祁连山张掖段水电开发对区域生态环境的影响

桂 娟[1,3] 高海宁[2] 李宗省[1*] 邹海明[4] 袁瑞丰[1]

([1]中国科学院西北生态环境资源研究院(筹), 内陆河流域生态水文重点实验室/甘肃省祁连山生态研究中心, 兰州 730000; [2]河西学院, 甘肃张掖 734000; [3]中国科学院大学, 北京 100049; [4]青海省水文与水资源勘测局直门达水文站, 青海玉树 815000)

摘 要 2017 年 7 月 26 日—8 月 13 日,通过实地调研、样方调查、河水和土壤样品分析等方法,评估了祁连山张掖段水电站建设时间、占地面积、水电开发对水质、土壤及生态流量的影响。结果表明:祁连山自然保护区张掖段内水电站建设主要集中在 2000—2008 年;依据 2017 年统计数据计算 26 座水电站总占地面积为 798.35 hm^2,占祁连山张掖段面积(188×10^4 hm^2)的 0.042%,水电工程占地面积较小;祁连山张掖段水电站建设区域内植被盖度、生物量比原生植被分别低 27.14%和 236.8 g·m^{-2};水电站建设区域内水质、土壤状况良好,水电开发对水质、土壤的影响较小;2017 年前祁连山张掖段水电开发导致生态水量下降并形成了156.76 km的减水河段。

关键词 水电开发; 生态环境; 祁连山

The impacts of hydropower development in Zhangye section of Qilian Mountains on regional eco-environment. GUI Juan[1,3], GAO Hai-ning[2], LI Zong-xing[1*], ZOU Hai-ming[4], YUAN Rui-feng[1] ([1]*Key Laboratory of Ecohydrology of In-land River Basin/Gansu Qilian Mountain Ecological Research Center in Gansu Province, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; [2]*Hexi University, Zhangye* 734000, *Gansu, China*; [3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; [4]*Qinghai Provincial Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Yushu* 815100, *Qinghai, China*).

Abstract: From July 26 to August 13, 2017, by the methods of on-the-spot investigation, plot survey, and the analysis of river water and soil samples, we assessed the impacts of construction time, site area of hydropower stations, and hydropower development on water quality, soil and ecological flow in Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve. The results showed that the construction of hydropower stations was mainly concentrated from 2000 to 2008. The total area for 26 hydropower stations was 798.35 hm^2, accounting for 0.042% of total area in study region (1.88 million hm^2), which indicated that hydropower projects covered a small area. The vegetation coverage and biomass in the construction areas of the hydropower stations were 27.14% and 236.8 g·m^{-2} lower than those of the original vegetation, respectively. The water quality and soil of the areas around hydropower stations were in good conditions, indicating that the water and soil were seldom affected by hydropower development. The hydropower development had led to the decrease of ecological water quantity, causing a water-reduction river section with a length of 156.76 km.

Key words: hydropower development; eco-environment; Qilian Mountains.

国家"万人计划"青年拔尖人才项目、中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(2013274)、甘肃省陇原创新创业人才项目和城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2018-2-6)、中科院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金和黄土与第四纪地质国家重点实验室(SKLLQG1814)资助。
收稿日期: 2018-10-26 接受日期: 2019-03-19
*通讯作者 E-mail: lizxhhs@163.com

中国仍处于经济高速发展期,水电能源需求十分旺盛(邓伟琼等,2015)。与火电相比,水电不排放废气废水,相对较清洁。但水电工程开发对生态系统具有积累效应,会改变流域原始地貌从而带来生态环境问题(侯天民,2007;姚兴荣等,2012)。其中,对流域下垫面的影响是水电开发产生生态效应最显著的表现之一,主要包括对土地利用(Maingi *et al.*,2002;Kaygusuz,2004)、植被(钟华平等,2008;孙摇荣等,2011)、地貌和土壤的影响(霍静等,2018),尤其是正在建设中的水电站对环境的影响更明显(汪盾,2016);水电开发会致使河道水量发生变化,部分河段断流、生态环境恶化,水体出现富营养化(吴娅等,2015),下游流量峰值、洪水的影响范围和频率降低,同时改变了河流的日流量、月流量和季节流量,阻止了河流下游的矿物质沉积和有机质扩散(Mallik *et al.*,2009;薛联芳,2013),使下游防洪和用水安全受到严重影响(李燕等,2008;徐涛等,2009;张士杰,2014),还会导致上游水位上升;水电开发影响下的河岸带、河岸带植被、重要的环境进程和河岸植物的多样生境都会发生显著变化(Nllsson *et al.*,2010;黄维东,2013;魏国良等,2016)。另外,河流水文是影响河岸植被结构和组成的主要因素(Merritt *et al.*,2000),水电工程建设必定会对植被产生直接的破坏及间接的影响,同时会降低河岸植物的多度、多样性、成功繁殖和存活可能(Newman *et al.*,2013)。更重要的是,水电工程建设会不同程度地切割生境,改变河道的自然水文过程,隔断河流廊道系统的空间连通性,对河流廊道的自然动态造成严重干扰,会影响河流生态系统的物种构成、栖息地分布,引起河流生态系统的结构和功能变化,据统计,全球有2/3的淡水资源被约45000个大水坝(高于15 m)和800000个小水坝截流(张爱英等,2016)。

祁连山地区在全国生态文明建设中具有重要战略地位,是中国极其重要的冰冻圈水源涵养生态功能区和生态安全屏障,也是丝绸之路经济带生态建设的重要区域。该地区不仅保障着区域生态安全,同时在维护生态平衡、保障径流补给、维持区域可持续发展等方面发挥着十分重要的作用。水能水资源可持续利用和水生态文明建设对该区域具有十分重要的意义(程根伟等,2004;陈超军等,2007),而水电是一把双刃剑,为节能减排做出贡献的同时,也引发了生态环境恶化、气候变化、移民安置等问题(孙荣等,2011;杨昆等,2011)。关于水电开发的利弊之争也一度成为焦点问题,并影响到有关开发工作的进展。然而,相关研究,尤其是系统全面的评估工作在祁连山地区开展的还较少。基于此,本文在走访调研、样方分析的基础上,对水电开发对区域生物、水质、土壤等的影响做了评价,期望找到生态保护和水电开发的平衡点,为保持健康生态的基础上搞好水电开发提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

祁连山地处青藏、蒙新、黄土三大高原交汇地带,由甘肃省西部与青海省东北部边境的山地组成,被誉为河西走廊的“生命线”。祁连山张掖段(97.39°E—102.31°E,36.63°N—39.75°N)位于亚欧大陆中部,属于祁连山北坡,主要涉及肃南、民乐和山丹3个县。由于青藏高原对大气环流的特殊影响,使夏季来自东南季风的湿润气流得以北进西伸,波及本区,特殊的地理位置造就了祁连山的气候特征,即大陆性高寒半湿润山地气候,表现为冬季长而寒冷干燥,夏季短而温凉湿润,全年降水量主要集中在5—9月。本区从浅山地带到深山地带,气温递减,雨量递增,高山寒冷而阴湿;浅山地带热而干燥,由东向西气候逐渐干旱化,其植被的东西水平变化规律十分明显,植被类型及其种类组成也表现为整体的规律性变化趋势,东段植被类型较丰富,西段植被类型趋向单一,最西端乔木林不发育。祁连山张掖段东西长近500 km,南北宽50~80 km,总面积为1.88×10^4 km^2,占祁连山总面积的10.4%(祁连山总面积为18.1×10^4 km^2),海拔范围为2300 m至5500 m。土地利用类型包括林地、草地、荒漠、生产生活用地、水域和冰川,是该功能区水源涵养保护的核心区,地理位置特殊,生态区位重要,对保障西北地区乃至国家生态安全具有十分重要的意义,其生物多样性和水源涵养作用是祁连山保护区不可替代的生态功能(图1)。

1.2 样方设计与土样采集

首先通过走访调研从张掖地方的统计部门获取了水电站建设的基本数据(本文所涉及所有数据均来自2017年之前,所评估的结果也仅代表2017年之前祁连山张掖段水电开发的状况);然后基于水电工程建设的特点,工程对植被的破坏主要在河道淹没区、河道两侧滩地以及河岸两侧台地,因此生物

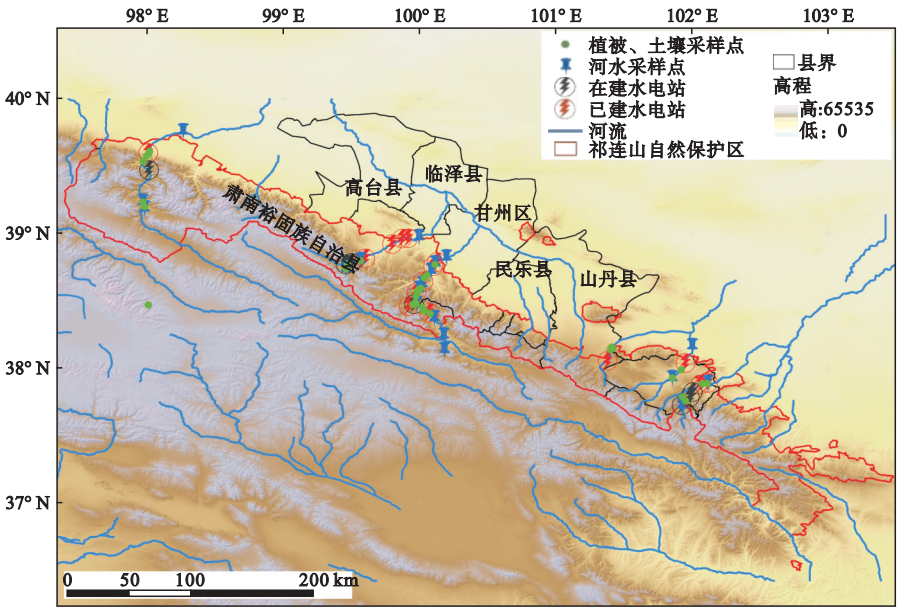


图 1　祁连山自然保护区张掖段位置、水电站分布及采样点

Fig.1　Location of the Zhangye section in Qilian Mountains Nature Reserve, distribution of hydropower stations and sampling points

状况调查主要在河道两侧及河岸两侧台地展开。在2017 年 7 月 26 日—8 月 13 日,通过对工程扰动区范围的观察,根据地形地貌、环境状况特征,选择具有代表性的区域和植被类型设计样地样方,依据生态学植被调查中所采取的一般方法,即乔木群落样方面积为 20 m×20 m,灌木群落样方面积为 10 m×10 m,草地群落样方面积为 1 m×1 m,基于此并结合流域实际情况在研究区共设计了 41 个样方,其中讨赖河流域 8 个、隆畅河流域 5 个、黑河流域 17 个、西大河流域 4 个、东大河流域 3 个、西营河流域 4 个,通过对样方所采集到的植物标本进行鉴定、整理,通过原生植被对比扰动区植被来评估判断水电建设对植被影响,用原生植被平均生物量干重对比扰动区恢复植被平均生物量干重来判断水电建设对区域生物影响。在设计的样方上采集土壤样 50 份,其中讨赖河流域 17 份,隆畅河流域 2 份、黑河流域 20 份、西营河流域 11 份,测试后选择 Zn、Ni、Cu、Pb、Cd 5 个代表性指标与土壤重金属含量检测依据《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)作对比,分析水电建设对土壤的影响。

1.3　水样采集

2017 年 7 月 26 日—8 月 13 日,根据水电站建设分布情况,按上游无扰动区、水库、厂房下出水口 3 种情况,在祁连山自然保护区张掖段各流域确定水样采集点,根据这一原则和实际情况,共采集水样 19 份,其中讨赖河流域 3 份,隆畅河流域 3 份,黑河流域 9 份,东大河流域 2 份,西营河流域 2 份,在实验室完成测试后与国家饮用水标准分析对比以了解当地水质状况。

2　结果与分析

2.1　祁连山自然保护区张掖段内水电站建设时间及其运行状况

据统计资料和实地调查结果发现,祁连山自然保护区张掖段现已建成和在建水电工程共有 26 座(表 1),其中已建成运行 19 座(不包括黑河龙首一级水电站,坝后式),在建水电站 7 座(位于缓冲区的寺大隆一级在生态环境整治期间已勒令停建),规划待建 16 座。已建成和在建的 26 座水电站中,1 座(山丹军马场一号水电站)建于20世纪70年

表 1　祁连山自然保护区张掖段各流域水电工程统计

Table 1　The hydro-electric engineering statistics of the Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve

所在流域	已建成运行(座)	停建退出(座)	规划未建(座)	合计(座)
讨赖河	2	1	0	3
隆畅河	4	2	1	7
黑河	8	1	7	16
西大河	1	0	0	1
东大河	2	0	8	10
西营河	2	3	0	5
合计:	19	7	16	42

代,7座始建于2000—2005年,其中4座始建于2004年,其余17座均始建于2006—2008年。可见祁连山自然保护区张掖段内水电开发主要发生在2000年以后,且水电站的建设集中在2004—2008年,产生的影响也主要在2000年以后(图2)。

2.2 祁连山自然保护区张掖段内水电站占地面积状况

祁连山自然保护区内的26座水电站多为低坝、小型水电站,加上山区河道较狭窄,多处采用跨河排架渡槽、跨沟道排架渡槽、隧洞式压力引水道等占地相对较少的方式修建,26座水电站总占地面积798.35 hm^2(图3),而祁连山张掖段面积为188×10^4 hm^2,即水电建设总面积占祁连山张掖段面积的0.042%,水电建设占地面积很小。

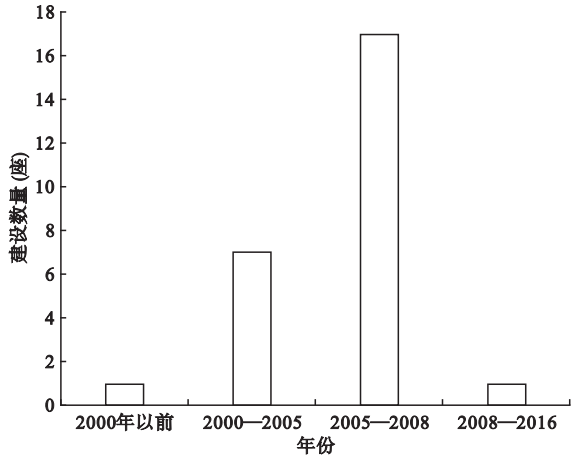


图2 祁连山自然保护区张掖段26座水电站开始建设年份
Fig.2 The construction year of 26 hydropower stations in Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve

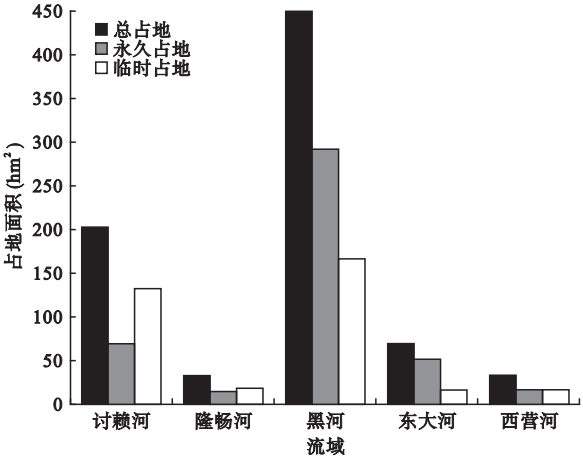


图3 祁连山自然保护区张掖段各流域水电站占地面积
Fig.3 The area of hydropower stations in each river basin of the Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve

另外,水电工程对区域的破坏包括工程建设的永久占地(厂房,设备等)和临时占地(如堆渣区、临时道路、料场等),已建成运行水电工程的破坏已经形成且基本不会再扩大,关停退出水电站建设期已过数年,但对流域的破坏已形成,破坏程度维持目前的现状;因此,水电建设对区域环境的破坏主要集中在临时占地区,可恢复区也集中在临时用地区。基于此,进一步调查发现,798.35 hm^2占地中,永久占地面积445.89 hm^2,临时占地面积352.46 hm^2,分别占总面积的55.9%和44.1%;分布到各个流域如下:讨赖河流域工程建设总占地面积202.22 hm^2,其中永久占地总面积69.81 hm^2,临时占地总面积132.41 hm^2;隆畅河流域工程建设总占地面积33.12 hm^2,其中永久占地总面积14.38 hm^2,临时占地总面积18.74 hm^2;黑河流域工程建设总占地面积460.17 hm^2,其中永久占地总面积292.91 hm^2,临时占地总面积167.26 hm^2;东大河流域工程总占地面积68.96 hm^2,其中永久占地总面积51.58 hm^2,临时占地总面积17.38 hm^2;西营河流域(不包括西营河双窑湾水电站)工程建设总占地面积33.88 hm^2,其中永久占地总面积17.21 hm^2,临时占地总面积16.67 hm^2(图3)。因此,严格控制临时占地区域不在扩大,按水土保持方案,督促并完成工程扰动区水土保持恢复,预防扰动区特别是堆渣区次生破坏的发生,逐渐推进临时占地区生态恢复,在一定程度上可以尽可能减小水电建设对生态环境的破坏。

2.3 祁连山张掖段水电站建设对区域内植被盖度与生物量的影响

祁连山自然保护区张掖段平均原生植被盖度为50.94%,扰动区恢复植被平均盖度为23.8%,相比于原生植被盖度低27.14%;其中讨赖河流域、隆畅河流域、黑河流域、东大河流域、西营河流域的原生植被平均盖度分别为29.3%、52.3%、56.1%、47.0%、70.0%;扰动区恢复植被平均盖度分别为28.5%、27.5%、24.0%、21.0%、8.0%、10.0%(图4)。

祁连山自然保护区张掖段扰动区恢复植被平均生物量干重为47.52 $g\cdot m^{-2}$,比原生植被平均生物量干重低236.8 $g\cdot m^{-2}$(原生植被平均生物量干重为277.32 $g\cdot m^{-2}$)。其中,讨赖河流域、隆畅河流域、黑河流域、东大河流域、西营河流域原生植被平均生物量干重分别为79.91、413.47、585.12、74.78、233.32 $g\cdot m^{-2}$;扰动区恢复植被平均生物量干重分别为102.88、38.27、42.48、4.35、14.63 $g\cdot m^{-2}$(图4)。

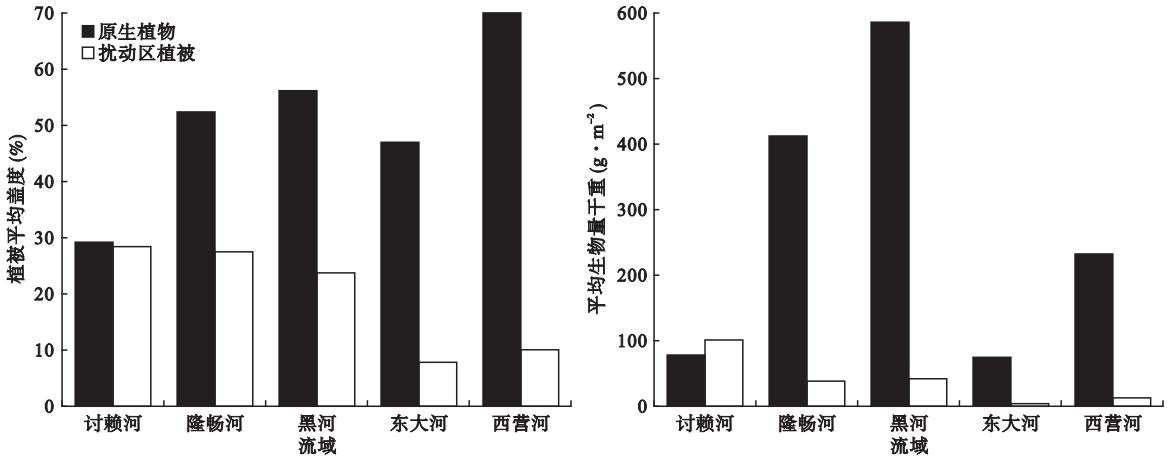


图 4　祁连山自然保护区张掖段各流域植被盖度和生物量

Fig.4　Vegetation coverage and biomass in Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve

显然,除了讨赖河流域扰动区植被状况与生物量相对较好外,水电站建设区域内植被盖度与生物量均低于原生植被,表明水电建设对区域植被、生物有不同程度的破坏,证实了水电对区域植被和生物确实有影响,加上高寒区生态环境具有生态系统单一性、高敏感性、高脆弱性、难恢复性等特征,导致破坏程度和所需恢复时间长短也有差异。讨赖河流域主要因为嘉镜铁路建设较早,水土保持与植被恢复工作未完全开展,原生植被主要集中在工程区旁,因此调查结果扰动区恢复植被的生物量相对较高。

2.4　祁连山张掖段水电站建设对水质、土壤的影响

祁连山自然保护区张掖段各流域水质 pH 值均大于 8.00,其中黑河流域 pH 值最高为 8.42,国家饮用水标准 pH 值最高限值为 8.50;国家饮用水标准水质总硬度(以 $CaCO_3$ 计,单位:mg·L^{-1})最高限值为 450 mg·L^{-1},调查发现,各流域水质总硬度黑河流域最高为 230 mg·L^{-1},明显低于国家饮用水标准的最高限值;就硫酸盐和氯化物而言,国家饮用水标准的最高限制是 250 mg·L^{-1};分析各流域的硫酸盐和氯化物结果表明,硫酸盐含量最高的流域是黑河流域为 154 mg·L^{-1},氯化物含量最高的流域是隆畅河流域含量为 10 mg·L^{-1},各流域硫酸盐和氯化物含量显著低于国家饮用水标准的最高限值。各流域水质化学耗氧量(隆畅河流域水质化学耗氧量 1.94 mg·L^{-1},其他各域水质化学耗氧量小于 1.37 mg·L^{-1})也明显低于国家饮用水标准;化学耗氧量的最高限值 3 mg·L^{-1},各流域水质重金属 Cr 含量均小于 0.004 mg·L^{-1}、Pb 含量均小于 0.007 mg·L^{-1},Cd 含量均小于 0.005 mg·L^{-1},国家饮用水标准重对金属 Cr、Pb、Cd 的含量的最高限值要求分别是 0.05 mg·L^{-1}、0.01 mg·L^{-1}和 0.005 mg·L^{-1}(图 5)。

综上所述,水质检测的各项指标均低于国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中的最高限值,主要由于区域内工业污染排放很少,在生活污染源和农业面源污染得到良好控制的情况下,水库运营对水质影响不大。各流域水质均达到了饮用水水质要求,有些指标甚至远远低于国家《生活饮用水卫生标准》的最高限值,说明当地水质较好,也从侧面反映出水电建设对当地水质的影响并不大。

通过对各流域采集的土壤样品检测分析,发现在祁连山自然保护区张掖段,各流域水电工程建设周边土壤中 Zn、Ni、Cu、Pb、Cd 含量均低于《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)的限值(图 6),证实了水电工程建设对周边土壤未造成重金属污染。

2.5　祁连山张掖段水电开发对生态流量的影响

截止 2017 年,各流域引水总长度为 125.6 km,造成干流减水河段长为 156.76 km。进一步分析发现,讨赖河流域、隆畅河流域、黑河流域、东大河流域、西营河流域水电工程建设的引水系统总长分别为 32.22、13.74、47.06、14.90、17.68 km,造成干流减水河段分别为 36.40、14.92、68.54、18.80、18.10 km(图 7)。生态流量持续下降一方面会引起河道断流,影响下游的生产生活,另一方面会对该流域的生态链造成破坏,所以当下最要紧的是要采取积极有效的措施增确保河道的最小生态需水量。

2.6　祁连山张掖段水电开发区生态恢复的建议

水电工程建设对区域的破坏已然形成,已建成运行和在建水电站对植被的破坏期已过,当前最主

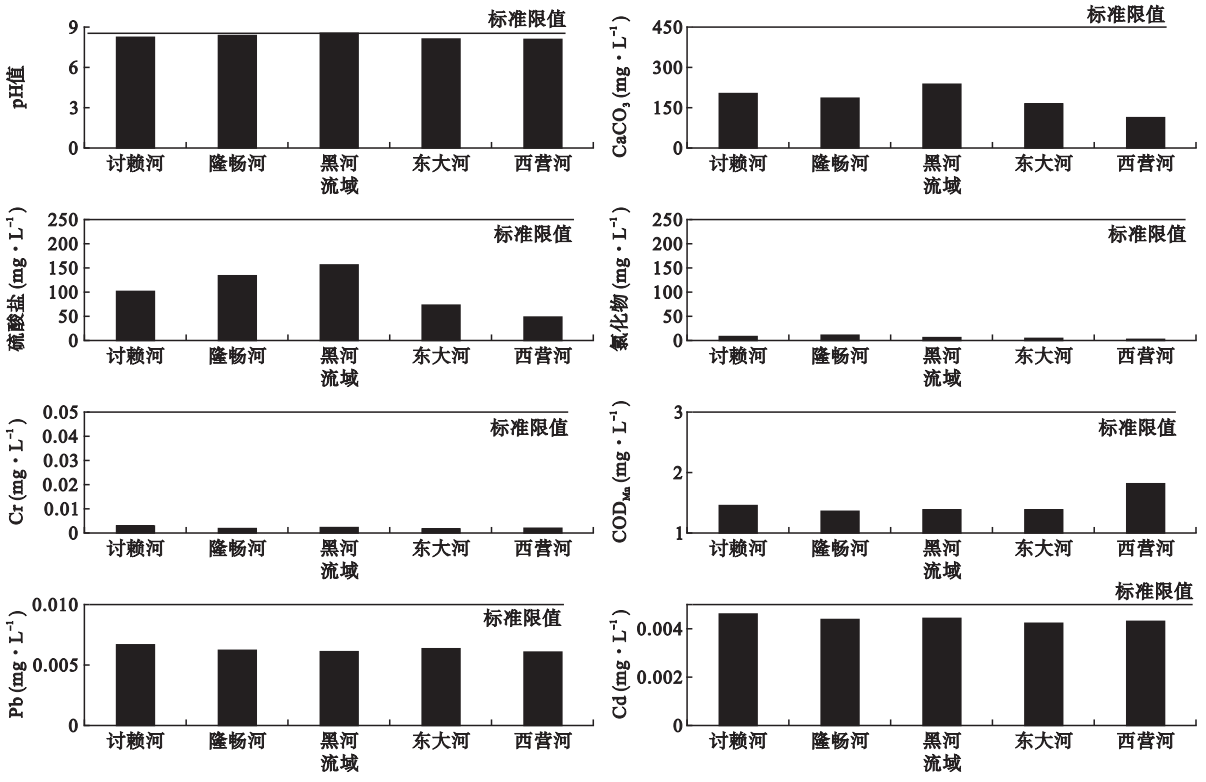


图 5 祁连山自然保护区张掖段各流域水质状况

Fig.5 The water quality in Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve

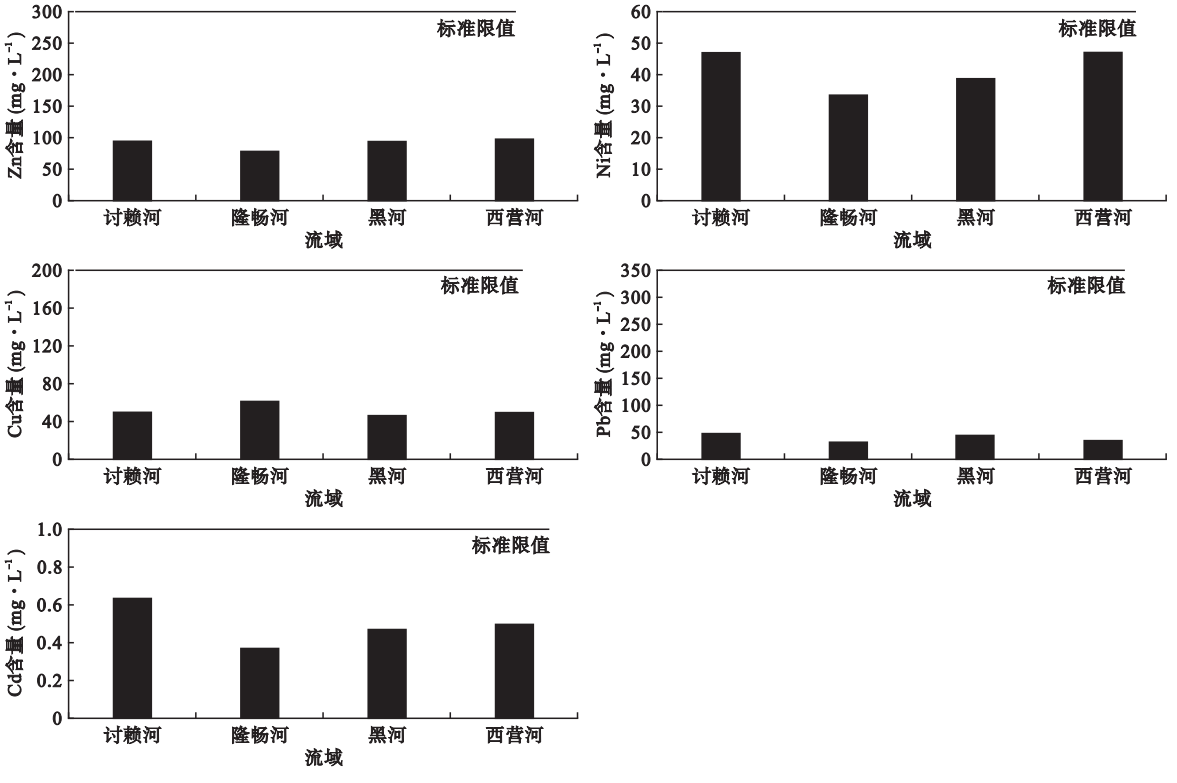


图 6 祁连山自然保护区张掖段各流域土壤状况

Fig.6 Soil quality in Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve

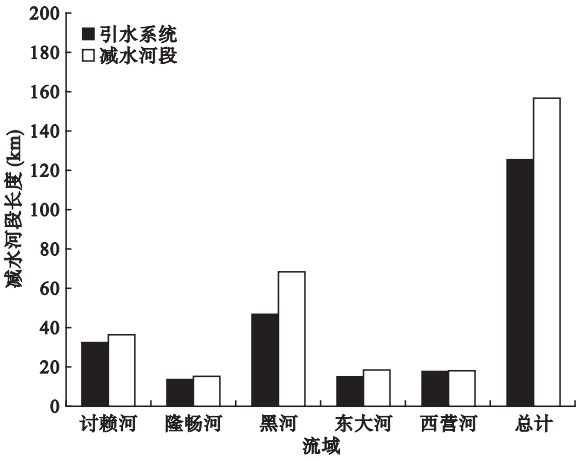


图 7　祁连山自然保护区张掖段各流域减水河段
Fig.7　The water reducing river section of every valley in Zhangye section of Qilian Mountains Nature Reserve

要的问题是工程建设破坏区、扰动区植被和生态流量的恢复。由于建设水电站施工时间较长,导致工程区、堆渣区、料场、临时道路等工程在扰动区长期裸露,生态植被恢复工程未实施,行洪道堆渣未彻底整治,水电建设工程建设均位于河道较狭窄处,地表植被一旦扰动,疏松的坡体很容易形成次生灾害。鉴于以上特点,对水电开发提出几点建议:

(1) 植被选择及修复技术。按因地适宜的要求选择适宜的绿化目标植被种类,并使其与立地生境寄生共存,植被种类的选择上要具有耐干旱贫瘠、易栽种成活、速生性能好、固氮保土等性能,特别是豆科固氮植物可以改善电站施工区土壤结构与养分状况,有利于植物的快速生长和改善恶劣的生境条件。

(2) 水土富集方法与改良生境技术相结合。在植物生长基质的结构和功能完全丧失的建设施工区,植被恢复的关键技术主要采用凿石打坑与撩壕客土种植法、等高带状种植法、地膜截水墙法、地表有机覆盖法、固体保水剂法等水土富集方法,使有限的土壤与水资源由局部富集,最终改善、改造或恢复植物生长环境。水电工程区植被恢复措施。

(3) 增加减水河段水位。主管部门应加强监管,定期巡查,督促运行水电站按环评批复完成下泄生态用水设施建设,并按竣工验收报告提出的要求安装电子流量计;关停退出水电站上游来水经引水枢纽全部下泄,保持河流天然流量;通过河道清理整治行动,彻底清除河里和两边的垃圾,使河道沿线水面无漂浮物。严禁向河道内乱排污水、乱倒垃圾,确保整治清除无死角、无遗漏,督促河道垃圾清理工作,且形成长效机制。

3　结　论

截止 2017 年,祁连山自然保护区张掖段已建成和在建水电工程 26 座,且集中在 2004—2008 年建设,产生的影响也主要在 2000 年以后;水电总占地面积为 798.35 hm^2,而祁连山张掖段面积为 188×10^4 hm^2,即水电建设总面积占祁连山张掖段面积的 0.042%。

调查期内(2017 年 7 月 26 日—8 月 13 日)祁连山张掖段水电站建设区域内植被盖度与生物量均低于原生植被,扰动区植被盖度整体上比原生植被低 27.14%,平均生物量干重整体上比原生植被低236.8 $g\cdot m^{-2}$,表明水电建设对区域植被和生物产生了一定影响。

采样期内(2017 年 7 月 26 日—8 月 13 日)祁连山自然保护区张掖段各流域水质检测结果显示 pH、总硬度、硫酸盐、氯化物、化学耗氧量、金属 Cr、Pb、Cd 含量均低于国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中的最高限值,表明各流域水质均达到了饮用水水质要求,也从侧面反映出水电建设对当地水质的影响并不大。

截止 2017 年,祁连山张掖段水电开发导致生态水量下降并形成了 156.76 km 的减水河段,应当采取积极有效的措施确保河道的最小生态需水量。

参考文献

陈超军, 张　妮. 2007. 流域梯级水电开发中的风险管理及保险分析. 水力发电, **33**(3): 9-12.
程根伟, 麻泽龙, 范继辉, 等. 2004. 西南江河梯级水电开发对河流水环境的影响及对策. 中国科学院院刊, **19**(6): 433-437.
邓伟琼, 孙　荣, 李修明, 等. 2015. 水电开发对河岸植被影响研究进展. 生态科学, **34**(6): 201-208.
侯天民, 王定晖. 2007. 大通河流域水电资源开发对生态环境影响及管理对策. 青海环境, **17**(4): 164-166.
黄维东, 牛最荣, 马正耀, 等. 2013. 大通河流域水能水资源开发对河流水文过程和环境的影响. 冰川冻土, **35**(6): 1573-1581.
霍　静, 崔玉洁, 宋林旭,等. 2018. 三峡水库神农溪库湾水体季节性分层特性. 生态学杂志, **37**(4).
李　燕, 李恒鹏. 2008. 太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响. 环境科学, **29**(5): 1319-1324.
孙　荣, 袁兴中, 刘　红, 等. 2011. 磨刀溪梯级水电开发对河岸植物群落的影响. 水科学进展, **22**(4): 561-567.
孙摇荣, 袁兴中, 刘摇红. 2011. 三峡水库消落带植物群落组成及物种多样性. 生态学杂志, **30**(2): 208-214.
吴　娅, 王雨春, 胡明明. 2015. 三峡库区典型支流浮游细

菌的生态分布及其影响因素. 生态学杂志, **34**(4): 1060-1065.
汪 盾. 2016. 水电开发对金沙江下游生态环境的影响. 湖北农业科学, **55**(11): 2755-2758.
魏国良, 张 琨, 徐海峰, 等. 2016. 水电开发影响下河岸带植被结构和生物量分布. 人民长江, **47**(4): 10-15.
徐 涛, 魏国孝, 李常斌, 等. 2009. 梨园河梯级电站开发对流域生态环境的影响. 冰川冻土, **31**(1): 166-174.
薛联芳, 顾洪宾, 韦 兵, 等. 2013. 红水河干流水电梯级开发对水质累积影响调查研究. 水力发电, **39**(4):9-12.
杨 昆, 邓 熙, 李学灵, 等. 2011. 梯级开发对河流生态系统和景观影响研究进展. 应用生态学报, **22**(5): 1359-1367.
姚兴荣, 丁宏伟, 沈永平, 等. 2012. 黑河干流拟建水利工程对下游生态环境的影响分析. 冰川冻土, **34**(4): 934-941.
张爱英, 熊高明, 樊大勇, 等. 2016. 三峡水库运行对淹没区及消落带植物多样性的影响. 生态学杂志, **35**(9): 2505-518.
张士杰, 闫俊平, 李国强. 2014. 流域梯级开发方案调整的水温累积影响研究. 水利学报, **45**(11): 1336-1344.
钟华平, 刘 恒, 耿雷华. 2008. 怒江水电梯级开发的生态环境累积效应. 水电能源科学, **26**(1): 52-55/59.
Kaygusuz K. 2004. Hydropower and the world's energy future. *Energy Sources*, **26**: 215-224.
Maingi JK, Marsh SE. 2002. Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya. *Journal of Arid Environments*, **50**: 53-79.
Mallik AU, Richardson JS. 2009. Riparian vegetation change in upstream and downstream reaches of three temperate rivers dammed for hydroelectric generation in British Columbia, Canada. *Ecological Engineering*, **35**: 810-819.
Merritt DM, Cooper DJ. 2000. Riparian vegetation and channel change in response to river regulation: A comparative study of regulated and unregulated streams in the Green River Basin, USA. *Regulated Rivers: Research & Management*, **16**: 543-564.
Newman BJ, Ladd P, Brundrett M, *et al*. 2013. Effects of habitat fragmentation on plant reproductive success and population viability at the landscape and habitat scale. *Biological Conservation*, **159**: 16-23.
Nilsson C, Brownr L, Jansson R, *et al*. 2010. The role of hydrochory in structuring riparian and wetland vegetation. *Biological Reviews*, **85**: 837-858.

作者简介 桂 娟,女,1994年生,硕士研究生,研究方向为高寒山区同位素水文。E-mail: guijuan6894@163.com
责任编辑 李凤芹