DOI: 10.5846/stxb201809071919
陈歆,靳甜甜,苏辉东,林俊强,王东波,刘国华,张俊洁.拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用.生态学报,2019,39(3): - .
Chen X, Jin T T, Su H D, Lin J Q, Wang D B, Liu G H, Zhang J J.Construction and application of health assessment index system for Lhasa River.Acta Ecologica Sinica,2019,39(3): - .

拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用

陈　歆[1],靳甜甜[2],苏辉东[2],林俊强[2],王东波[3],刘国华[4,5,*],张俊洁[2]
1 西藏自治区环境保护厅,拉萨　850002
2 中国水利水电科学研究院,北京　100038
3 呼伦贝尔市环境监测中心站, 海拉尔　021008
4 中国科学院生态环境研究中心,北京　100085
5 中国科学院大学资源与环境学院,北京　100049

摘要:为全面反映拉萨河干流生态环境现状,基于拉萨河特征和国内外研究构建了包含水文、水质、生物、生境、服务功能 5 个要素 12 个指标的河流健康评价指标体系,提出了赋值标准,并在拉萨干流进行了应用。评价所用数据来自资料收集、文献调研、现场监测和调查。评价结果显示拉萨河干流整体处于较为健康状态,且上游健康状况优于中下游。上游河段枯水期水质达到 I 类水功能区水质目标,丰水期氨氮含量未达到 I 类水功能区水质目标,总达标率为 50%,赋 50 分,其余指标赋值大于 75 分;中游河段受水电站运行和灌溉引水影响,流量过程变异程度、河流连通阻隔状况、大型底栖无脊椎动物科级耐污指数赋值较低,分别为 0 分、25 分和 45 分,生态基流保障度、外来鱼类入侵率、河道稳定性指标较上游变差,赋值在 50—75 分之间,其余指标赋值大于 75 分;下游河段流量过程变异程度、外来鱼类入侵情况赋值为 0 分,河流连通阻隔状况与中游相同为 25 分,大型底栖无脊椎动物科级耐污指数赋 45 分,河道稳定性赋 68 分,其余指标赋值大于 75 分。从河流健康角度分析,未来拉萨河流域管理应重点关注上游湿地面源问题、中下游水利水电工程的综合效应、人类聚集区鱼类入侵等问题。

关键词:拉萨河;河流健康;指标体系;面源;物种入侵

Construction and application of health assessment index system for Lhasa River

CHEN Xin[1], JIN Tiantian[2], SU Huidong[2], LIN Junqiang[2], WANG Dongbo[3], LIU Guohua[4,5,*], ZHANG Junjie[2]
1 *The Tibet Autonomous Region Environmental Protection Bureau*, *Lhasa* 850002, *China*
2 *Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*
3 *Hulunbeier Environmental Monitoring Center*, *Halar* 021008, *China*
4 *Research Center for Eco-Environmental Sciences*, *the Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100085, *China*
5 *College of Resources and Environment*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*

Abstract: To reflect comprehensively the health statement of the Lhasa River main stream, a river health evaluation index system including 14 indexes involving hydrological water resources, water quality, biology, habitat, and service functions was constructed based on the characteristics of the Lhasa River and domestic and foreign research. The health evaluation index system was applied to the Lhasa River. The data used in the evaluation came from data collection, literature research, and field monitoring and investigation. The evaluation results showed that the Lhasa River is generally in a relatively healthy state, and the health statement of the upper reaches was better than the middle and lower reaches. The water quality of the upper reaches fulfilled the requirement of a Class I water function area during the dry season; however, in the wet season, ammonia nitrogen content exceeded the concentration limit prescribed for a Class I water function area. The total water

基金项目:西藏自治区重点科技计划项目(Z2016C01G01/08); 国家重点研发计划(2016YFC0502103)
收稿日期:2018-09-07;　　**修订日期**:2019-01-02
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ghliu@ rcees.ac.cn

qualification rate was 50% and scored 50. The remaining indexes of the upper reaches scored more than 75. Affected by hydropower stations and irrigation projects, the degree of variation in the flow process, river connectivity barrier, and family biotic index scored 0, 25, and 45 respectively in the middle reaches; ecological base flow security degree, invasive percentage of exotic fish, and river stability scored between 50 and 75; the other indexes of midstream scored over 75. Degree of variation in the flow process and invasive percentage of exotic fish scored 0 for downstream; river connectivity barrier scored 25; family biotic index scored 45; river stability scored 68; the other indexes of the lower reaches scored more than 75. From a river health perspective, the future management of the Lhasa River basin should focus on non-point source pollution from wet land, the comprehensive effect of hydropower station and irrigation projects, and the invasion of the river by exotic fish.

Key Words: River health; assessment; index system; Lhasa River

河流生态系统提供给人类多种生态服务,包括气候调节、生物多样性维持、供水、航运、渔业、文化娱乐等多个方面[1-4],而生态系统服务功能的实现以生态系统合理结构和健康过程为基础。随着人类社会的不断进步,人类对自然生态系统干扰逐渐加剧,河流生态系统河道形状、水生生物组成、河流连续性、水文和生物过程等发生变化,进而影响到其功能的发挥[5-6]。

“河流健康”概念最早在 1972 年在美国的《水污染控制修正法》中提出,至今河流健康内涵仍未统一。Karr 等将河流生态系统平衡、完整和适应性作为河流是否健康的评价标准[7];Schofield 认为未受干扰的(原始的)的河流处于健康状态,而其它河流健康状况可通过其与相同类型未受干扰河流的相似程度来评价[8];文伏波将生态良好、满足人类需求,可实现水资源可持续利用的河流定义为健康河流[9]。美国、英国、澳大利亚、瑞典等多个国家提出了不同的评价指标体系和评价方法[2,4,7],中华人民共和国水利部也在 2010 年出版了《河流健康评估指标、标准与方法 V1.0》,用于指导全国河流健康评价试点工作。综合来看,河流健康评估主要从水文、水质、栖息地和生物等四个方面开展指标体系的构建,但由于河流健康评价指标和方法需根据评价对象地理特征、气候条件、经济发展状况和社会需求等条件制定,因此目前并无统一标准和方法。虽然河流健康的内涵、评价标准和评价方法尚未统一,但是河流健康评价重点关注河流生态系统状况,使其既能满足人类生产生活需求,又能实现河流生态系统可持续发展,成为河流管理的重要手段。

拉萨河位于青藏高原东南部,是雅鲁藏布江五大支流之一。河流中下游地区地势平坦、水土资源条件较好,是整个西藏自治区人口和耕地最为密集区域,同时该流域还是西藏自治区政治和文化中心。为维护实现拉萨河流域社会经济和生态环境的协调发展,对拉萨河合理有效的开发利用是关键领域之一。但近年来流域内工业发展加速、人口密度增加、农田灌溉面积扩大、鱼类放生活动增加,成为拉萨河河流健康和生态环境保护的潜在风险。目前,该流域出现了本地鱼类资源减少、外来物种入侵[10-11],农业面源污染[12],河流水质恶化[13-15]等生态环境问题,此外气候变化可能带来的径流和植被变化[16]也会对河流健康状况产生潜在影响。因此,为做好该流域生态环境保护工作,应在了解拉萨河流域河流健康现状和存在的主要问题的基础上,有针对性地开展保护和研究工作。本文基于拉萨河生态环境和社会经济发展特点,从水文、水质、生物、生境和服务功能等五个方面[17-18],构建了拉萨河流域河流健康评价指标体系,并进行了应用,其结果可以为拉萨河流域河流管理、保护工作提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

拉萨河发源于念青唐古拉山中段南麓澎错玛朵山峰,干流由东北向西南流动,河道比降 0.29%,主河道长度 551 km,于曲水县汇入雅鲁藏布江中游,多年平均流量 1.1×10^{10} m^3,干流沿程有众多支流汇入,拉萨河干流建有多个水利水电工程,其中旁多水利枢纽和直孔水电站对河流水文过程具有显著调节作用。拉萨河流域属高原温

带半干旱大陆性气候区,降水主要受西南季风的影响,而且影响的程度由东北向西南,即降水由上游向下游呈递减趋势,降雨主要集中在 6—9 月、多夜雨,旱季 10—5 月份、降雨稀少。流域内部高原湿地众多,上游源头麦地卡湿地是国家级自然保护区,中下游地区分布有拉鲁湿地、江夏热湿地、巴嘎雪湿地、茶巴朗湿地、甲玛湿地等[19-20],这些湿地对于流域水循环、水质保护和生物多样性维护具有重要意义。拉萨河流域概况如图 1 所示。

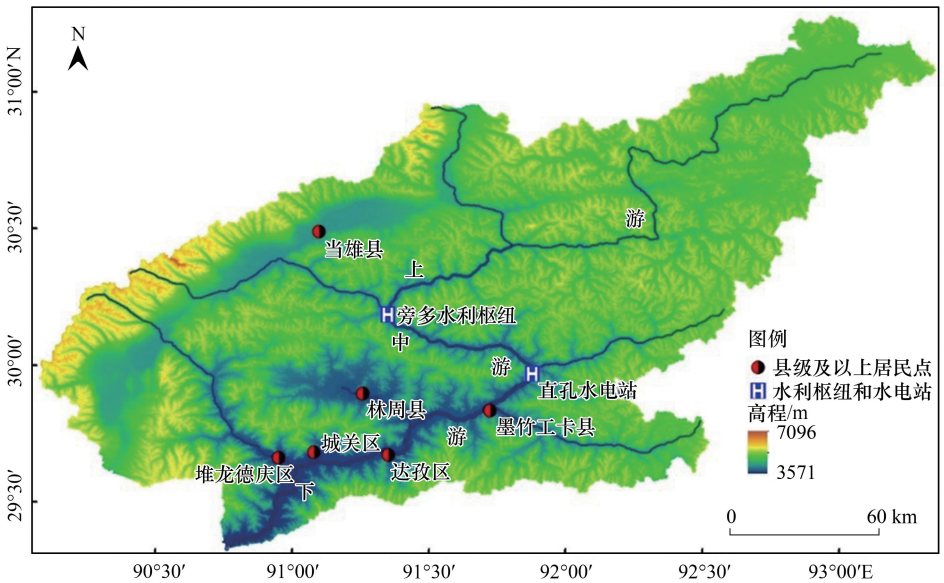

图 1　拉萨河流域概况图

Fig.1　Overview of Lhasa River basin

1.2　河流健康评价指标体系构建

1.2.1　指标体系构建原则及步骤

指标体系的构建的是河流健康评价的基础,指标体系的科学性、合理性和有效性,直接决定了河流健康评价结果的可信度。拉萨河河流健康评价指标体系构建遵循以下原则:(1)目标明确,可指导河流生态保护工作。(2)普适性,具有较多应用,并被证明适应性较好。(3)能突出拉萨河流域生态环境特色。(4)操作性强,评价数据和资料较容易获取。(5)可量化客观性指标。(6)指标体系全面、相对独立、指标之间不重复。

基于以上原则,拉萨河河流健康评价指标体系构建步骤如下:首先,通过文献调研,对目前河流健康评价指标体系构建、指标体系量化方法、指标量化需要的数据或者资料来源、指标权重的确定等方面研究进行全面分析,确定几种适合的评价指标体系供选择;其次,通过现场考察、文献调研和专家访谈,对拉萨河流域地形地貌、气候、社会经济和人文等生态环境和社会特征进行分析,明确拉萨河河流健康评价应涵盖的主要方面;再次,进行指标库的构建及筛选。综合考虑国内外采用的指标体系,结合拉萨河流域生态环境特点和社会经济特征,筛选评价指标,构建评价指标体系;最后,咨询相关专业的专家学者,对构建的指标体系进行适当调整,最终得到拉萨河河流健康评价指标体系。

1.2.2　指标体系构建及指标内涵

根据拉萨河河流特征,参考国内外已往研究[21-22]构建了包含水文、水质、生物、生境、服务功能等 5 个要素 13 个指标的拉萨河河流健康评价指标体系,各要素指标见表 1。

(1)水文

河流水文条件是河流生态系统各种理化和生物过程的基础,水文条件变化会引起河流生态系统一系列改变,在国内外河流健康评价中,水文指标是指标体系重要组成部分。为全面反映河流水文状态变化,采用 C11 河流压力指数(Flow stress index)、C12 流量过程变异程度(Degree of variation in the flow process)、C13 生态基流保障度(Ecological base flow security degree)三个指标,反映水量、流量过程变异以及不同水期流量变化。

表 1 拉萨河河流健康评价指标体系

Table 1 Lhasa River health evaluation index system

目标层 Target level	准则层 Criterion level	指标层 Index level	指标含义 Index interpretation	计算方法 Calculation method
河流健康 A River health	水文 B1	河流压力指数 C11[23]	人类活动或全球气候变化对河流各项水文要素的干扰程度	C11 = (*LF*+*HF*+*CV*+*PZ*+*SP*)/5 式中:*LF* 为低流量指标,*HF* 为高流量指标,*CV* 为变差系数,*PZ* 为极端低流量比率指标,*SP* 为季节性周期指标
		流量过程变异程度 C12[24]	评估河段年内实测月径流量与天然月径流过程的差异	评估年逐月实测径流量与天然月径流量的平均偏离程度。$H_y = \left[\sum_{m=1}^{12}\left(\frac{q_m - Q_m}{\bar{Q}_m}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$ $\bar{Q}_m = \frac{1}{12}\sum_{m=1}^{12} Q_m$。式中,$q_m$ 为评估年实测月径流量;Q_m 为天然月径流量;$\bar{Q}_m$ 为天然月径流量年平均值
		生态基流保障度 C13 [25]	生态基流指维持河流基本形态和基本生态功能,保证水生态系统基本功能正常运转的最小流量	生态基流的计算方法较多,此处利用水利水电工程环评批复要求的生态基流保障度来表征
	水质 B2	水功能区水质达标率 C21[26]	评估河段水质满足水功能区水质目标的比例	C21 = WFZP/*N*×100 式中,C21 为河流水功能区水质达标率;WFZP 为评估河段内水质达到水功能区水质目标的断面数;*N* 为评估河段水质监测断面总数
		耗氧有机污染状况 C22[27]	耗氧有机污染物是指导致水体中溶解氧大幅下降的有机污染物	可取高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮等指标对河流耗氧有机污染状况进行评估,但由于流域面积较大,较难准确确定五日生化需氧量数值,本文利用高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮等三项指标进行评估
		重金属污染状况 C23[28]	重金属污染是指水体中含有的汞、镉、铬、铅、砷等生物毒性显著的重金属元素及其化合物对水的污染	选取汞、镉、铬、铅、砷等 5 项指标汛期和非汛期浓度,分别评估汛期和非汛期赋值情况,同一监测样点取 5 个水质指标最低赋值作为该点重金属污染状况指数的赋值
	生物 B3	外来鱼类入侵率 C31[11]	发现外来鱼类断面数占总调查断面总数的百分比	C31 = 发现外来鱼类调查断面数/调查断面总数
		大型底栖无脊椎动物科级耐污指数 C32[29-30]	反映底栖动物对外界环境各种污染物的综合耐受能力,根据不同科对污染物的耐受程度赋予不同耐污值	按科级分类单位统计,耐污值主要参考“中国常见科耐污值” $C32 = \sum n_i T_i / N$ n_i 为科 *i* 的个体数;T_i 为科 i 的耐污值;*N* 为总个体数
	生境 B4	河道稳定性指标 C41[27]	河道稳定性指不同年份河流水流路径空间变异程度	$A_r = \frac{A_1}{A_0}$, $S_r = \frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_0}$, $\omega = \frac{s}{S}$ A_r 为河流水面面积指数,A_1 为现状河流淹没面积,A_0 为历史河流淹没面积,S_r 为河流蜿蜒性指数,ω 为河流蜿蜒度,ω_1 为现状蜿蜒度,ω_0 为历史蜿蜒度,s 为流域长度,S 为河流主河道长度
		河流联通阻隔状况 C42[31]	河流连通阻隔状况评估河流上水库、堤坝建设状况,进而对鱼类等生物物种迁徙及水流与营养物质传递产生阻隔作用	$C42 = 100 + \min[(DAM_r)_j, (GATE_r)_j]$ $(DAM_r)_j$ 为评估断面下游河段大坝阻隔的赋值,$i = 1 \sim NDAM$,*NDAM* 为评估断面下游至河口(或干支流汇合口)的大坝数量;$(GATE_r)_j$ 为评估断面下游河段水闸阻隔的赋值,$j = 1 \sim NGATE$,NGATE 为评估断面下游至河口(或干支流汇合口)的水闸数量
	服务功能 B5	防洪安全指数 C51[17]	河流的防洪排涝安全保障程度	$C51 = Y_1/Y_0$ Y_0 为河道总长度,Y_1 为符合防洪标准的河道长度
		水资源开发利用率 C52[17]	水资源开发利用程度	$C52 = U_w/C_w$ U_w 为水资源利用总量,C_w 为水资源总量

(2)水质

基于西藏自治区环境监测中心站以往水质监测结果,采用 pH、高锰酸盐指数、氨氮、挥发酚、砷、汞、铬(六价)、铅、镉、铜、锌、氟化物、石油类等 13 个水质指标计算干流上、中、下游 C21 水功能区水质达标率(Water qualification rate)取值。除此之外利用 C22 耗氧有机污染状(Oxygen consuming organic pollution)反映水体中耗氧有机物状况,该指标由高锰酸钾指数、化学需氧量和氨氮三个指标组成。拉萨河流域矿产资源丰富,拉萨河中上游地区矿产资源开发可能对干流水质产生影响,本文利用汞、镉、铬、铅、砷等 5 种重金属浓度计算 C23 重金属污染状况指数(Heavy metal pollution),反映干流重金属浓度状况。

(3)水生态

水生态指标选用 C31(Invasive percentage of exotic fish)外来鱼类入侵率和 C32 大型底栖无脊椎动物科级耐污指数(Family biotic index)表征。鱼类是河流生态系统中的顶级生物,可很好反映河流生态系统健康状况。90 年代以来,不断有研究表明捕捞、放生等一系列人类活动导致拉萨河干流本地鱼类减少或灭绝、外来鱼类入侵;入侵物种已经成为威胁拉萨河水生态安全的重要因素。拉萨河鱼类资源调查数据相对匮乏,加之对鱼类资源调查方式、捕捞方式、捕捞时间、捕捞地点的差异性,导致少数样点鱼类资源调查结果代表性较差。相对于少数断面鱼类调查结果,区域尺度鱼类资源调查结果代表向较强;相对于丰富度和鱼类大小,物种数的变异性较小,本文利用拉萨河河流外来鱼类入侵率反映水生态状况。此外,利用大型底栖无脊椎动物科级耐污指数 C32(Family biotic index)根据不同科对污染物的耐受程度赋予不同耐污值,反映底栖动物对外界环境各种污染物的综合耐受能力。

(4)河流生境

生境指标选取 C41 河道稳定性(River stability)、C42 河流联通阻隔状况(River connectivity barrier)2 个指标表征。河道稳定性指不同年份河流水流路径空间变异程度,河岸或者河床不稳的情况下,水流流动形态会发生变化,本文采用河流蜿蜒度和水面面积指数来反应河道的稳定性。河流连通阻隔状况用于评估河流上水库、堤坝建设对鱼类等生物物种迁徙及水流与营养物质传递产生的阻隔作用,利用评价河段闸坝阻隔状况反映河流连通阻隔状况。

(5)服务功能

河流服务功能包含内容较多,此处利用 C51 防洪安全指数(Flood protection safety index)和 C52 水资源开发利用率(Exploitation rate of water resources)表征拉萨河河流服务功能状态。防洪安全指数指现状的防洪能力与我国对河道水库防洪标准之间的比值,防洪安全指数越高,说明越安全。水资源开发利用率是指示水资源开发利用程度,流域内水资源量丰富的河流,人类可以开发量适当增加,但是其比率应该控制在一定的范围内。

1.2.3　赋值标准

目前,关于河流健康评价的赋值标准,存在较大主观性。为增加不同评价结果的可比性,应尽量统一河流健康评价指标量化和赋值标准。由于地形地貌、气候、社会经济发展条件等方面的不同,导致不同河流健康评价目标存在较大差异,评价指标和赋值标准较难统一。本文根据流域生态环境特征和评价指标特点,利用关键阈值、法律法规限定取值、专家咨询等方法确定指标赋值标准。其中,关键阈值法将河流原生状态设置为理想状态,将人类干扰、社会需求因素引入到评价环节中:无干扰原始状态为最佳预期,赋值 100 分,之后历史扰动最小值、可接受最小值、严重威胁值、完全破坏值分别赋值 80 分、60 分、30 分和 0 分。由于一些指标无法确定无干扰状态或自然状态,则将已有标准和规范作为赋值标准。如水质指标中的水功能区水质达标率,通过判断河流水质是否达到水环境功能区划所要求的水质目标进行赋值。最终,拉萨河河流健康评价指标赋值标准和数据来源如表 2 所示。

表 2 河流健康评价指标赋值标准和数据来源

Table 2 The evaluation criterion of river health indexes and data sources

指标 Indexes	赋值 Scores					多断面取值规则 Score rule of multi-point	数据来源 Data sources
	100	80	60	30	0		
C11	1	0.8	0.6	0.4	0.2	—	旁多、唐家和拉萨水文站水文数据
C12	≤0.05	(0.05, 0.1]	(0.1, 0.3]	(0.3, 3.5]	>3.5	—	旁多、唐家和拉萨水文站水文数据
C13	100%	95%—100%	90%—95%	80%—90%	<80%	—	旁多水利枢纽实际下泄流量
C21	100%	80%	60%	30%	0%	—	2017 年丰水期和枯水期干流 22 个监测点 13 个水质指标数据
C22	高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮 I 类水功能区水质目标	高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮 II 类水功能区水质目标	高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮 III 类水功能区水质目标	高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮 IV 类水功能区水质目标	高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮 V 类水功能区水质目标	河段三个指标不同断面平均值作为整个河段评价结果	2017 年 3 月和 8 月干流 22 个监测点数据
C23	重金属浓度 I 类水功能区水质目标	重金属浓度 II 类水功能区水质目标	重金属浓度 III 类水功能区水质目标	重金属浓度 IV 类水功能区水质目标	重金属浓度 V 类水功能区水质目标	河段五种重金属不同断面最小值作为整个河段评价结果	2017 年 3 月和 8 月干流 22 个监测点数据
C31	0%	10%	20%	30%	40%	—	[11]
C32	<3.5	[3.5, 5.0)	[5.0, 5.75)	[5.75,7.25)	≥7.25	取河段不同断面平均值作为整个河段评价结果	2017 年 8 月份,干流不同河段 10 个监测点数据
C41	A_r = 100%; S_r = 2%	A_r = 80%; S_r = 4%	A_r = 60%; S_r = 8%	A_r = 30%; S_r = 12%	A_r = 0; S_r = 16%	—	遥感影像数据结合 SRTM 90 m DEM
C42	无拦河坝,无阻隔,扣 0 分;有拦河坝,有鱼道或仿生旁通道,且设施正常运行,扣 25 分;有拦河坝,无鱼道或仿生旁通道,有其他过鱼设施,且设施运行正常,扣 50 分;有拦河坝,无过鱼设施,对鱼类迁移有阻隔作用,扣 75 分					—	2017 和 2018 年拉萨河干流实地调查结合遥感影像
C51	95%	90%	85%	75%	50%	—	实地调查结合文献报告[32]
C52	10%	20%	30%	40%	60%	—	收集的地表水地下水开采及水资源总量数据

注:水面面积指数 Area index of river surface water A_r; 河流蜿蜒性指数 Sinuosity index of river S_r; 航天飞机雷达地形测绘任务 Shuttle radar topography mission SRTM; 数字高程模型 Digital elevation model DEM.

2　拉萨河干流河流健康评价结果

拉萨河干流不同河段指标取值和赋值情况如表 3 和图 2 所示。

总体来看:上游河段河流健康状况明显优于中下游河段,各指标中除 C21 外,其余各指标赋值均在 60 分以上;中游 C12、C32 和 C42 未达到 60 分,其余各指标赋值均大于或等于 60 分;下游 C12、C23、C31、C32、C42 未达到 60 分,其余各指标赋值均大于或等于 60 分。

表 3　拉萨河干流健康评价结果

Table 3　The result of health assessment for Lhasa River

指标 Indexes	指标取值 Value of indexes			赋值 Scores		
	上游 Upper reaches	中游 Middle reaches	下游 Lower reaches	上游 Upper reaches	中游 Middle reaches	下游 Lower reaches
C11	河流压力指数小	0.82	0.78	100	82	78
C12	月径流量近似天然状态	4.9	5.2	100	0	0
C13	流量基本不受影响,生态基流保障度高	0.93	1.00	100	60	100
C21	50%	100%	78%	50	100	78
C22	—*	—	—	83	99	89
C23	—	—	—	100	100	0
C31	8%	20%	84%	84	60	0
C32	—	—	—	80	45	45
C41	A_r = 96%, S_r = 1.5%	A_r = 70%, S_r = 1.1%	A_r = 68%, S_r = 0.2%	96	70	68
C42	上游无闸坝,未扣分	中游旁多水利枢纽有拦河坝无过鱼设施,扣 75 分	下游直孔和拉萨市内有水坝无过鱼设施,扣 75 分	100	25	25
C51	防洪安全指数 95%	防洪安全指数 95%	防洪安全指数 92%	100	100	85
C52	水资源开发利用率<10%	水资源开发利用率<10%	局部水资源开发利用率达到 17%	100	100	86

* 表示指标取值有多个,未列出

从水文指标来看,上游赋值较高,中下游 C12 取值大、赋值低,中游 C13 赋值低。上游地区无水文站点,无法准确计算水文指标赋值情况,但上游无大型水利水电工程,且人口稀少分散而居,根据经验判断拉萨河上游 C11、C12、C13 赋值均较高,上游河段 3 个水文指标均赋值 100 分。中游河段对水文产生显著影响的为具有年调节能力的旁多水利枢纽,电站下游设有旁多水文站。中游 C11、C12 采用旁多水文站历年水文数据计算,C11、C12 取值分别为 0.82、4.9;中游旁多水利枢纽环评批复生态流量为 23 m^3/s,C13 利用旁多水利枢纽 2014 年 4 月 22 日到 2017 年 10 月 31 日电站实际下泄流量计算,C13 取值 93%。下游分布有直孔、平措、纳金和献多水电站,直孔电站为季调节水电站,其余均为引水式电站调节能力有限,直孔电站下设有唐家水文站。下游 C11、C12 采用唐家、拉萨水文站水文数据计算,C11、C12 取值分别为 0.78、5.2;平措、纳金和献多水电站调节能力有限,而直孔水电站无生态基流要求,下游 C13 为 100%。

从水质指标来看,中游水质最好,上游水体中营养盐浓度稍高水功能区水质达标率较低,而下游水体个别断面存在重金属超标现象。2017 年拉萨河干流上、中、下游 C21 取值分别为 50%、100%和 78%。上游水体水

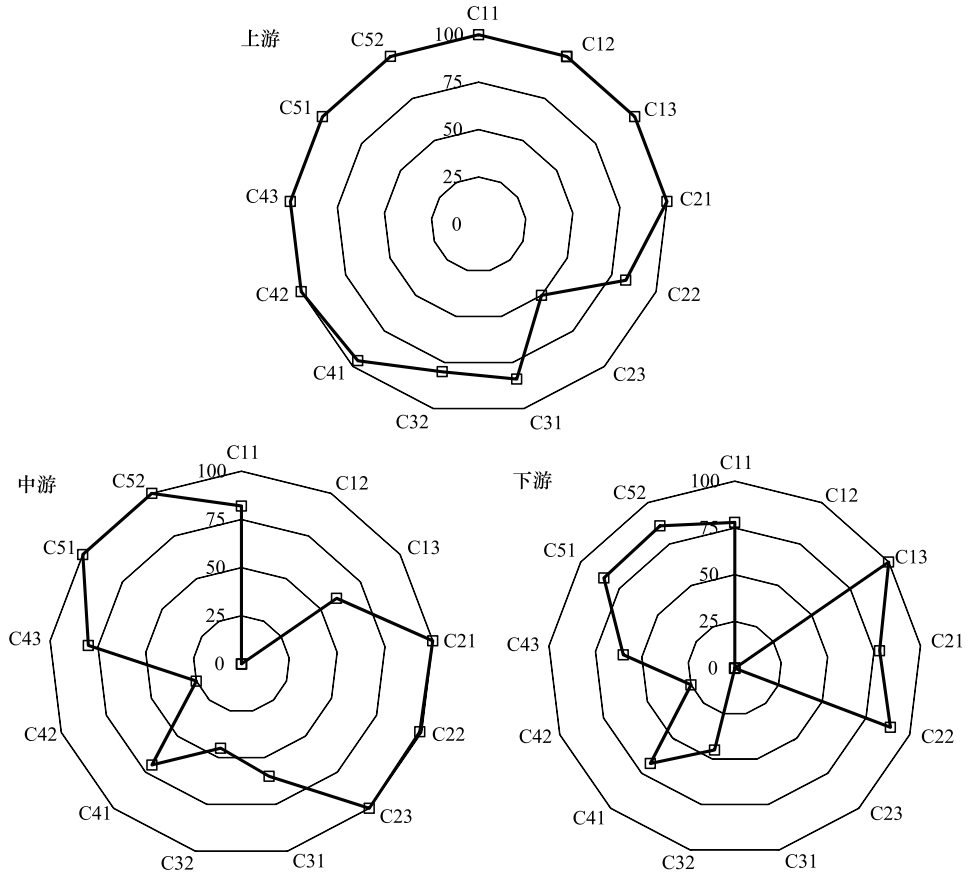

图 2 拉萨河河流健康评价结果示意图

Fig.2 Schematic diagram of river health assessment result for Lhasa River

C11 河流压力指数 Flow stress index; C12 流量过程变异程度 Degree of variation in the flow process; C13 生态基流保障度 Ecological base flow security degree; C21 水功能区水质达标率 Water qualification rate; C22 耗氧有机污染状况 Oxygen consuming organic pollution; C23 重金属污染状况 Heavy metal pollution; C31 外来鱼类入侵率 Invasive percentage of exotic fish; C32 大型底栖无脊椎动物科级耐污指数 Family biotic index; C41 河道稳定性指标 River stability; C42 河流联通阻隔状况 River connectivity barrier; C51 防洪安全指数 Flood protection safety index; C52 水资源开发利用率 Exploitation rate of water resources

域功能为 I 类,考核标准较严格,枯水期水质良好各指标均达标,但丰水期氨氮浓度升高,麦地卡湿地氨氮浓度未达到 I 类水功能区水质目标;中游水质较好,丰水期和枯水期各指标均达标;下游枯水期和丰水期水功能区水质达标率均为 78%,枯水期甲玛湿地和帕热湿地镉含量未达到 II 类水功能区水质目标,丰水期唐嘎湿地、巴嘎雪湿地氨氮含量未达到 II 类水功能区水质目标。

从水生态评价结果来看,上游水生态状况良好,中游次之,下游最差。根据范丽卿等[11]于 2010、2012 和 2014 年三年拉萨河流域鱼类调查结果显示,42 个调查点中的 19 个外来鱼类,其中 76.5%位于湿地。拉萨河上、中、下游 C31 取值分别为 8%、20%和 84%;下游 19 个调查断面中游 16 个断面发现了外来鱼类入侵。C32 利用 2017 年 8 月干流不同河段 10 个调查断面结果进行评价,其中上游、中游、下游分别设置 3 个、2 个和 5 个调查点。C32 评价结果显示,上游水体较为清洁赋 80 分,中下游水质相近赋 45 分,拉萨河上游处于较好状态,而中下游部分河段出现较多耐污种,可能存在局部污染。中游旁多水利枢纽下游、拉萨市下游和才纳断面耐污种比例较大。

拉萨河干流河道稳定性较强,且上游稳定性>中游>下游。从水面面积指数来看,整个流域河流水面面积指数为 90%,为比较稳定河流。自上而下,河流稳定性有较大差异,上游地区河流淹没面积基本重叠,水面面积指数为 96%,而中游地区水面面积指数为 70%,下游地区水面面积指数为 68%。中下游水面面积指数主要

受直孔与旁多水利枢纽蓄水影响,库区水面拓宽,枢纽工程下游的水面面积有所减少。整个河段河道蜿蜒性指数在 2%以内,说明从 1988 年以来主河道几乎没有变化,河道较为稳定。根据 2017 年 3 月和 9 月份对拉萨河干流的实地调查,结合拉萨河干流 2015—2017 年遥感影像数据对拉萨河流域闸坝阻隔情况进行评价。拉萨河干流上游乌鲁龙曲汇入口以上无水电站和水闸,河流联通条件好,未扣分。中游河段修建有旁多水利枢纽,该电站为大(1)型Ⅰ等工程,最大坝高 72.3 m,闸坝阻隔对鱼类及其它水生生物造成影响,工程建设中未设置鱼道和仿生旁通道,亦无其它过鱼设施,且电站目前正常运行;根据《拉萨河流域综合规划》报告,旁多水利枢纽对部分鱼类迁移具有阻隔作用。下游分布有直孔水电站、2#闸、3#闸和 4#闸,闸坝较多,其中直孔水电站坝体较高,无鱼道和其它过鱼设施,且 2#闸、3#闸和 4#闸运行后,对鱼类也有一定阻隔作用。

拉萨河干流防洪和水资源服务功能处于良好状态。根据新编制的《拉萨河流域综合规划》,拉萨河干流唐家水文站以上无防洪敏感点,防洪安全指数赋 100 分,而唐家水文站以下分为三段。唐加—纳金电站段,河道长度约为 76 km,防洪标准为 10 年一遇,需治理护岸工程 12.98 km;纳金电站—堆龙、曲水交界段,需对中心城区范围柳梧中组团、南组团、文化园新筑堤防,对现状城区段不满足超高要求的干流两岸堤防进行加高加固,加高加固堤防 17 km,新建堤防 11.6 km;堆龙、曲水交界段—雅鲁藏布江入口段河道防洪标准为 10 年一遇,需新建护岸工程 20.16 km,堤防工程 1.7 km。下游河道总长 157 km,不符合防洪标准,需要加固或新建工程措施长度为 63.44 km,占总河道长度的 40%。按照赋值标准,下游 C51 赋值为 85 分。根据《拉萨河流域综合规划》,2003—2012 年拉萨河流域水资源量为 115.4×109 m^3,多年平均供水量为 5.16×109 m^3,近 10 年全流域开发利用程度仅为 4.5%,开发程度整体较低,且已经满足了流域内的经济社会用水需求。拉萨河流域下游拉萨市城关区属于流域集中用水区,局部水资源开发利用率达到 17%。

3　讨论

3.1　水文及主要影响因素

拉萨河干流开发程度低,上游无大型水利水电工程,干流水文情势主要受旁多水利枢纽和直孔水电站影响。旁多水利枢纽主要任务为灌溉和发电,电站设计灌溉引水流量 10 m^3/s,主要用于澎波灌区农田灌溉,旁多水利枢纽设计引水流量 10 m^3/s,多年平均引水量 2×10^9 m^3,控制灌溉面积 5 万公顷;直孔水电站库周 5 千公顷耕地可从库内提水得到灌溉,还可确保引水灌溉下游耕地 2 千公顷。电站蓄水发电和灌溉引流均可对河流水文产生影响。根据旁多水利枢纽和直孔水电站调度计划,电站修建可起到“蓄洪补枯”的作用,但直孔水电站建设前后水文站径流数据研究结果表明电站运行后,电站下游水量在枯水期和平水期水量减少,丰水期水量增加,这与“蓄洪补枯”作用相反,河流水文过程变异强烈。

电站影响外,气候变化也是影响水文过程的一个重要因素。根据蔺学东等人的研究[33],拉萨河流域流量呈现增加趋势。然而 1955—2015 年拉萨河流域内及周边 10 个气象站数据显示:2004 年以前拉萨河流域降雨量呈上升趋势,2004 年以后降雨量呈现降低趋势;流域气温呈现持续上升趋势。气候变化将直接影响河流水文状况:降雨量减少会降低河流水量,温度的上升对河流水文条件的影响具有不确定性。气温升高后冰川和冻土消融速度升高,会增加河流水量补给[34-35];气温增加地表蒸散和植物蒸腾作用变强[36-37],会降低河流水量补给。2004—2015 年,拉萨水文站年径流量降低趋势明显,水文过程可能受到气候变化的影响。

3.2　干流水质状况及主要影响因素分析

拉萨河干流水质整体状况良好,根据下游达孜、卡林、才纳 3 个国家水环境监测站点多年水质监测结果,全年水质基本在国家Ⅱ类标准以上,但存在个别指标在特定时期超标现象。根据 2017 年 3 月和 8 月两次全流域水环境 22 个监测点水质监测结果:拉萨河干流丰水期湿地河段氨氮易超标,而枯水期甲玛沟下游入河口的甲玛湿地镉浓度未达到 III 类水功能区水质目标,而帕热湿地镉浓度未达到 II 类水功能区水质目标。

丰水期流经湿河段中水体氨氮浓度升高,可能与拉萨河流域湿地水文过程和人类活动密切相关。拉萨河流域湿地众多,主要分布在河流两岸,这些湿地地势平坦,生物量高,且靠近水源,成为发展畜牧业的理想场

所。由于枯水期地表径流较少,河流水体与湿地不连通,湿地中氨氮不会对河流水体产生影响,而随着丰水期来临,雨水与冰川雨水将湿地氨氮带入河流,使得河流水体中氨氮浓度升高。此外,气候暖干化背景下,湿地中凋落物和腐殖质分解加速[38-39]也成为影响河流中养分的一个重要潜在因素。

枯水期甲玛湿地和帕热湿地镉含量较高可能与甲玛沟内矿产资源开发、道路交通以及水文过程有关。甲玛沟内分布有铜多金属矿开采点,采矿和洗矿过程中产生的污染物可通过雨水冲刷或者废液排放进入附近水体,而湿地对于这些离子具有吸附作用,枯水期水量较少,浓度升高;丰水期,水量增大,浓度被稀释,水体中镉离子浓度降低。除矿产资源开采,甲玛湿地附近道路密集,道路交通污染也是潜在因素,而帕热湿地镉浓度超标可能主要与道路交通污染有关。

3.3 水生态现状分析

拉萨河海拔高、气候独特,孕育了河流独特的鱼类多样性。20 世纪 90 年代以前,拉萨河的鱼类受到较好的保护;20 世纪 90 年代以后,拉萨河的鱼类受到的大规模捕捞,鱼类资源锐减[40]。2004—2006 年间陈锋等[10]对拉萨河上、中、下游的鱼类做了详细的调查,共调查到 3 目 5 科 14 属 24 种鱼类,其中本地鱼 14 种,外来鱼 10 种。2005—2010 年间洛桑等[41]通过调查发现:在相同的季节相同采样点,2005 年能捕获的渔获物 11 种,而到 2010 年只能捕获 7 种。吕永磊[42]对拉萨河源头水域的鱼类资源做了调查,通过捕捞调查,共发现 5 种鱼类,其中本地鱼 3 种,外来鱼 2 种,隶属于 1 目 2 科 5 属。

拉萨河流域最近一次流域层面鱼类调查由范丽卿等人于 2010 年到 2014 年完成[11]。此次调查在拉萨河上游流域、中游流域和下游流域的河流、溪流、水库、湿地 42 个采样点,对整个拉萨河鱼类资源做了详尽的调查,共发现 25 种鱼类,其中本地鱼类 12 种,外来鱼类 13 种,隶属于 4 目 6 科 17 属。裂腹鱼、黑斑原鮡等土著鱼类的减少甚至灭绝,以及鲫、麦穗鱼和泥鳅等外来鱼类的增加,是拉萨河鱼类面临的主要问题。土著鱼类减少受过度捕捞、生态环境破坏等因素影响,黑斑原鮡 90 年代开始受到大规模捕捞,目前在拉萨河基本绝迹。外来鱼类主要分布于拉萨河下游地区[43-44],特别是湿地。外来物种入侵途径主要是放生和鱼塘外游,而这些活动主要集中在下游地区。

3.4 河流生境状况

拉萨河干流水面面积指数为 90%,属于较为稳定河流,但不同河段差异较大。上游地区较稳定,中游、下游地区淹没面积变化较大。中下游变动主要原因为:受直孔水电站与旁多水利枢纽影响,中游水面有所拓宽,而下游水面淹没面积有所减少。拉萨河主河道的上游、中游和下游的河道蜿蜒性指数的变化率在 2%以内,主河道的人为改造(如截湾取直,河道改道等)较少,河道较为稳定。旁多水利枢纽、直孔水电站的修建以及拉萨市区拦水坝阻断了河流连续性,是影响河流联通阻隔状况的主要因素。

4 河流适应性管理建议

针对拉萨河河流健康状况,本文提出以下河流适应性管理建议。

首先,加强河流水文、水质和流域湿地生态环境监测力度。在旁多水利枢纽库区上游设置水文、水质监测站点,监测入库流量和入库水质,用于支撑气候变化背景下河流水质影响因素研究。其次,研究表明湿地可能是河流营养元素超标的主要原因,为更好地进行河流生态系统管理和保护,需要加强流域内湿地面源污染调查工作,明确营养物质来源和迁移转化机制。

其次,加强鱼类保护力度,特别需要关注外来鱼类入侵问题。系统整理流域鱼类调查数据,明确本地鱼类分布和丰富度,针对濒临灭绝的本地物种开展物种特性分析,实施栖息地保护措施加强本地鱼类保护。合理规划鱼类资源开采,捕捞活动避开鱼类三场,禁止在产卵期捕捞。设置专门放生点,提供本地鱼类供放生,在放生点设置宣传栏介绍本地鱼类保护重要性及入侵物种危害。

最后,进一步明确水电站、水利工程建设和运行对河流生态系统的影响,并制定措施对水利水电工程调度过程进行科学管理。水电站运行、灌溉引水等活动不仅会影响河流水文、水环境,还会进一步影响水生生物的

生存和繁衍。虽然拉萨河流域经济欠发达,对河流水资源利用程度不高,然而人类干扰已经对河流生态系统产生了显著影响,目前仍未得到足够重视。应在明确水利水电工程调度、灌溉引水对河流水文、水环境和生物生境影响的基础上,制定调度规则,并加强监管,确保水利水电工程调度过程和灌溉引水活动符合调度规则。

参考文献(References):

[1] Halpern B S, Longo C, Hardy D, McLeod K L, Samhouri J F, Katona S K, Kleisner K, Lester S E, O'Leary J, Ranelletti M, Rosenberg A A, Scarborough C, Selig E R, Best B D, Brumbaugh D R, Chapin F S, Crowder L B, Daly K L, Doney S C, Elfes C, Fogarty M J, Gaines S D, Jacobsen K I, Karrer L B, Leslie H M, Neeley E, Pauly D, Polasky S, Ris B, Martin K S, Stone G S, Sumaila U R, Zeller D. An index to assess the health and benefits of the global ocean. Nature, 2012, 488(7413): 615-620.

[2] Fryirs K. Guiding principles for assessing geomorphic river condition: application of a framework in the Bega catchment, South Coast, New South Wales, Australia. CATENA, 2003, 53(1): 17-52.

[3] Carson R T, Mitchell R C. The Value of clean water: the public´s willingness to pay for boatable, fishable, and swimmable quality water. Water Resources Research, 1993, 29(7): 2445-2454.

[4] Wilson M A, Carpenter S R. Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States: 1971-1997. Ecological Applications, 1999, 9(3): 772-783.

[5] Johnson B L, Richardson W B, Naimo T J. Past, present, and future concepts in large river ecology: how rivers function and how human activities influence river processes. BioScience, 1995, 45(3): 134-141.

[6] Johansson M E, Nilsson C, Nilsson E. Do rivers function as corridors for plant dispersal? Journal of Vegetation Science, 1996, 7(4): 593-598.

[7] Karr J R. Defining and measuring river health. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 221-234.

[8] Schofield N J, Davies P E. Measuring the health of our rivers. Water, 1996, 23: 39-43.

[9] 文伏波, 韩其为, 许炯心, 胡春宏, 陈吉余, 李国英, 董哲仁, 王光谦. 河流健康的定义与内涵. 水科学进展, 2007, 18(1): 140-150.

[10] 陈锋, 陈毅峰. 拉萨河鱼类调查及保护. 水生生物学报, 2010, 34(2): 278-285.

[11] 范丽卿, 刘海平, 林进, 普穷. 拉萨河流域外来鱼类的分布、群落结构及其与环境的关系. 水生生物学报, 2016, 40(5): 958-967.

[12] 李宝海, 余耀斌, 达娃, 邱城, 林斌, 周建设. 拉萨河流域拉萨市段农业面源污染情况浅析. 环境管理, 2012, (4): 74-77.

[13] 刘凤, 李梅, 张荣飞, 崔益斌. 拉萨河流域重金属污染及健康风险评价. 环境化学, 2012, 31(5), 580-585.

[14] 周丹, 黄川友. 拉萨河流域水环境现状及污染防治对策. 四川水利, 2007, 28(2): 48-51.

[15] 布多, 罗文培, 王燕飞, 扎西次仁. 拉萨河流域水体铅、锌含量的初步研究. 西藏大学学报: 自然科学版, 2010, 25(2): 17-23.

[16] 张圣微, 雷玉平, 姚琴, 李红军. 土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响. 水资源保护, 2010, 26(2): 39-44.

[17] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 刘翠善. 健康河流的评价指标和评价标准. 水利学报, 2006, 37(3): 253-258.

[18] 翟晶, 徐国宾, 郭书英, 王乙震. 基于协调发展度的河流健康评价方法研究. 水利学报, 2016, 47(11): 1465-1471.

[19] 张镱锂, 王春连, 摆万奇, 王兆锋, 土艳丽, 央珍. 拉萨河流域高寒湿地分布(英文). 地理学报, 2010, 20(3): 375-388.

[20] 赵矿, 潘刚. 西藏湿地综述. 山东林业科技, 2010, 40(2): 97-99.

[21] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 刘娅, 李艺. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001.

[22] 朱卫红, 曹光兰, 李莹, 徐万玲, 史敏, 秦雷. 图们江流域河流生态系统健康评价. 生态学报, 2014, 34(14): 3969-3977.

[23] Merz S K. Flows: A Method for Determining Environmental Water Requirements in Victoria. 2nd ed. Melbourne: Department of Environment and Primary Industries, 2013.

[24] 封光寅, 李文杰, 周丽华, 陈冬. 流量过程变异对汉江中下游河流健康影响分析. 水文, 2016, 36(1): 46-50.

[25] 李雪, 彭金涛, 童伟. 水利水电工程生态流量研究综述. 水电站设计, 2016, 32(4): 71-75.

[26] 涂敏. 基于水功能区水质达标率的河流健康评价方法. 人民长江, 2008, 39(23): 130-133.

[27] Ladson A R, White L J, Doolan J A, Finlayson B L, Hart B T, Lake P S, Tilleard J W. Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 453-468.

[28] 黄龙, 焦锋. 阳澄湖水源地健康风险评价及污染源分析. 环境科学与管理, 2010, 35(6): 190-194.

[29] 李宁, 陈阿兰, 杨春江, 孙瑜旸, 马国良, 马琪. 城镇化对湟水河上游水质和底栖动物群落结构的影响. 生态学报, 2017, 37(10): 3570-3576.

[30] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. 生态学报, 2004, 24(12): 2768-2775.

[31] 张欧阳, 卜惠峰, 王翠平, 熊明. 长江流域水系连通性对河流健康的影响. 人民长江, 2010, 41(2): 1-5, 17-17.

[32] 中水北方勘测设计研究有限责任公司. 拉萨河流域综合规划环境影响报告书. 天津: 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 2018.

[33] 蔺学东, 张镱锂, 姚治君, 巩同梁, 王宏, 刘林山. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析. 地理科学进展, 2007, 26(3): 58-67.

[34] Labat D, Goddéris Y, Probst J L, Guyot J L. Evidence for global runoff increase related to climate warming. Advances in Water Resources, 2004, 27(6): 631-642.
[35] 巩同梁, 刘昌明, 刘景时. 拉萨河冬季径流对气候变暖和冻土退化的响应. 地理学报, 2006, 61(5): 519-526.
[36] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8.
[37] 付国珍, 摆万奇, 姚丽娜. 拉萨河流域耕地不同尺度土壤水分影响因子. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2115-2122.
[38] 陈华, Harmon M E, 田汉勤. 全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响(英文). 生态学报, 2001, 21(9): 1559-1563.
[39] 宋飘, 张乃莉, 马克平, 郭继勋. 全球气候变暖对凋落物分解的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1327-1339.
[40] 张春光, 贺大为. 西藏的鱼类资源. 生物学通报, 1997, 32(6): 9-10.
[41] 洛桑, 旦增, 布多. 拉萨河鱼类资源现状与利用对策. 西藏大学学报: 自然科学版, 2011, 26(2): 7-10.
[42] 吕永磊, 郝世鑫, 王宠, 孙东方, 王晓通, 刘海平, 商鹏. 拉萨河源头水域中浮游生物、鱼类资源调查与分析. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 407-413.
[43] 范丽卿, 土艳丽, 李建川, 方江平. 拉萨市拉鲁湿地鱼类现状与保护. 资源科学, 2011, 33(9): 1742-1749.
[44] 范丽卿, 刘海平, 郭其强, 潘刚. 拉萨甲玛湿地鱼类资源及其时空分布. 资源科学, 2010, 32(9): 1657-1665.