙华滩流
清晰度	1.265	4.345	2.81
节奏感	2.42	1.34	3.85
自然度	1.575	5.36	3.275
悦耳度	1.27	3.85	4.965
丰富度	2.505	4.645	3.645
协调度	2.3	4.34	4.1
总体满意度	11.335	23.88	22.645

表 6 九寨沟 3 类水环境的感知评价单样本 ANOVA 分析

Index	Df	Sumsq	Meansq	Statistic	*P*
清晰度	2	94.864 33	47.432 166 7	64.536 64	2.27E-15 **
节奏感	2	63.409 33	31.704 666 7	32.059	4.69E-10 **
自然度	2	143.756 3	71.878 167	66.292 18	1.33E-15 **
悦耳度	2	143.684 3	71.842 166 7	104.046 3	9.45E-20 **
丰富度	2	45.861 33	22.930 666 7	28.458 32	2.69E-09 **
协调度	2	49.728	24.864 000	21.118 91	1.37E-07 **

3.3 不同声景指数与游客感知的相关关系

将总体满意度与 Hf、AEI、ADI、ACI、

NDSI、BIO、M、Ht 8 个声景指数相关联，结果（图 2）可以看出，总体满意度与 AEI 成正相关，与 ADI、Ht、M 成负相关，与 NDSI、Hf、BIO、ACI 不相关。其中，AEI 与自然度、丰富度、清晰度、协调度、悦耳度均呈显著正相关，ADI、Ht、M 与自然度、丰富度、清晰度、协调度均呈显著负相关。

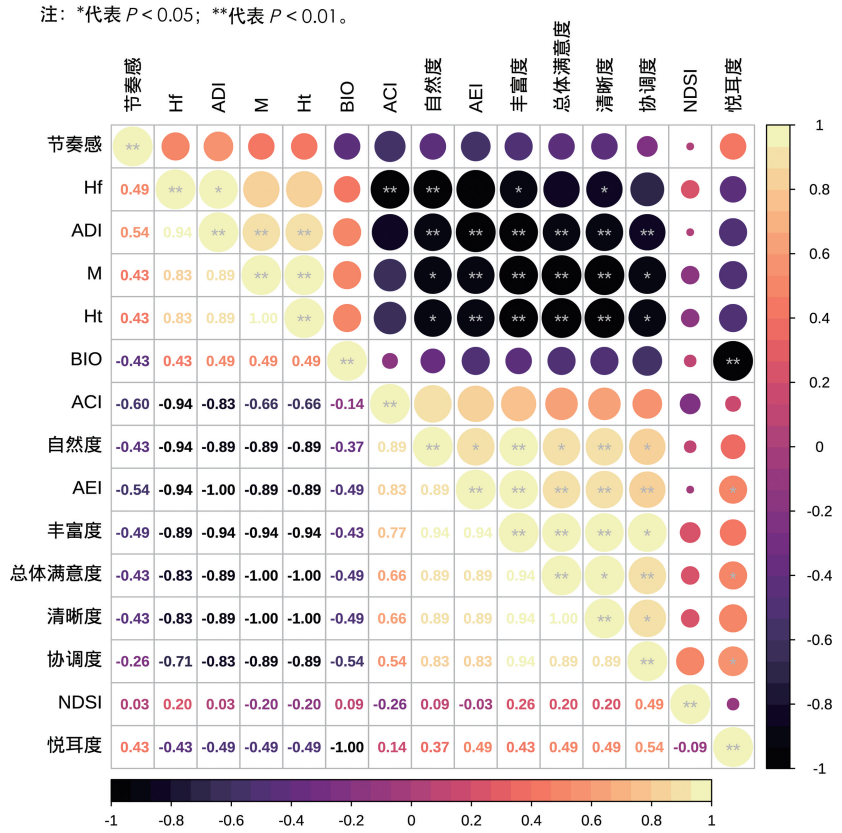


图 2　九寨沟水环境感知评价与声景指数相关性

4　讨论

九寨沟 3 类水环境对游客的清晰度、节奏感、自然度、悦耳度、丰富度、协调度感知具有显著（P<0.01）影响，这与 Amberger 等[26]的研究结果相似。

AEI 通常反映环境中自然声音的多样性和质量，声景的生态健康度越高，游客的满意度越高。AEI 与自然度、丰富度、清晰度、协调度、悦耳度均呈显著正相关，可能是因为更自然、更丰富、更清晰和更协调的声音环境能够显著提升游客的听觉体验和满意度[27]。ADI 与总体满意度成显著负相关，原因可能是声音过于多样化时，会包含一些干扰性或不和谐的声音，从而降低了游客的满意度[28]。ADI 与自然度、丰富度、清晰度、协调度均呈显著负相关，表明声音多样性过高可能导致听觉体验的复杂性增加，反而对自然景观的和谐感产生负面影响[28]。Ht 和 M 均与总体满意度成显著负相关，Ht 和 M 的高值通常意味着声音来源的多样性和分布的复杂性，这可能会导致声音环境的混乱和不协调，从而降低游客的满意度。Ht 和 M 与自然度、丰富度、清晰度、协调度均呈显著负相关，进一步支持了这一观点。NDSI、Hf、BIO、ACI 与总体满意度不相关。这可能表明这些指数在当前环境中对游客满意度的影响相对较小，或者其影响较为复杂和间接。

由于自然保护地水环境生态系统是生态自然、个人特征、文化地域特质共同组成的复杂系统，具有丰富的生物多样性水平和完整的生态系统特征，常常与游客多维度的感知评价、区域特异性、游客个人特征等要素之间存在复杂非线性耦合关系。

因此，未来针对自然保护地水环境下的游客感知研究可以从以下几方面进行提升和优化：1）

进一步挖掘自然保护地的内在特征。针对不同的水环境和形态特性，对游客进行引导，比如九寨沟的海子代表了一类典型的信噪比（SNR，它量化了信号相对于背景噪声的相对重要性。信噪比公式是计算信号幅值与背景噪声幅值的比值。）很高的水环境场景，在问卷评价中，海子被评价为清晰度最高。针对这种场景应该更多地引导人们去听前景声部分，如鸟类的声音，并通过视复疗性来提升游客的感知。针对钙华滩流的悦耳度得分最高，可通过游线设计来引导游客对景观进行欣赏。2）开展区域特异性研究。不同地区的自然保护地水环境具有独特的地理、生态和文化特征，因此其对游客感知的影响也可能存在差异，未来研究可以针对不同地理区域展开，深入探讨地域特异性对游客感知的影响机制。3）分析游客特征。游客的个人特征和文化背景也可能影响其对自然环境的感知和态度，未来研究可以结合游客的社会经济特征、文化背景、心理特征等因素，分析不同类型游客对自然保护地水环境的感知差异，从而为个性化游客体验和管理提供参考。4）长期监测与追踪。自然环境是动态变化的，长期的监测和跟踪研究可以帮助我们更好地理解自然保护地水环境对游客感知的变化趋势，及时调整管理策略和保护措施。

5 结论

瀑布、海子、钙华滩流因其不同特性带来不同感知体验：丰富的生物多样性和声音景观可能增强游客的亲近感，而过于复杂的声音可能干扰游客的游憩体验。

九寨沟自然保护地的不同水环境条件造就了声景指数的差异。瀑布在 Hf、Ht、M 指数上呈现出与其他两类水环境的差异，说明瀑布的声音变化较快，声压级水平和异质性均较高；海子在 ACI、AEI、NDSI 指数上呈现出与其他两类水环境的差异，说明海子受人类活动影响较小，自然环境比较优越，具有较高的生物多样性水平。

九寨沟不同水环境条件也造就了游客感知的差异。海子在清晰度、自然度和丰富度方面，与另外两种水环境存在明显差异；钙华滩流在节奏感、悦耳度方面，明显差异于另外两种水环境，表明游客更青睐海子和钙华滩流这两类水环境。

声景指数与游客感知存在相关关系。AEI、ADI、Ht、M 指数是造成总体满意度差异的主要因素。

因此，管理者可以根据环境中不同的声多样性和生物多样性特征，在保护生态系统的基础上，有针对性地设计游客体验项目和保护措施。只有兼顾游客的需求和体验，方可实现自然保护和可持续旅游的双赢。

参考文献

[1]SCHAFER R M.The soundscape:Our sonic environment and the tuning of the world[M].Rochester:Destiny Books,1993,1994.

[2]韩亚洁,许大为.我国声景观研究现状与展望:基于科学知识图谱分析[J].中国城市林业,2023,21(4):120-126.

[3]康健.城市声环境论[M].戴根华,译.北京:科学出版社,2011.

[4]DESJONQUÈRES C,RYBAK F,CASTELLA E,et al.Acoustic communities reflects lateral hydrological connectivity in riverine floodplain similarly to macroinvertebrate communities[J].Scientific Reports,2018,8(1):14387.

[5]GOTTESMAN B L,FRANCOMANO D,ZHAO Z,et al.Acoustic monitoring reveals diversity and surprising dynamics in tropical freshwater soundscapes[J].Freshwater Biology,2020,65(1):117-132.

[6]DESJONQUÈRES C,RYBAK F,DEPRAETERE M,et al.First description of underwater acoustic diversity in three temperate ponds[J].PeerJ,2015,3:e1393.

[7]DECKER E,PARKER B,LINKE S,et al.Singing streams:Describing freshwater soundscapes with the help of acoustic indices[J].Ecology and Evolution,2020,10(11):4979-4989.

[8]谢辉,程语,葛煜喆,等.中国古典园林水声景的空间营造手法探析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(3):123-130.

[9]JEON J Y,LEE P J,YOU J,et al.Acoustical characteristics of water sounds for soundscape enhancement in urban open spaces[J].The Journal of the Acoustical Society of America,2012,131(3):2101-2109.

[10]DE COENSEL B,VANWETSWINKEL S,BOTTELDOOREN D.Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise[J].The Journal of the Acoustical Society of America,2011,129(4):148-153.

[11]许晓青,庄安頔,韩锋.主导音对自然保护地声景感知情绪的影响:以武陵源世界遗产地为例[J].中国园林,2019,35(8):28-33.

（下转第 174 页）