

林芝市饮用水水源地健康风险评价

段小龙¹, 郝凯越¹, 黄德才¹, 李远威¹, 宗永臣^{1,2}

(1. 西藏农牧学院 水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000)

摘要: 为掌握林芝市饮用水水源地水质安全现状,对其境内7个县级以上饮用水源地水样进行检测和分析,通过综合水质标识指数法评价了各水源地水质现状,运用健康风险评价模型评价了各水源水的健康风险。结果表明:林芝市水源地水质总体良好,能满足地表水源地保护区水质功能区II类标准(镉除外),各水源地水体中重金属和氮盐指标经饮水途径对人体造成健康危害的总风险 $8.88 \times 10^{-5} \sim 1.12 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间,均超过了国际放射防护委员会推荐值 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,主要风险因子为致癌物Cd。各水源地致癌物质风险值远高于非致癌物质,该地区人们所面临的致癌风险以镉为主,这需引起水源地管理部门的重视,其余非致癌物风险低于最大可接受限制,对人体健康几乎不构成危害,适合作为饮水水源。

关键词: 饮用水水源地; 健康风险评价; 综合水质标识指数法; 林芝市

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0097-05

Health risk assessment of drinking water sources in Linzhi City

DUAN Xiaolong¹, HAO Kaiyue¹, HUANG Decai¹, LI Yuanwei¹, ZONG Yongchen^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Civil Engineering, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 2. Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Linzhi 860000, China)

Abstract: In order to grasp the water quality safety status of drinking water sources in Linzhi City, we tested and analyzed the drinking water from seven water sources of county level and above. The respective water quality of the seven sources was assessed using comprehensive water quality labeling index method and their individual health risk assessments were carried out using a health risk assessment model. The results show that the water quality of the city is generally good, and meets the Class II standard of water quality (excluding Cd content). The total health risk of heavy metals and nitrogen salts in the water bodies of these sources is $8.88 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1} \sim 1.12 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$. Because of the over-high mass concentration of Cd, most of the individual annual health risks exceed the value ($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$) recommended by International Commission on Radiological Protection (ICRP). It is found that the health risk of carcinogens in each water source is much higher than that of non-carcinogens, and the cancer risk faced by the people in this area is mainly caused by Cd, which needs to be addressed by the local department of water source administration. Whereas the remaining non-carcinogen risk is below the maximum acceptable limit, which has little effect on the water quality and poses hardly any threat to human health.

Key words: drinking water source; health risk assessment; comprehensive water quality labeling index method; Linzhi City

1 研究背景

林芝市现为西藏经济社会最为发达的区域之

一,以世界上最深的大峡谷和“西藏江南”的美誉闻名于世。由于特殊的地理、气候原因,拥有丰富的水资源,为该市居民的生活与生产提供了良好的物质

收稿日期:2019-11-18; 修回日期:2019-12-30

基金项目:西藏地区自然科学基金项目(XZ 2018 ZR G-20); 国家自然科学基金项目(51868069); 西藏自治区科技计划项目(XZ201901-GB-13)

作者简介:段小龙(1993-),男,四川达州人,硕士研究生,主要致力于市政工程方向研究。

通讯作者:宗永臣(1976-),男,河南安阳人,博士,教授,主要致力于市政工程和环境科学研究。

基础。相关研究表明^[1-3],目前林芝市饮用水源大都符合国家水源地标准^[4],但无法反映长期饮用对人体健康造成的危害风险。长期以来,对饮用水水质优劣的评价仅限于与国家水质标准进行对比,重点关注超标情况,而忽略了一些符合标准的污染物长期的低剂量暴露对人体的健康隐患^[5-7],缺乏水质安全评价的全局性。随着水环境研究的深入,国内外学者提出许多评估水质健康风险的方法,例如蒙特卡罗方法、生命周期法和“四步法”等^[8-9]。

本文采用综合水质标识指数法^[10-12]和由美国环保署提出的健康风险评价模型^[13-15],以林芝市各水源中常规指标及金属离子的实测浓度为研究对象,对7个水源地进行水质评价以及经饮水途径对人体健康危害的风险进行定量评价。本研究将健康风险与水质评价相结合,帮助水源管理部门确定治理污染物的优先级,提升饮水安全。

2 材料和方法

2.1 研究区概况

林芝市(26°52'~30°40'N,92°09'~98°47'E)位于西藏东南部,处在雅鲁藏布江中下游,该市平均海拔3 100 m,最低处约有900 m,垂直地貌落差巨大,为典型的高山峡谷地貌。属于温带季风气候,雨热同期,降水充沛,气候温和,年平均温度8.7℃,年日照超过2 022 h。林芝市是西藏地表水最发达的地区,全境水网密集,城镇供水基本来源于山脉峡谷间的河流且饮用水水源地保护区大多在有农牧民生活、耕作的山谷之中,其中一些水源地保护区内有居民住房和违章建筑等,给水源地的管理和水质安全造成很大的隐患^[16]。

2.2 水样采集与测定

通过对基础资料和各水源地流域野外调查结果进行系统分析,结合检测要求和采样的可行性及方便性等因素综合考虑,决定在林芝市7个县级以上水源地设置现场采样点:S1巴宜区、S2工布江达县、S3米林县、S4朗县、S5波密县、S6墨脱县、S7察隅县,这些采样点主要位于市政自来水取水点上游,各采样点具体位置见图1。

采样时间设定为2019年3月和7月,即雨季前后。采样过程严格参照《水质 采样技术指导》(HJ 494-2009)^[17],在每次采样过程中每个采样点都采集平行样和空白样,7个饮用水水源地共采集294份水样;采集后送回实验室用0.45 μm滤膜过滤后,放入冰箱冷藏保存以待后续的分析检验。水质

检测数据录入Excel软件作为数据库,运用SPSS、Excel等软件进行数据统计和分析工作。检测结果发现各水质指标并未随雨季发生明显变化规律,故以两次采样检测结果的平均值建立指标体系进行水质评价,不按雨季前后进行分析。



图1 水源地水样采样点分布图

2.3 综合水质标识指数法

综合水质标识指数法(I_{wq})是以单因子水质标识指数为基础,可以全面的反映河流综合水质的方法^[19]。该方法可以简单且综合地对河流进行定性与定量评价,可用于不同水质的评价比较能更科学判定河流综合水质类别。综合水质标识指数由一位整数和3(或4)位小数位构成,其公式为:

$$I_{wq} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 \quad (1)$$

式中: X_1 为综合水质类别; X_2 为在 X_1 中所处位置; X_3 为劣于水质标准的单项水质指标个数; X_4 为水质级别和水源级别的比较结果。该公式的计算方法详见相关文献^[18-19],通过 I_{wq} 的前两位数字 $X_1 \cdot X_2$,可以判定综合水质级别。

2.4 健康风险评价模型

健康风险评价是一种间接反映水质污染的方法,以危害人体健康风险度作为评价指标,定量描述水中污染物对人体产生健康危害风险的一种评价手段^[20-21]。本研究采取美国环保署(USEPA)采用的健康风险评价模型,经饮水途径致癌物质健康风险评价模型如下:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_i^c \quad (2)$$

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i q_i)] / 70.6 \quad (3)$$

$$D_i = 2.2 C_i / 65 \quad (4)$$

式中: R^c 为致癌物造成的个体总致癌健康风险值, a^{-1} ; R_i^c 为致癌物造成的人均致癌年风险, a^{-1} ; D_i 为致癌物 i 的单位重量日平均暴露量, $mg/(kg \cdot d)$ ^[22]; q_i 为致癌物致癌系数, $(kg \cdot d)/mg$;70.6为西藏居民2019年平均期望寿命;2.2为成人平均每日饮水量, L/d ;65为成

人平均体重,kg^[23]; C_i 为致癌物实测浓度,mg/L。

经饮水途径非致癌物质健康风险的评价模型如下:

$$R^n = \sum_{i=1}^k R_i^n \quad (5)$$

$$R_i^n = (D_i \times 10^{-6} / RfD_i) / 70.6 \quad (6)$$

式中: R^n 为非致癌物质造成的个体健康危害年风险, a^{-1} ; R_i^n 为非致癌物质造成的人均健康危害年风险值, a^{-1} ; D_i 为非致癌物质 i 的每单位重量日平均暴露量, $mg/(kg \cdot d)$ ^[22]; RfD_i 为水源水中非致癌物的参考剂量 $mg/(kg \cdot d)$ ^[24]。

此外,假设各有毒物质的作用是独立,那么经饮水途径对人体健康造成的总健康危害风险 $R_{\text{总}} = R^c + R^n$ 。在健康风险评价中,评价对象通常为水源水体中可能危害人体健康的污染物^[25]。本研究中筛选铜、硝酸盐氮、氨氮、镉、铬、锌、铅,作为评价指标进行健康风险评价,其中根据国际癌症研究机构(IARC)分类水体中镉、铬作为致癌物质进行评价。模型中致癌强度系数和非致癌物质参考剂量均参照美国环保署风险整合系统标准^[26],具体数值见表 1。

表 1 化学致癌物致癌强度系数及化学非致癌物参考剂量 $mg/(kg \cdot d)$

化学致癌物		化学非致癌物				
Cd	Cr	NH ₃ —N	NO ₃ —N	Cu	Zn	Pb
6.100	41.000	0.970	1.600	0.005	0.0003	0.001

3 结果分析与讨论

3.1 综合水质标识指数法评价

以地表水环境质量标准中的基本水质指标为对象,计算每个水质指标的污染分担率^[27]。结果发现,污染分担率较高的指标有 TN、TP、NH₃—N、COD、Cd 等。结合林芝地区的实际情况,本文选取 DO、TN、TP、NH₃—N、COD、Cd 这 6 项指标等作为主要评价指标。通过综合水质标识指数评价方法对林芝各水源地水质现状进行评价,评价结果见表 2。

由表 2 可知,2019 年林芝市大部分水源地水质良好,总体水质标识指数在 1.400 ~ 2.011 范围内,综合水质在 I 类水中等到 II 类水上等之间。除米林县的水质综合标识指数中 X_1 、 X_2 值为 2.011 属 II 类水,水质相对较差外,其他各县的水质在 1.40 ~ 1.80 之间均为 I 类水,水质清洁。工布江达县、巴宜区、朗县、波密县、墨脱县的 X_3 值均为 0,说明没有

劣于水质标准的指标;而米林县和察隅县综合标识指数中 X_3 和 X_4 值均为 1,结合单因子水质标识指数表明两地水体中镉浓度指标超标。林芝市水源地镉污染相对来说是较严重的,其次是 TN、TP、NH₃—N、COD 污染相对较轻。各水源地大部分的水质指标浓度在国家 I 类水标准限值内,TN、TP、Cd 浓度大都在 II 类,需要注意的是米林县镉的浓度应加大监测频率和采取相应治理措施,保障人们的饮水安全。

表 2 综合水质标识及单因子水质标识评价结果

水源地 采样点	单因子水质标识指数						综合标识 指数 I_{wq}	综合水 质类别
	TN	TP	COD	NH ₃ —N	DO	Cd		
S1	2.1	1.0	1.0	1.0	1.0	2.4	1.400	I 类
S2	2.9	2.1	1.0	1.0	1.0	2.8	1.800	I 类
S3	2.2	2.7	1.0	1.0	1.0	3.2	2.011	II 类
S4	1.0	2.3	1.0	1.0	1.0	2.7	1.500	I 类
S5	2.2	1.0	1.0	1.0	1.0	2.8	1.500	I 类
S6	2.3	1.0	1.0	1.0	1.0	2.5	1.500	I 类
S7	2.2	1.0	1.0	1.0	1.0	2.9	1.711	I 类

3.2 健康风险评价

根据健康风险评价模型、参考剂量和水质检测数据,计算出林芝市各饮用水源地水体中经饮水途径所造成的化学致癌物健康风险(表 3)和化学非致癌物健康风险(表 4)及林芝市饮水途径致健康危害的平均个人年总风险(图 2)。

对于致癌物质健康风险值而言,国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大限值为 $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ 。由表 3 可以看出,在水源地水体中经饮水途径造成的致癌风险铬的风险值相对较小,在各水源地均低于最大可接受限值;而镉的致癌风险相对较大,其健康风险值均高于最大可接受限值,尤其需要注意的是波密县和米林县的饮用水源水体中镉的健康风险分别为 1.08×10^{-4} 和 $1.06 \times 10^{-4} a^{-1}$,长期饮用存在一定的健康危险,饮用前需进行一定的处理。

对于非致癌物质而言,ICRP 推荐的最大可接受限值为 $1.0 \times 10^{-9} a^{-1}$,根据表 4 得出:造成健康危害风险以非致癌物质铅相对较大,铜和氨氮次之,较小的是锌和硝态氮;它们的均风险值集中在 $10^{-9} \sim 10^{-11} a^{-1}$,即是说约每千万人中不到 1 人的健康因长期饮水而受到危害,说明非致癌物质对人体造成的健康危害甚微;应当指出墨脱县的水源地非致癌物质风险最大的是铅,健康风险值为 $1.51 \times 10^{-9} a^{-1}$,察隅县的水源地非致癌物质风险最大的是铜,

健康风险值为 $1.36 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$, 它们都超过了最大可接受值, 还有工布江达县和察隅县的铅离子, 健康风险值分别为 $8.73 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ 和 $8.08 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$,

虽然没超过最大值, 但是也比较接近限值。除此之外, 林芝市其他水源地饮用水中的非致癌物质的健康风险值均未超过最大值。

表3 化学致癌物质饮水途径健康危害的平均个人年风险

水源地	巴宜区	工布江达县	米林县	朗县	波密县	墨脱县	察隅县
Cr	5.06×10^{-6}	6.67×10^{-6}	5.66×10^{-6}	5.82×10^{-6}	7.53×10^{-6}	1.23×10^{-6}	1.03×10^{-6}
Cd	8.19×10^{-5}	8.21×10^{-5}	1.06×10^{-4}	5.56×10^{-5}	1.08×10^{-4}	5.36×10^{-4}	6.54×10^{-5}

表4 非致癌物质饮水途径健康危害的平均个人年风险

水源地	巴宜区	工布江达县	米林县	朗县	波密县	墨脱县	察隅县
NH ₃ -N	6.18×10^{-11}	1.01×10^{-10}	1.01×10^{-10}	5.68×10^{-11}	1.01×10^{-10}	5.44×10^{-11}	5.68×10^{-11}
NO ₃ -N	1.65×10^{-11}	1.05×10^{-11}	1.50×10^{-11}	2.25×10^{-11}	1.05×10^{-11}	1.65×10^{-11}	1.65×10^{-11}
Cu	4.38×10^{-10}	4.02×10^{-10}	3.55×10^{-10}	3.83×10^{-10}	3.13×10^{-10}	5.78×10^{-10}	1.36×10^{-9}
Zn	3.71×10^{-11}	5.69×10^{-11}	3.60×10^{-11}	4.38×10^{-11}	3.72×10^{-11}	4.07×10^{-11}	4.34×10^{-11}
Pb	6.78×10^{-10}	8.73×10^{-10}	6.66×10^{-10}	7.77×10^{-10}	7.74×10^{-10}	1.51×10^{-9}	8.08×10^{-10}

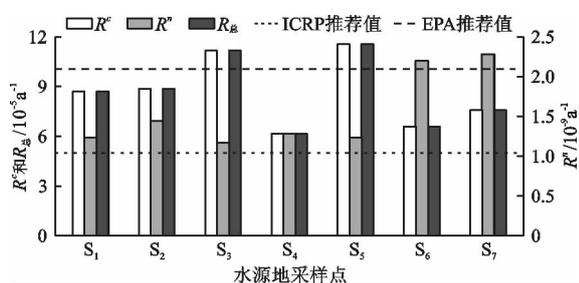


图2 林芝市饮水途径致健康危害的平均个人年总风险

3.3 讨论

根据林芝市各水源地水质评价结果和地表水环境质量标准^[4]相比较再结合图2可知, 林芝市各水源地水质现状基本达标, 镉和氮磷营养盐在林芝市饮用水源地水体中起主导作用, 镉在波密县和米林县的水源地水体中的含量高于国家标准限值, 其他水源地各项水质指标浓度均未超过国家标准的限值, 适合作为饮水水源。将水质评价结果和健康风险评价结果综合起来分析, 可以更准确地说明水源地水质的优劣。林芝市水源地水中致癌物经以饮水方式所造成的致癌年风险值 R^c 远高于非致癌物的健康危害年风险 R^n , 两者的风险值相差5~6个数量级, 表明各类有毒物质的总健康危害风险值中, 致癌物所占比例是最大的同时也为决定因素, 结论与相关研究一致^[15]。

林芝市水源地各污染物经饮水途径引起的总健康风险在 $7.57 \times 10^{-4} \sim 1.15 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ 之间, 高于ICRP推荐值。各污染物的健康风险值由小到大排序为: 硝态氮 < 锌 < 氨氮 < 铜 < 铅 < 铬 < 镉, 重金属是

主要污染和致癌物质, 结论与 Qu 等^[1]、ZHANG 等^[2]和 ZONG 等^[3]对西藏及林芝水环境研究结果类似。由图2可得, 林芝市水源地水体的总健康风险值由小到大依次为: 朗县 < 墨脱县 < 察隅县 < 巴宜区 < 工布江达县 < 米林县 < 波密县。波密县和米林县的致癌健康风险较大, 超过了ICRP和EPA推荐的最大可接受风险水平, 其中镉是主要风险因子, 在饮用前需对镉污染物进行适当处理; 米林县和察隅县水源地水体中的非致癌物质铅、铜所造成的健康危害风险也超过了ICRP推荐值, 但对健康影响甚微可不做处理。上述重金属污染表明人类活动特别是林芝市的采矿活动以及水源地保护区的居民生活产生的垃圾对水源重金属污染的影响不可忽视, 这和前人的研究结论类似^[16,28]。林芝市除波密县和米林县外其他水源地总的健康风险值高于ICRP推荐值低于EPA推荐的风险限值, 对人体健康几乎不构成危害。应当指出美国环保署认为个人年致癌风险水平为 10^{-4} 时是可以接受的, 没有IARC的最大可接受限值严格, 本文采用了后者的标准。本研究假设不同污染物的作用是独立, 且未对将其他污染物质和暴露途径等因素进行分析, 风险值可能低于实际值, 应用时需要关注。

4 结论

(1) 林芝市水源地水质总体良好, 各项水质指标基本能满足集中式生活饮用水地表水源地水质功能区II类标准, 镉和氮磷营养盐为主要污染物, 米林县和察隅县水源地镉浓度高于国家标准限值, 应引

起注意。

(2)林芝市水源地饮用水中的致癌物质经饮水途径所造成的健康风险比非致癌物质危害更大,其中镉是主要风险因子,建议水源地管理部门在防治水源时,应优先控制致癌物镉。

(3)林芝市水源地饮用水健康风险值由小到大依次为:朗县<墨脱县<察隅县<巴宜区<工布江达县<米林县<波密县。关于林芝市水源地健康风险的研究是初步的,还有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] QU Bin, ZHANG Yulan, KANG Shichang, et al. Water quality in the Tibetan Plateau: Major ions and trace elements in rivers of the "Water Tower of Asia" [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,649:571-581.
- [2] ZHANG Qian, WANG Shengli, YOUSAFE M, et al. Hydro-chemical characteristics and water quality assessment of surface water in the northeast Tibetan Plateau of China [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2018, 18(5):1757-1768.
- [3] ZONG Yongchen, HUANG Decai, DUAN Xiaolong, et al. Safety evaluation of rural drinking water sources in Nang County, Tibet Autonomous Region of China [J]. *Applied Ecology And Environmental Research*, 2019,17(2):5081-5091.
- [4] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB3838-2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [5] MUHAMMAD S, SHAH M T, KHAN S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan [J]. *Micro-Chemical Journal*, 2011,98(2):334-343.
- [6] 龙睿,许云海,刘亚宾,等. 长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水质变化及其评价[J]. *环境化学*, 2019,38(8):1882-1890.
- [7] 蔡建民,楼晓明,章荣华,等. 浙江省部分农村饮用水水质监测结果分析[J]. *中国预防医学杂志*, 2007,8(3):263-264.
- [8] 张建龙,解建仓,汪妮,等. 基于改进蒙特卡罗方法的再生水回用健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2010,30(11):2353-2360.
- [9] 韩梅,付青,陈艳卿. 城市地表饮用水源地水质健康风险综合指数评价方法研究[C]//中国环境科学学会学术年会. 2012 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京:中国农业大学出版社, 2012.
- [10] 李名升,张建辉,梁念,等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. *地理科学进展*, 2012,31(5):617-624.
- [11] 张欢,纪桂霞. 综合水质标识指数法在公园湖泊水质评价中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2012,23(3):146-150.
- [12] 郑群威,苏维词,杨振华,等. 乌江流域水环境质量评价及污染源解析[J]. *水土保持研究*, 2019,26(3):204-212.
- [13] US EPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food [R]. Washington DC:U. S. Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs, 2000.
- [14] ABDOLAHNEJAD A, GHEISARI L, KARIMI M, et al. Monitoring and health risk assessment of phthalate esters in household's drinking water of Isfahan, Iran [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018,16(11):7409-7416.
- [15] 耿雅妮,杨宁宁,董洁,等. 宝鸡市饮用水源地重金属健康风险评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2019,30(3):73-77+84.
- [16] 乔明,黄川友. 西藏自治区城镇饮用水水源地存在的问题及对策研究[J]. *西藏科技*, 2011(4):19-20.
- [17] 国家环境保护总局. 水质 采样技术指导:HJ 494-2009 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2009.
- [18] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005,33(3):321-325.
- [19] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005,33(4):482-488.
- [20] 付昌昌,李向全,张岩,等. 盐城滨海平原地下水质量现状及健康风险评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2017,28(5):54-60.
- [21] GIRI S, SINGH A K. Human health risk assessment via drinking water pathway due to metal contamination in the groundwater of Subarnarekha River Basin, India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015,187(3):63.
- [22] 胡尊芳,宋印胜,臧凯,等. 东平湖水环境健康风险初步评价[J]. *山东国土资源*, 2016,32(2):65-69.
- [23] 段小丽,聂静,王宗爽,等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况[J]. *环境与健康杂志*, 2009,26(4):370-373.
- [24] 司家济,高良敏,解志林. 焦岗湖水环境重金属分布及健康风险评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2019,31(3):41-44.
- [25] 李莹莹,张永江,邓茂,等. 武陵山区典型生态保护城市饮用水源地水质人体健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2017,30(2):282-290.
- [26] US EPA. EPA/600/R-09/052A Exposure factors handbook:2009 update [S]. Washington DC, 2009.
- [27] 谈旭初. 依据污染分担率划分地表水污染类型的方法[J]. *环境科学与管理*, 2009,34(4):7-8+12.
- [28] 洛桑卓玛. 西藏雅鲁藏布江水质及其时空分布特征[J]. *科学咨询(科技·管理)*, 2018(7):46.