

西藏羊卓雍错流域水体水质评价及主要污染因子*

者 萌^{1,2}, 张雪芹^{1**}, 孙 瑞³, 汪步惟^{1,2}

(1: 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 中国热带农业科学院橡胶研究所, 儋州 571737)

摘 要: 水质是流域生态系统的重要指标, 水质评价则是开展流域水体污染防治等工作的基础. 基于 2010—2014 年羊卓雍错流域湖泊、河流水质及 2012—2014 年流域居民饮用井水、自来水水质监测资料, 结合单因子污染评价法和内梅罗污染指数法, 对流域水质现状进行分析和评价. 结果表明, 12 处地表水体中, 羊卓雍错和巴纠错受中度污染, 其他水体清洁或尚清洁, 硒及氟化物为主要污染因子; 9 处居民饮用水体中, 自来水水质明显好于井水, 但也仅有 3 处自来水达清洁标准, 硒、铝及硝酸盐为主要超标项. 污染因子通过水-土-植被-动物系统破坏流域生态环境, 阻碍农业生产发展, 并直接或间接影响人类身体健康. 因此, 必须做好流域环境的综合整治, 控制农业面源污染、完善饮用水基础设施建设, 同时继续加强水质监测.

关键词: 羊卓雍错流域; 单因子污染评价; 内梅罗污染指数; 污染因子

Assessment of water quality and the pollution factors of waters in Yamzhog Yumco Basin, Tibet

ZHE Meng^{1,2}, ZHANG Xueqin^{1**}, SUN Rui³ & WANG Buwei^{1,2}

(1: *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Danzhou 571737, P.R.China*)

Abstract: As a vital indicator of watershed ecosystem, water quality has essential implications for the development of the ecological environment and economic society. Meanwhile, water quality assessment provides indispensable support for the integrated control of water pollution. The water quality of surface waters (i.e. lake and river waters) and drinking waters (i.e. well and tap waters) has been investigated in Yamzhog Yumco Basin since 2010 and 2012, respectively. Based on the annual average data, the pollution factors of waters in Yamzhog Yumco Basin were analyzed by utilizing the single factor pollution evaluation method, and the present situation of water quality exerted as well with the Nemerow pollution index method. The analysis revealed that the Yamzhog Yum Co and the Bajiu Co are both moderately polluted, while the other 10 surface waters are clean or almost clean. Moreover, the selenium and fluoride contents are generally exceeded or close to the upper limit of the standard range. Two thirds of the nine drinking waters are polluted to different degrees with the selenium, aluminum, and nitrate as the main pollution factors. In addition, the quality of tap waters is much better than that of well waters. Water pollutants, through the water-soil-plant-animal system, could cause the destruction of ecological environment, hinder the sustainable development of agriculture, and finally threaten human's health. Therefore, in order to control and reduce the water pollution in Yamzhog Yumco Basin, it is necessary to renovate the basin environment comprehensively, control the agricultural non-point pollution, and improve the drinking water facilities. Meanwhile, further water quality monitoring is valuable in such process.

Keywords: Yamzhog Yumco Basin; single factor pollution evaluation; Nemerow pollution index; pollution factor

* 国家自然科学基金项目(41171062, 41471064)资助. 2015-06-16 收稿; 2015-08-16 收修改稿. 者萌(1989~), 女, 博士研究生; E-mail: aimierzhe@126.com.

** 通信作者; E-mail: zhangxq@igsrr.ac.cn.

流域水质状况受地质、气候等自然条件和人类活动的共同影响^[1-2],对流域生态环境以及周边地区居民的生产、生活有着重要意义^[3].客观、科学地掌握和评价流域水质现状,能为水资源的合理开发利用和水体污染的综合防治提供依据^[4-5].羊卓雍错流域是藏南喜马拉雅山与雅鲁藏布江之间较大的内陆湖区^[6],虽然流域内工业污染极小,但长期粗犷式的农牧业生产和当地居民的传统生活习惯在一定程度上影响着水质.此外,近年来气候的变化以及农业、旅游业的迅速发展,也对流域水质造成了影响^[7],威胁到生态、社会的可持续发展以及当地居民健康.因此,做好羊卓雍错流域地表水和居民饮用水的水质监测与评价工作尤为重要.

目前,水体质量评价方法总体包括单因子污染评价法和综合污染评价法 2 类^[8].在羊卓雍错流域水质评价中,于 2010 年采用单因子污染评价法对流域内 5 个主要湖泊进行水质评价^[9],结果显示各湖泊均受到不同程度的污染,其中,羊卓雍错、普莫雍错水质为劣 V 类,空姆错、沉错、巴纠错水质为 V 类.然而,水质分析中往往涉及多个指标,单因子污染评价法仅以一种污染物超标而判定评价对象不满足相应的水质标准,说服力稍显不足^[10].此外,现有研究尚未涉及羊卓雍错流域河流及居民饮用水水质.因此,本研究对羊卓雍错流域主要地表水和部分居民饮用水水质分别进行连续 5 年(2010—2014 年)和 3 年(2012—2014 年)的多指标监测,依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),在单因子污染评价法的基础上,利用综合污染指数法进行流域水体水质现状的分析与评价,以期对羊卓雍错流域地表水环境治理和居民饮用水科学管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

羊卓雍错流域(28°8′~29°13′N, 90°06′~91°41′E)(图 1),行政上属西藏山南地区,包括浪卡子县 9 个区及贡嘎县 1 个区.流域内主要湖泊包括羊卓雍错、空姆错、沉错、巴纠错和普莫雍错.其中,羊卓雍错面积最大,其入湖河流自西向东依次为嘎马林河、卡洞加曲、曲清河、香达曲、浦宗曲、卡鲁雄曲和牙间曲.流域平均海拔 4500 m 以上,面积为 9048 km²^[11],北部以甘巴拉山为分水岭与雅鲁藏布江相邻;南侧与喜马拉雅山脉以蒙达岗日雪山相隔;东部与哲古错流域相邻;西部以卡惹拉雪山为分水岭与年楚河接壤.流域属藏南山地灌丛草原半干旱气候,年均温度为 2.8℃;降水集中在每年 5—9 月,多年平均降水量为 363.4 mm,平均水面蒸发量为 1296.7 mm^[11].在地层分区上,流域位于喜马拉雅区-拉轨岗日分区^[12].产业结构以畜牧业为主,耕地面积较小,主要种植青稞、油菜等耐旱作物,旅游业在当地经济中占有越来越重要的地位.羊卓雍错流域水资源丰富,但时空分布不均,加上基础设施薄弱,农牧民取水、饮水曾极为困难.西藏政府投入大量资金进行农村饮水工程建设,羊卓雍错流域所属的山南地区已于 2012 年底实现全地区自来水普及率为 100%,解决农牧民和牲畜的饮水困难、饮水安全问题.

1.2 样品采集与测定

连续 5 年(2010—2014 年)对羊卓雍错流域 5 个主要湖泊及 7 条入湖河流进行定点采样和测试分析,采样时间为每年 7 月.共设 40 个采样点(图 1),其中羊卓雍错采样点 24 个(L1~L24),普莫雍错 6 个(L25~L30),巴纠错(L31)、空姆错(L32)、沉错(L33)各 1 个,卡鲁雄曲(R1)、浦宗曲(R2)、香达曲(R3)、曲清河(R4)、卡洞加曲(R5)、嘎马林河(R6)、牙间曲(R7)各 1 个;2012 年起增加对流域居民饮用井水和自来水的定点采样及测定,共设 9 个采样点,包括多却村(U1)、吉穷村(U2)井水采样点各 1 个,多却乡(TW1)、工布学乡(TW2)、卡龙乡(TW3)、张达乡(TW4)、阿扎乡(TW5)、白地乡(TW6)、打隆镇(TW7)自来水采样点各 1 个.野外工作使用美国 Trimble 公司生产的 Juno SB 型 GPS 进行导航定位.水样装入清洁的塑料采样瓶,并密封避光保存.

水质样品分析指标共 19 项,除溶解性总固体(TDS)为现场使用 HI9828 型多参数水质测定仪测定外,其余指标均在中国科学院地理科学与资源研究所实验室完成测定.其中,氟化物(F⁻)、硫酸盐(SO₄²⁻)、硝酸盐(NO₃⁻)的测定仪器为离子色谱仪(LC-10ADvp),测定精度为±0.04%;砷(As)、硼(B)、硒(Se)、铝(Al)、镉(Cd)、铬(六价)(Cr)、铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、钼(Mo)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)的测定仪器为电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES),测定精度为±5%;碳酸盐(CO₃²⁻)和重碳酸盐(HCO₃⁻)采用双指示剂中和法

2 水质评价结果

因水质样品的采集和测试过程中可能存在误差,某一年的水质评价结果不能准确代表该流域水质近况。因此,利用5年流域地表水体和3年居民饮用水体单因子污染指数平均值表征水质现状,所得结论更加准确、可靠。

2.1 单因子水质评价结果

在羊卓雍错流域地表水体中,羊卓雍错、巴纠错、普莫雍错、香达曲、浦宗曲、牙间曲、空姆错 Se 浓度分别约为标准值的 2.7、2.6、1.3、1.3、1.2、1.0、1.0 倍(表 1),其他水体 Se 浓度虽符合标准值范围,但均接近标准值上限;巴纠错 F⁻ 浓度约为标准值的 1.1 倍,沉错、普莫雍错和羊卓雍错 F⁻ 浓度接近标准值上限;其余各项检测指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水质评价标准。

表 1 羊卓雍错地表水检测项目单因子污染指数*

Tab.1 The single pollution indexes of the monitored items of surface waters in Yamzhog Yumco Basin

污染因子	湖水					河水						
	羊卓雍错	巴纠错	普莫雍错	沉错	空姆错	牙间曲	浦宗曲	香达曲	嘎马林河	卡鲁雄曲	卡洞加曲	曲清河
Se	2.665	2.600	1.224	0.706	1.002	1.020	1.208	1.250	0.946	0.742	0.690	0.568
F ⁻	0.824	1.079	0.833	0.965	0.199	0.382	0.154	0.197	0.214	0.200	0.162	0.184
As	0.364	0.099	0.043	0.337	0.234	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.022	n.a.	n.a.
Cr	n.a.	n.a.	0.011	n.a.	0.021	0.047	0.029	0.032	0.044	0.024	0.029	0.012
Pb	0.023	0.019	0.012	0.017	0.025	0.006	0.016	0.009	0.026	0.008	0.011	0.041
Cd	0.027	0.004	0.012	0.036	0.028	0.004	n.a.	0.008	n.a.	0.004	n.a.	0.012
Cu	0.003	0.003	0.001	0.001	0.004	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003
Zn	n.a.	n.a.	n.a.	0.004	0.002	n.a.	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	n.a.

* 所列地表水 P_i 值为 5 年平均值;羊卓雍错 P_i 值为 24 个采样点的平均值,普莫雍错 P_i 值为 6 个采样点的平均值;n.a.代表未检出。

流域居民饮用水体中,阿扎乡自来水、打隆镇自来水、多却乡井水、多却乡自来水、吉穷村井水、工布学乡自来水中 Se 浓度分别约为水质标准值的 1.6、1.6、1.5、1.2、1.2、1.1 倍(表 2),其他水体中 Se 浓度均接近标准值上限;多却乡井水 NO₃⁻ 浓度约为标准值的 1.8 倍;吉穷村井水 Al 浓度约为标准值的 1.4 倍。其余各项检测指标满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)小型集中式供水和分散式供水标准,且在各饮用水体中均未检测到重金属 Cu 浓度。

2.2 内梅罗污染指数评价结果

羊卓雍错流域 12 处地表水中,羊卓雍错、巴纠错为Ⅳ级水质($P_j=1.92、1.87$)(图 2),水体中污染;沉错、空姆错、牙间曲、浦宗曲、普莫雍错、香达曲为Ⅱ级水质($P_j=0.71\sim 0.89$),水体尚清洁;曲清河、卡洞加曲、卡鲁雄曲、嘎马林河为Ⅰ级水质,水体清洁($P_j=0.41\sim 0.68$)。9 处居民饮用水体中,打隆镇、阿扎乡自来水及多却村、吉穷村井水为Ⅲ级水质($P_j=0.98\sim 1.29$),水体轻度污染;工布学乡、多却乡自来水为Ⅱ级水质($P_j=0.77、0.84$),水体尚清洁;白地乡、卡龙乡、张达乡自来水为Ⅰ级水质($P_j=0.55\sim 0.62$),水体未受污染。

就水质变化而言,2010—2014 年间,羊卓雍错和巴纠错内梅罗污染指数呈波动下降趋势(图 3a),最大值均出现在 2010 年,分别高达 5.94、4.15。其他地表水体内梅罗污染指数波动幅度相对较小,其中嘎马林河、牙间曲、卡鲁雄曲内梅罗污染指数最大值出现在 2011 年;沉错、浦宗曲、香达曲、空姆错、浦宗曲、卡洞加曲、曲清河内梅罗污染指数最大值出现在 2012 年。各地表水体内梅罗污染指数均在近 2 年保持较低水平。2012—2014 年间,流域居民饮用水体内梅罗污染指数最大值均出现在 2012 年(图 3b),除多却村井水内梅罗污染指数波动幅度较大且保持在较高水平外,其他水体内梅罗污染指数呈波动或直线式下降。

表2 羊卓雍错流域居民饮用水检测项目单因子污染指数*

Tab.2 The single pollution indexes of the monitored items of drinking waters in Yamzhog Yumco Basin

污染因子	井水				自来水				
	多却村	吉穷村	阿扎乡	多却乡	张达乡	打隆镇	工布学乡	卡龙乡	白地乡
Se	1.490	1.160	1.640	1.167	0.853	1.633	1.080	0.820	0.773
NO ₃ ⁻	1.804	0.089	0.409	0.231	0.314	0.089	0.118	0.287	0.096
Al	n.a.	1.365	n.a.	n.a.	0.409	n.a.	0.001	0.005	n.a.
F ⁻	0.374	0.355	0.257	0.226	0.282	0.048	0.209	0.217	0.242
B	0.348	0.435	0.352	0.135	0.187	0.110	0.158	0.140	0.099
SO ₄ ²⁻	0.107	0.092	0.223	0.278	0.176	0.243	0.193	0.085	0.045
Fe	0.002	0.391	0.002	0.016	0.137	n.a.	0.012	0.031	0.005
Pb	0.050	0.020	0.007	0.250	0.037	0.007	0.143	0.250	0.007
Cr	0.095	0.091	0.069	0.049	0.053	n.a.	0.060	0.070	0.006
Zn	0.008	0.001	0.002	0.190	0.002	n.a.	0.011	0.007	n.a.
Ni	0.015	0.015	0.017	0.007	0.037	0.012	0.015	0.023	0.018
Cd	0.013	0.007	n.a.	n.a.	n.a.	0.013	n.a.	0.007	0.093
Mn	0.001	0.005	0.001	0.001	0.019	n.a.	0.001	0.002	n.a.
Mo	n.a.	0.016	n.a.	0.002	0.001	0.017	n.a.	n.a.	0.011
As	n.a.	0.167							
Cu	n.a.								
TDS	0.112	0.085	0.132	0.104	0.070	0.082	0.100	0.049	0.044
TH	0.331	0.231	0.379	0.342	0.190	0.292	0.373	0.139	0.103

* 居民饮用水 P_i 值为 3 年平均值;n.a.代表数据未检出.

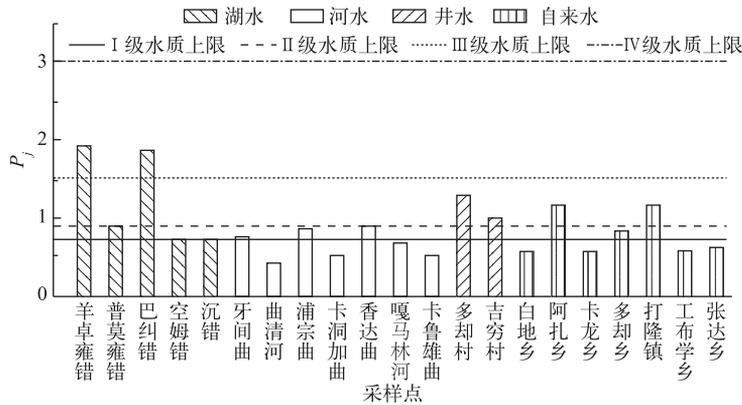


图2 羊卓雍错流域各水体内梅罗污染指数

Fig.2 Nemerow pollution indexes of the waters in Yamzhog Yumco Basin

3 讨论

3.1 地表水质状况及主要污染物

羊卓雍错流域主要湖泊均受到污染或出现水质恶化趋势(5年平均状况),其中羊卓雍错和巴纠错水质最差,受中度污染,其他湖泊水质尚清洁;入湖河流水质则相对较好,清洁或尚清洁. 2010—2014年各地表水体水质变化趋势存在差异,但均在最近2年呈现较好的水质状态,这是自然条件和人为活动共同作用的结果,需进行更深入的调查分析. Se和F⁻为流域地表水体主要污染因子,地表水中的污染物可经水-土-植物-动物系统破坏流域生态环境、制约农业生产的良性发展,并通过食物链间接进入人体内,严重威胁身体健康.

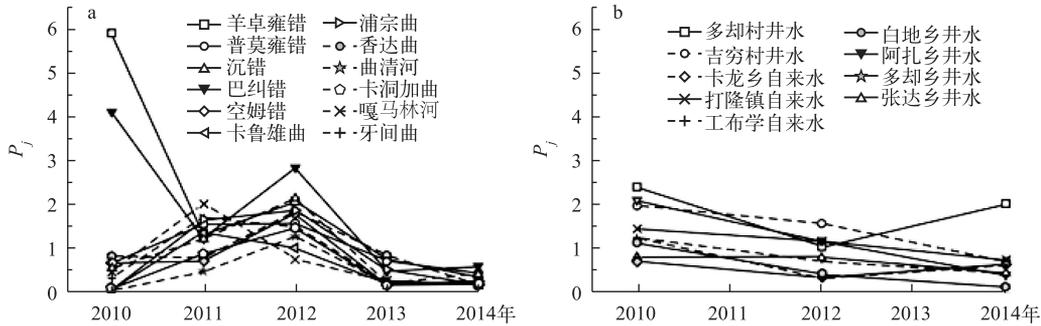


图3 2010—2014年羊卓雍错流域地表水(a)和2012—2014年居民饮用水(b)内梅罗污染指数动态变化
Fig.3 Dynamic changes of Nemerow pollution indexes of surface waters (a) and drinking waters (b) in Yamzhog Yumco Basin during 2010–2014 and 2012–2014, respectively

流域10处地表水体Se浓度超标,其余2处水体中Se浓度也接近标准限值.水体Se多为天然来源,由岩石、土壤淋溶产生,Se具毒性^[17],长期过量摄入将引起消化系统、呼吸系统疾病^[18].巴纠错F⁻浓度超标,沉错、普莫雍错和羊卓雍错F⁻浓度接近标准限值,空姆错及全部入湖河流无F⁻污染,这是受气候条件和水化学特性共同影响的结果:羊卓雍错流域为半干旱气候,降水量小,湖泊蒸发量大,浓缩作用使得湖泊水体中形成大量的氟富集^[19];另外,流域湖泊封闭或交换量小造成水体pH值高,这种碱性水化学条件极利于F⁻的富集.流域入湖河流则因其蒸发相对较弱,pH值相对较低而未存留大量F⁻.同时,空姆错面积较小,水化学特性受其入湖河流——卡鲁雄曲影响极大,也未受F⁻污染.摄入F⁻浓度超标可引起氟斑牙、氟骨症^[20]等慢性中毒性疾病.

3.2 饮用水水质状况及主要污染物

流域自来水水质明显好于井水,这是由于自来水多引自高山泉水,主要受冰雪融水影响,污染较少;而井水多为浅层地下水,易受污染.但流域饮用水水质现状(3年平均状况)并不乐观,在本研究的9处饮用水体中,仅有3处达到清洁标准.2012—2014年间,多却村井水水质恶化,这是由于2011年多却乡接通自来水后,多却村井水被弃用,人为污染加重,但当地很多老人仍饮用此井水;其他饮用水水质均有改善,这与当地饮水工程的逐步完善密切相关.Se、Al和NO₃⁻为流域饮用水污染因子,化学元素多以溶解态或离子形式存在于水体中,人体饮用后吸收率达90%以上^[21],因而饮用水污染对人体健康危害极大.

与流域地表水一致,Se也为饮用水主要污染物,长期饮用可导致人体Se中毒.但该元素也是人体必需微量元素之一,Se缺乏是引起大骨节病、克山病及具有地区多发性癌症的重要原因^[17],特别是西藏自治区为我国大骨节病最为严重的病区之一^[22],山南地区多个县为病区,甚至重病区,而羊卓雍错流域所在的浪卡子县为非病区^[23],这与该流域水体中较高的Se浓度密切相关.各水体中的NO₃⁻和Al浓度差异较大,2种元素分别为多却村和吉穷村井水的主要污染物.硝酸盐是地下水中最常见的污染物之一,除源于地层外,更多来自于生活污水、粪便垃圾的下渗污染和农用化肥污染^[24-25],尤其是多却村井水弃用后,更多的人为污染加重该井水水质的恶化.饮用高浓度硝酸盐水体后,水中硝酸盐在消化系统内被还原为亚硝酸盐,毒性扩大11倍^[26],人体将因缺氧而患高铁血红蛋白症,还可能发生消化系统癌变^[27].Al占地壳含量的8%,具两性,吉穷村井水pH值较高(多年pH平均值为9.03),促使土壤中的Al溶解进入井水^[28].虽然Al在毒理学上属于低毒性金属元素,但水中的游离Al³⁺体积小、生物半衰期长,极易进入血液并蓄积^[29],多引发铝型脑病、铝型骨病和铝型贫血^[30]3种中毒性疾病.此外,F⁻也是人体的必须微量元素,适量的F⁻可以预防龋齿,并对骨骼的形成和增强至关重要^[19],而打隆镇自来水中F⁻浓度过低,极易引起龋齿、骨质疏松等疾病^[31].

3.3 防治措施

为有效控制和减少羊卓雍错流域水体污染,维护生态环境和当地居民生产、生活的健康发展,结合羊卓雍错流域经济社会发展实际,提出以下防治措施:做好水环境保护的宣传教育工作,使当地农牧民了解流域水质现状并意识到水质恶化所带来的危害;开展流域环境综合整治,改善农村生活固体垃圾随处堆放、生活

污水无序排放现状;控制农业面源污染,推进畜禽养殖污染物的无害化、资源化,降低作物种植中农药的使用量,严禁剧毒、高残留农药的使用;做好饮用水安全保障工作,继续完善饮用水基础设施建设,提倡饮用自来水,尽量避免饮用井水;继续加强流域水质监测,及时为有关部门决策提供科学依据。

4 结论

羊卓雍错流域地表水体中,羊卓雍错和巴纠错水质状况最差,水体中度污染(Ⅳ级水质);沉错、空姆错、牙间曲、浦宗曲、普莫雍错、香达曲水体尚清洁(Ⅱ级水质);曲清河、卡洞加曲、卡鲁雄曲、嘎马林河水体清洁(Ⅰ级水质)。水体Se浓度普遍超标或接近标准范围上限;巴纠错F⁻浓度超标,羊卓雍错、普莫雍错和沉错中F⁻浓度接近标准值上限。2010—2014年各地表水水质变化存在差异,但均在最近2年保持较好水质。居民饮用水体中,自来水主要引自高山泉水,受污染较小,因而水质好于井水,具体而言,多却村、吉穷村井水及打隆镇、阿扎乡自来水受轻度污染(Ⅲ级水质);多却乡、工布学乡自来水尚清洁(Ⅱ级水质);张达乡、白地乡、卡龙乡自来水未受到污染(Ⅰ级水质)。2012—2014年间,除多却村井水外的其他饮用水水质均有所提升。Se为饮用水主要超标项;NO₃⁻、Al³⁺分别为多却村井水、吉穷村井水的污染指标。水质污染不仅破坏流域生态环境、阻碍农业生产等社会经济活动的可持续发展,更威胁到当地居民身体健康。因此,水质保护的宣传教育、流域环境的综合整治、控制农业面源污染、饮用水安全保障工作以及持续的水质监测亟需加强。

必须指出的是,流域水质变化是全球变化研究的一个重要方面,本研究对近5年地表水和近3年饮用水水质变化情况做了说明,但数据时间尺度小,还需进行流域水质的长期监测和分析。其次,受野外条件限制,采样点的布设仍不完善,如缺少普莫雍错西部及湖心采样点、河水采样点仅布设在河流入湖口、居民饮用水采样点偏少等,亟需加大空间采样密度。另外,目前尚不能精准判断流域水体污染物来源,人口分布、生产生活方式的深入调查可为人为活动的污染提供数据支撑,将在未来工作中进行补充。最后,为更好地探讨水质与地方病的关系,有必要对当地医疗部门进行调研,获得地方病情准确资料,做好量化分析工作。

5 参考文献

- [1] Gibbs RJ. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [2] Cullaj A, Hasko A, Miho A *et al.* The quality of Albanian natural waters and the human impact. *Environment International*, 2005, **31**(1): 133-146.
- [3] 叶麟,黎道丰,唐涛等. 香溪河水质空间分布特性研究. *应用生态学报*, 2003, **14**(11): 1959-1962.
- [4] 解莹,李叙勇,王慧亮等. 滦河流域上游地区主要河流水污染特征及评价. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 645-653.
- [5] 高伟,陈岩,徐敏等. 抚仙湖水质变化(1980—2011年)趋势与驱动力分析. *湖泊科学*, 2013, **25**(5): 635-642. DOI 10.18307/2013.0503.
- [6] 孙瑞,张雪芹,郑度. 藏南羊卓雍错流域水化学区域差异及其成因. *地理学报*, 2013, **68**(1): 36-44.
- [7] 王君波,彭萍,马庆峰等. 西藏玛旁雍错和拉昂错水深、水质特征及现代沉积速率. *湖泊科学*, 2013, **25**(4): 609-616. DOI 10.18307/2013.0420.
- [8] 徐彬,林灿尧,毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析. *水资源保护*, 2014, **30**(2): 38-40.
- [9] 张雪芹,孙瑞,朱立平. 藏南羊卓雍错流域主要湖泊水质状况及其评价. *冰川冻土*, 2012, **34**(4): 950-958.
- [10] 孙涛,张妙仙,李苗苗等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价. *环境科学与技术*, 2014, **37**(4): 185-190.
- [11] 孙瑞,张雪芹,吴艳红. 藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素. *湖泊科学*, 2012, **24**(4): 600-608. DOI 10.18307/2012.0414.
- [12] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志. 北京:地质出版社,1993:249-256.
- [13] 孙伟光,邢佳,马云等. 单因子水质标识指数评价方法在某流域水质评价中的应用. *环境科学与管理*, 2010, **35**(11): 181-184, 194.
- [14] 曾永,樊引琴,王丽伟等. 水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较. *人民黄河*, 2007, **29**(2): 45-45, 65.
- [15] Nemerow NL. *Scientific stream pollution analysis*. New York: McGraw-Hill, 1974: 1-358.

- [16] 侯佳辛. 基于内梅罗污染指数法的区域水环境评价——以玛纳斯河流域为例. 内蒙古水利, 2012, (5): 8-9.
- [17] 王秀红, 相有章, 屈福荣等. 内、外环境硒营养水平与克山病发病关系的研究. 中国地方病防治杂志, 2005, 20(6): 351-353.
- [18] 余祖新. 高硒和低硒区住院病人疾病谱与死因构成. 地方病通报, 1992, 7(4): 13-15.
- [19] 杨林锋, 彭明霞, 文琛等. 氟污染现状及其治理技术研究进展. 江西科学, 2010, 28(5): 641-645, 665.
- [20] 于丽萍, 陈建杰, 陈阿丽等. 2013年宁夏饮水型地方性氟中毒病区调查结果与分析. 医学动物防制, 2015, 31(4): 401-403.
- [21] 陈树榆, 王广仪, 席宜平等. 长寿之乡——江苏如皋微量元素环境调查. 广东微量元素科学, 2005, 12(1): 13-18.
- [22] 李顺江, 杨林生, 王五一等. 西藏大骨节病与饮水硒关系研究. 中华地方病学杂志, 2006, 25(4): 428-429.
- [23] 西绕若登. 西藏自治区大骨节病分布现状. 中国地方病防治杂志, 1999, 14(2): 115-116.
- [24] 张洪, 王五一, 李海蓉等. 地下水硝酸盐污染的研究进展. 水资源保护, 2008, 24(6): 7-11.
- [25] 郭占景, 杨玲, 范尉尉等. 河北省某县饮用水硝酸盐污染状况及其影响因素分析. 环境卫生学杂志, 2013, 3(4): 324-327.
- [26] 孙宏丽. 生活饮用水中的氨氮污染状况. 中国卫生工程学, 2011, 10(6): 529-530.
- [27] 毕晶晶, 彭昌盛, 胥慧真. 地下水硝酸盐污染与治理研究进展综述. 地下水, 2010, 32(1): 97-102.
- [28] Krewski D, Yokel RA, Nieboer E *et al.* Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 2007, 10(S1): 41-67.
- [29] 王红华. 饮用水中铝的来源危害与防治. 微量元素与健康研究, 2006, 23(1): 60-63.
- [30] 王晏山, 颜西斌, 张洪林. 我国饮用水中存在的主要问题及解决方法. 工业安全与环保, 2005, 31(4): 17-18, 6.
- [31] 谢正苗, 吴卫红, 徐建民. 环境中氟化物的迁移和转化及其生态效应. 环境科学进展, 1999, 7(2): 40-53.