DOI: 10.5846/stxb201806031241
张惠芳,刘欢,苏辉东,靳甜甜,蔺彬彬,林俊强.1995—2014 年拉萨河流域水环境变化及其驱动力分析.生态学报,2019,39(3): - .
Zhang H F, Liu H, Su H D, Jin T T, Lin B B, Lin J Q. Analysis on trend and driving force for water environmental change of the Lhasa River basin (1995—2014). Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

1995—2014 年拉萨河流域水环境变化及其驱动力分析

张惠芳[1],刘 欢[2],苏辉东[2,3],靳甜甜[2,*],蔺彬彬[2,3],林俊强[2]

1 西藏自治区环境监测中心站,拉萨 850000
2 中国水利水电科学研究院,北京 100038
3 清华大学水利水电工程系,北京 100084

摘要:探究自然环境和人类活动影响下的河流水环境变化,对于流域水资源管理和保护有重要意义。目前从较长时间尺度上系统开展拉萨河流域水环境的研究较少,基于拉萨河流域达孜、卡林、才纳 3 个环境监测中心站近 20 年(1995—2014)的水质资料,综合单因子指数法和内梅罗指数法评估拉萨河流域水环境状况,并采用 Mann-Kendall 检验法分析其多年变化趋势。同时,从经济社会和自然环境两个方面通过灰色关联分析法识别了影响流域水环境变化的关键驱动因子,以期为流域水环境保护提供借鉴。结果表明:(1)总体上,拉萨河流域水环境状况良好,满足水功能区要求;(2)水体中 pH、溶解氧、化学需氧量、总磷等指标的取值较高,在 0.7 左右,是拉萨河流域水环境需重点关注指标;(3)水环境质量稍有下降,内梅罗指数从 1995 年的 0.62 增加到 2014 年的 0.73;(4)近 20 年来拉萨河流域水环境变化的主要驱动因子为降水量、牲畜存栏数、人口数、农村人口数和国民经济生产总值等,农村农业非点源污染是拉萨河流域的主要污染源,要重点关注和管控。

关键词:拉萨河流域;水环境;驱动力;非点源污染

Analysis on trend and driving force for water environmental change of the Lhasa River basin (1995—2014)

ZHANG Huifang[1], LIU Huan[2], SU Huidong[2,3], JIN Tiantian[2,*], LIN Binbin[2,3], LIN Junqiang[2]

1 *Environmental Monitoring Center Station of Tibet Autonomous Region, Lhasa* 850000, *China*
2 *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*
3 *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*

Abstract: Studying the influence of the natural environment and human activities on river water environment is of great significance for the management and protection of river basin water resources. Systematic and long-term research on water environment of the Lhasa River Basin is needed to provide necessary technical support for scientific decision-making. Based on the water quality data of three environmental monitoring stations in the Lhasa River Basin (Dazi, Kalin, and Caina) over the past 20 years (1995—2014), the single factor index method and the Nemerow index method were applied to assess the water environment. The Mann-Kendall test was used to analyze the multi-year trends of the water environment. Further, the key driving factors affecting change in the water environment of the river basin were identified from the economic, social, and natural environment using the grey correlation analysis method, which can provide a reference for protection of the watershed water environment. The results showed that: (1) the overall water quality at the three environmental monitoring stations was in good condition and met the requirements of the water function zone; (2) the index of pH, dissolved oxygen, ammonia nitrogen, and total phosphorus was about 0.7 (higher than other indicators), and could be the main indicators

基金项目:西藏自治区重点科技计划项目(Z2016C01G01/08)和国家重点研发计划(2016YFC0502103)
收稿日期:2018-06-03; **修订日期**:2018-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jtt_05@163.com

affecting the water environment in Lhasa River Basin; (3) the water environment of the Lhasa river basin was in good condition with a certain degree of a downward trend, and the Nemerow index increased from 0.62 in 1995 to 0.73 in 2014; (4) The water environment has changed in the Lhasa river basin in the past 20 years, and was mainly affected by precipitation, livestock stock population, rural population, and GDP. The main source of pollution in the Lhasa river basin was non-point source pollution from rural areas and agriculture, which should be focused on and controlled in the future.

Key Words: Lhasa river basin; water environment; driving force; non-point source pollution

河流水环境是生态环境的重要组成,河流水环境安全影响着人民生命健康和社会经济可持续发展。由于人类活动强度的不断增加以及自然环境的变化,河流水环境受到严重威胁,变化环境下的水环境污染问题研究已成为当今世界主要研究课题之一[1]。其中,分析探讨河流水环境的变化特征及驱动力,对于水资源的合理开发利用具有重要的实践意义。Singh 等[2]采用多元统计分析方法,对 Gomti River 的 24 个水质参数(PH、水温等)进行分析,研究了河流水环境的时空变化特征。Chang[3]分析了 Han River 及其支流在 1993—2002 年中水环境时空变化,识别了主要影响因子。Şener[4]等结合水质指标法和 GIS 技术评估 Aksu River 的水环境状况,认为化学需氧量 COD 是造成水环境恶化的主要参数。山鹰等[5]分析了上海 11 个区县共 19 条河道的氮磷污染特征,认为人工水生态修复措施和生态型驳岸建设对改善河道水质具有潜在价值。张汪寿等[6]利用多元统计法对北运河武清段水污染的时空变异特征进行了分析,王超[7]等基于海河流域人口规模、经济产值和土地利用变化过程,从流域废污水排放和水资源利用等角度研究了社会经济对水环境的影响机制。

拉萨河是拉萨市、林周县和当雄县等县(市)的重要水源地,对区域工农业发展及生态环境保护起着重要作用[8]。近年来,经济发展和人口增长威胁着拉萨河的水环境安全,非点源污染严重,已引起政府和学者的关注[9]。拉萨河流域现有研究中,更多侧重于其丰富的水利水资源利用以及气候变化对其水量的影响[10],水环境研究方面主要有河流重金属污染[11]、非点源污染[8]、水化学特征分析等[12]。然而,长时间尺度上开展水环境变化及驱动力的研究较少。基于此,本文收集拉萨河干流上达孜、卡林、才纳 3 个水环境监测中心站近 20 年(1995—2014)的水质资料,以单因子指数法确定主要污染指标,以内梅罗指数法综合评估拉萨河水环境质量,采用 Mann-Kendall 检验法对河流水环境变化趋势进行判别。同时,收集研究期内拉萨河流域国民经济发展统计数据,通过灰色关联分析,从经济社会发展和自然环境演变两个角度识别导致拉萨河水环境变化的关键驱动因子,以期为当地水资源管理提供科学依据。

1 研究区概况

拉萨河发源于念青唐古拉山中段南麓,沿途有桑曲、拉曲、学绒藏布、墨竹马曲、澎波河、堆龙曲等主要支流汇入,于曲水县城东面河口汇入雅鲁藏布江中游。河流比降 0.29%,多年平均径流量 110 亿 m^3,雨雪补给为主。拉萨河流域(29°20′—31°15′N,90°05′—93°20′E)面积约 3.25 万 km^2,属高原温带半干旱季风气候,年平均气温 6.3—9.1℃,年降水量 257—699 mm。流域内植被与土壤具有明显垂直分布规律,在海拔 5200 m 以上为高原寒漠土,4200 m 以下为山地灌丛草原土,植被稀疏,以草原草甸为主。

拉萨河流域包括拉萨市城关区、林周县、当雄县、曲水县、堆龙德庆区、达孜县、墨竹工卡县、那曲县和嘉黎县 7 县 2 区,除源头区嘉黎县不属于拉萨市外,其余均为拉萨市辖区,而拉萨市辖区除尼木县不在拉萨河流域外,其余均在流域内。拉萨河流域范围和拉萨市辖区范围基本重合,因此对拉萨河流域经济社会发展状况的描述,以拉萨市的国民经济发展统计数据为主。截止到 2014 年底,流域内人口总数约为 53 万人,国民生产总值达到 347.45 亿元,城镇化率 42.3%。产业结构由 1978 年的 24.6:22.0:52.4 调整到 3.7:36.8:59.5,实现了由第一产业为主体,向二、三产业并重发展的经济结构转型。

拉萨河干流共有 3 个水环境监测站,分别为达孜、卡林(2013 年后撤销)和才纳。拉萨河流域主要城镇和

水环境监测站如图 1 所示。

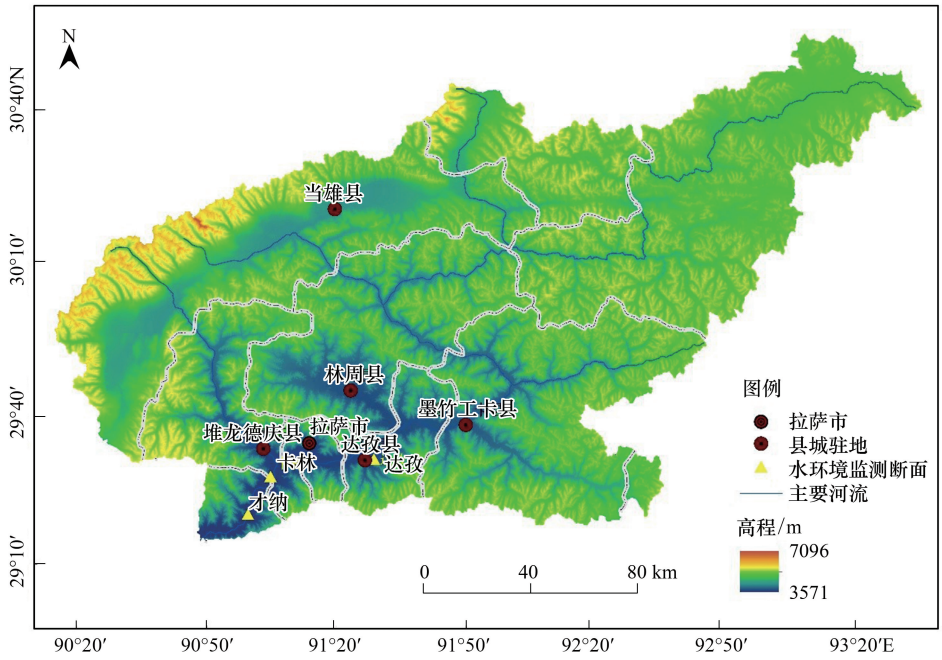

图 1　拉萨河流域概况

Fig.1　Overview of the Lhasa river basin

2　研究方法

2.1　数据来源

2.1.1　水环境指标

本研究时间尺度为 1995—2014 年,水环境参数数据来源于西藏自治区环境监测中心站(达孜、卡林和才纳站)对拉萨河流域的常规监测,其中卡林站数据监测时间序列为 1995—2012 年(因环保部“十二五”地表水国控监测点位调整,卡林站 2012 年后被取消)。监测项目为《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中的 pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})等 24 项,监测时间为每年的 1 月、7 月、8 月和 12 月。考虑一些参数早期缺乏监测,数据序列较短,予以剔除。最终,选取 pH、DO、COD_{Mn}、COD、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)、铜(Cu)、氟化物(F^-)、砷(As)、汞(Hg)、六价铬(Cr^{6+})、铅(Pb)、挥发酚(VP)和石油类(TPH)14 项水环境评价因子,利用其历年均值分析拉萨河水环境的变化特征。

根据拉萨河干流水环境功能区划,达孜断面需满足地表水 II 类水质标准、卡林断面满足地表水 III 类水质标准、才纳断面满足地表水 II 类水质标准。目前,卡林断面取消,才纳断面按照 III 类进行考核。达孜、卡林和才纳三个断面分布在拉萨河流域的中下游,基本覆盖拉萨市辖区,可较好反映拉萨河流域的水环境状况。考虑到拉萨河流域人类活动较小,以及生态环境的敏感性和脆弱性,为更好评估拉萨河流域水环境状况及变化趋势,本研究评价标准限值采用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)II 类。

2.1.2　驱动因子

一般认为,导致河流水环境恶化的驱动因子可以分为自然因素和人类活动因素。从自然因素看,一般包括气温、水温、降水量、径流量等。考虑拉萨河流域内气温、降水与径流的变化趋势基本一致[13],选择降水量和水温作为自然驱动因子;经济社会方面,流域人口数量和经济社会发展水平是主要的社会驱动因子,在此选择人口数、国民生产总值、农作物种植面积等 13 项,具体见表 1。相关数据来自于拉萨市 1995—2014 年统计年鉴。

表 1 拉萨河流域水环境变化的自然和人文驱动因子

Table 1 Natural and human driving factors of water environment change in Lhasa River Basin

驱动因子 Driving factors	指标编号 Indicators	驱动因子 Driving factors	指标编号 Indicators	驱动因子 Driving factors	指标编号 Indicators
水温 Water temperature/℃	I_1	第二产业产值 Secondary industry output value/yuan	I_6	农作物播种面积 Planting area/hm^2	I_{11}
降水量 Precipitation/mm	I_2	第三产业产值 Tertiary industry output value/yuan	I_7	城镇居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban households/yuan	I_{12}
人口数 Population/capita	I_3	工业产值 Industry output value/yuan	I_8	农牧民人均可支配收入 Per capita disposable income of rural households/yuan	I_{13}
国民经济生产总值 General domestic product/yuan	I_4	城镇人口数 Urban population/capita	I_9	人均粮食产量 Food production per capita/kg	I_{14}
第一产业产值 Primary industry output value/yuan	I_5	农村人口数 Rural population/capita	I_{10}	牲畜存栏数 Livestock stock/head	I_{15}

2.2 分析方法

2.2.1 单因子指数法

单因子指数法是将每个评价因子的实测浓度与该评价因子的评价标准限值进行比较,确定各评价因子的水质类别[14]。当评价因子的标准指数≤1 时,表明该因子浓度符合水域功能及水环境标准要求,指数值越大,水环境质量越差。公式如下。

对于一般因子:

$$S_{ij} = C_{ij}/C_{si} \tag{1}$$

式中,S_{ij}为标准指数;C_{ij}为评价因子 i 在 j 站点的实测统计值,mg/L;C_{si}为评价因子 i 的评价标准限值,mg/L。

对于特殊因子:

1)DO

$$S_{\mathrm{DO},j} = \begin{cases} \dfrac{|\mathrm{DO}_f - \mathrm{DO}_j|}{\mathrm{DO}_f - \mathrm{DO}_s} & \mathrm{DO}_j \geqslant \mathrm{DO}_s \\ 10 - 9\dfrac{\mathrm{DO}_j}{\mathrm{DO}_s} & \mathrm{DO}_j < \mathrm{DO}_s \end{cases} \tag{2}$$

式中,$S_{\mathrm{DO},j}$为溶解氧的标准指数,DO_f为某水温、气压条件下的饱和溶解氧浓度,mg/L,计算公式常采用 $\mathrm{DO}_f = 468/(31.6+T)$,$T$ 为水温(℃);DO_j为 j 站点的溶解氧实测统计值,mg/L;DO_s为溶解氧的评价标准限值,mg/L。

2)pH

$$S_{\mathrm{pH},j} = \begin{cases} (7 - \mathrm{pH}_j)/(7 - \mathrm{pH}_{sd}) & \mathrm{pH} \geqslant 7.0 \\ (\mathrm{pH}_j - 7)/(\mathrm{pH}_{su} - 7) & \mathrm{pH} \geqslant 7.0 \end{cases} \tag{3}$$

式中,$S_{\mathrm{pH},j}$为 pH 的标准指数;pH_j为 pH 实测统计代表值;pH_{su}和 pH_{sd}分别为评价标准中 pH 的上下限值。

2.2.2 内梅罗指数法

内梅罗指数法是当前最常用的综合污染指数评价方法[15],由美国叙拉古大学内梅罗提出,是一种兼顾极值和平均值的计权型多因子评价指数,可以综合反映河流水环境状况,值越大,水环境质量越差。公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{(F_{\max}^2 + F_{\mathrm{ave}}^2)}{2}} \tag{4}$$

式中,P 为内梅罗指数;F_{max}为所有单项污染指数的最大值;F_{ave}为所有单项污染指数的平均值。

2.2.3 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计检验方法[16],无需样本遵从特定的分布,也不受少数异常值的干扰,在分析水文、气象等非正态分布的数据时有较好效果。对于具有 n 个样本的时间序列 x,统计量 Z 的计算公式如下:

$$Z=\begin{cases}\dfrac{s-1}{\mathrm{Var}(s)} & s>0\\ 0 & s=0\\ \dfrac{s+1}{\mathrm{Var}(s)} & s<0\end{cases} \tag{5}$$

式中,$S=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n}r_{ij}$,$r_{ij}=\begin{cases}1 & x_j>x_i\\ 0 & x_j=_x i\ (j=i+1,i+2,\cdots,n)\\ -1 & x_j<x_i\end{cases}$,$\mathrm{Var}(s)=\dfrac{n(n-1)(2n+5)}{18}$。

$Z>0$ 表示增加趋势,$Z<0$ 表示减小趋势。当$|Z|\geqslant 1.65$、1.96 和 2.58 时,分别表示通过了置信水平为 90%、95%和 99%的显著性检验。

2.2.4 灰色关联分析法

目前常用的驱动力量化方法有主成分分析法、多元回归法、灰色关联分析法等[17],其中,主成分分析法和多元回归法对样本量和变量数量有较高要求,且数学假设严格,一般水质分析数据很难满足要求。灰色关联分析法根据因素之间发展趋势的相似或相依程度衡量两者的关联程度,适用于动态历程分析。计算过程如下[16]:

1)确定参考序列与比较序列。因变量构成参考序列 x_0,自变量构成比较序列 x_i。

$$x_0(k)=\{x_0(1),x_0(2),\ldots,x_0(n)\}\ (k=1,2,\ldots,n)$$

$$x_i(k)=\{x_i(1),x_i(2),\ldots,x_i(n)\}\ (i=1,2,\ldots,m)$$

2)对数据序列无量纲化,得到序列 x_0'和 x_i',常用方法有均值法、初值法等,在此采用均值法。

3)计算灰色关联系数 $r(x_0,x_i)$。

$$\Delta_{0i}(k)=|x_0'(k)-x_i'(k)| \tag{6}$$

$$r(x_0,x_i)=\frac{(\mathrm{Min}_i\mathrm{Min}_k\Delta_{0i}(k)+\xi\mathrm{Max}_i\mathrm{Max}_k\Delta_{0i}(k))}{(\Delta_{0i}(k)+\xi\mathrm{Max}_i\mathrm{Max}_k\Delta_{0i}(k))} \tag{7}$$

式中:$\Delta_{0i}(k)$为差序列,ζ 为分辨系数,取值范围为(0,1),常取 0.5。

4)求解灰色关联度 r_{0i},并按其大小排序。

$$r_{0\ i}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}r(x_0(k),x_i(k)) \tag{8}$$

3　结果与分析

3.1　水环境指标的单因子指数评价

计算达孜和才纳断面 1995—2014 年、卡林断面 1995—2012 年 14 个水环境指标的单因子污染指数,取各因子指数的三站平均值确定流域水环境主要污染指标,平均值多年变化结果如图 2 所示。可以看出:近 20 年来,拉萨河流域水环境指标基本符合 II 类地表水质,满足水功能区要求,说明拉萨河水环境质量良好,近 20 年来未发生较大污染事件。pH 值近年来有所增加,多在 8.2 以上,最高达到 8.5;DO 污染指数小幅增大,由 2001 年的 0.71 增长到 2014 年的 0.88,可能对水体自净能力造成影响;水体中 COD_{Mn}和 NH_3-N 的浓度值减小,呈良性发展态势; COD 和 TP 污染指数近年来有所增大,虽幅度不大,但需注意水体可能遭受到有机物或还

原性物质污染；Cu、As、Hg、Cr^{6+}、Pb 等 5 种重金属浓度多年来均未超过国家地表水 II 类水环境质量标准规定的限值。F^-浓度多年来变化不大，在 0.1—0.53 mg/L 之间波动；VP 和 TPH 大多数年份均未被检出，一些年份虽被检出但浓度值并未超标。

对比来看，虽然拉萨河水环境质量良好，监测断面满足水功能区要求，但近年来水体中 pH、DO、COD、TP 等指标指数较高，未来要重点关注。

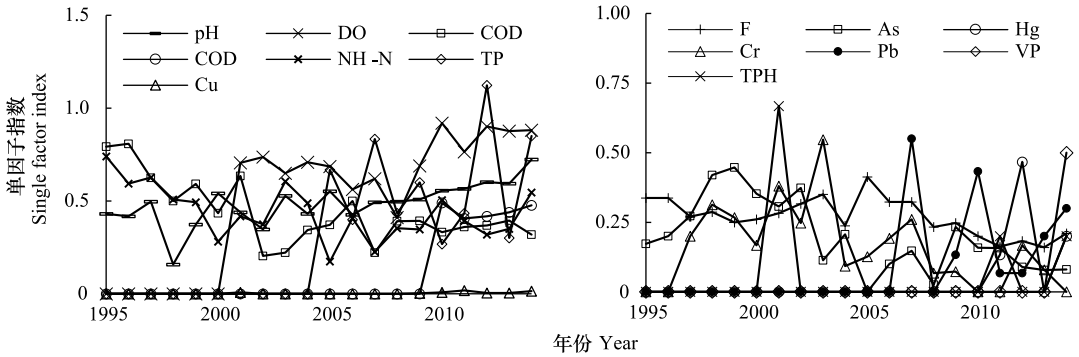

图 2 单因子指数 1995—2014 年变化（部分指标某些年份存在缺测）

Fig.2 Change of single factor index from 1995 to 2014（Some indicators aren′t detected in some years）

pH：氢离子浓度指数 Hydrogen ion concentration；DO：溶解氧 Dissolved oxygen；COD_{mn}：高锰酸盐指数 Chemical oxygen demand of permanganate；COD：化学需氧量 Chemical oxygen demand；NH_3-N：氨氮 Ammonia nitrogen；TP：总磷 Total phosphorus；Cu：铜 Copper；F^-：氟化物 Fluoride；As：砷 Arsenic；Hg：汞 Mercury；Cr^{6+}：六价铬 Hexavalent chromium；Pb：铅 Plumbum；VP：挥发酚 Volatile phenol；TPH：石油类 Total petroleum hydrocarbon

目前，拉萨河流域水环境状况良好，未超过地表水 III 类水水质标准，监测断面均满足水功能区水质要求，但有微弱下降的趋势。从各指标看，pH 值近年来多高于 8，拉萨河流域水体呈微碱性，属软水水质。F^-、VP 含量较低，TPH 稍高，其主要来源于羊八井地热废水，这对灌溉和畜牧业有一定的影响，需要引起重视。此外，断面水质出现 DO 含量下降，COD、TP 等略微升高的趋势。究其原因，拉萨河流域是西藏的主要耕作区，城市化率低，工业相对不发达，有污染排放的企业较少，工业废水排放量较小，污水主要来自于农业生产和生活。另外，拉萨市民饮用水和生活用水主要来源于地下水，对拉萨河河水的干扰强度较低。

1995—2014 年拉萨河流域水环境质量在波动中呈微弱下降的趋势，在 2012 年前后波动较大。一方面，拉萨河流域年降水量近 20 年来有所下降，由雨水补给带来的稀释作用下降。同时河流水温有些许上升，水生物生长活力增强，有机质分解加速，耗氧量增大，水体易出现富营养化。另一方面，拉萨市社会经济得到较大发展，国民经济生产总值由 1995 年的 21.3 亿元增长到 2014 年的 347.5 亿元，总人口由 38.5 万增加到 52.7 万，人类活动对拉萨河流域水环境的影响也在逐步加大。随着西部大开发计划的深入实施，青藏高原地区的工农业、交通和能源等行业会加速发展，相应的污染源及污染物逐年增多，污染水平势必加重，这需要引起有关部门的注意。

3.2 水环境变化的 Mann-Kendall 检验

首先，计算拉萨河达孜、卡林和才纳断面逐年的内梅罗指数，同时利用 Mann-Kendall 检验法计算 1995—2014 年拉萨河流域内梅罗指数的变化趋势检验值，综合评估流域水环境状况及年际变化趋势，结果见图 3 和表 2。

研究结果表明：(1) 相对其它年份，达孜断面 2012 年内梅罗指数增加明显。其余年份内梅罗指数均小于 1，满足地表水 II 类水质标准，水环境质量良好，其中在 2008 年最低，为 0.37。从 1995 到 2014 年，达孜断面的内梅罗指数呈上升趋势，统计 Z 值为 2.24。(2) 卡林断面的内梅罗指数多年来变化很小，其中最小值为 0.372，出现在 2000 年，最大值 0.878，出现在 2005 年，水环境状况整体维持在良好状态，满足水功能区要求；(3)

才纳断面的内梅罗指数有所上升,从 1995 年的 0.684 增加到 2014 年的 0.765,统计 Z 值为 1.07,上升趋势不显著,水环境状况整体良好。

拉萨河流域整体尺度上,2012 年河流水环境状况较其它年份有所下降。2008 年内梅罗指数最小,为 0.386,其余年份均在 1 以下,水环境质量较好。从 1995 年到 2014 年,内梅罗指数有所增长,统计 Z 值为 1.52,水环境质量下降趋势并不明显。

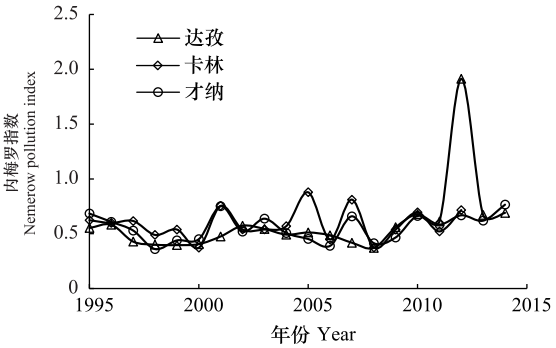

图 3　内梅罗指数 1995—2014 年变化

Fig.3　Change of Nemerow pollution index from 1995 to 2014

达孜断面位于拉萨市区的上游,近年来面临的污染风险有所增加,主要体现在水体中 DO 含量的下降和 TP 浓度的上升。拉萨市的上游区主要以放牧和农业生产为主,农业灌溉和牲畜用水大多来源于拉萨河,产生的污废水也注入到拉萨河中。同时受降水下降和水温升高的影响,河水遭受有机污染的风险加重;卡林断面和才纳断面位于拉萨市区的下游,两断面的水环境质量下降趋势不明显,但波动性强。其中卡林断面离拉萨市区较近,受当地人类活动的影响更强,水环境状况年际变化更为剧烈。

表 2　内梅罗指数 Mann-Kendall 趋势检验结果

Table 2　Mann-Kendall and Daniel trend test of Nemerow pollution index

监测断面 Monitoring sections	达孜 Dazi	卡林 Kalin	才纳 Caina	流域均值 Watershed average
统计值 Z Statistic Z	2.24**	0.00	1.07	1.52
变化趋势 Trend	上升	不变	上升	上升

注:** 表示在 α = 0.05 水平上显著相关

对比达孜、卡林和才纳断面水环境质量变化,拉萨市区上游的达孜断面早期面临的水污染压力较小,多数年份低于下游的卡林和才纳断面。然而近年来,达孜断面水环境质量则基本持平甚至低于下游两个断面,因此当地水环境保护应多关注上游人类活动的影响,主要是牧区养殖和农业耕作。

3.3　驱动因子灰色关联分析结果

计算拉萨河流域层面内梅罗综合污染指数与 15 项驱动因子的灰色关联度,结果见表 3。可以看出,驱动因子与内梅罗综合污染指数之间有较强相关性,均达到中等以上相关程度(0.2—0.4 弱相关,0.4—0.6 中等相关,0.6—0.8 强相关)[16],拉萨河流域水环境变化与自然环境演变和经济社会发展存在较为密切的联系。在 15 项驱动因子中,对拉萨河水环境变化的贡献大小为 $I_2>I_{15}>I_3>I11_0>I_4>I11_2>I_{11}>I_8>I_6>I_{13}>I_8>I_1>I_5>I_{14}>I_7$。其中,降水量、牲畜存栏数、人口数、农村人口数和国民经济生产总值 5 项因子与内梅罗指数的关联度大于 0.6,呈现强相关关系,是拉萨河流域水环境变化的关键性驱动因子。

从内梅罗指数来看,降水量、牲畜存栏数、人口数、农村人口数和国民经济生产总值 5 项因子对水环境的驱动力最大。其中降水量是气候自然变异、气候变化体现的驱动力,降水量的多寡对拉萨河水动力条件和水体自净能力有重要影响,对拉萨河水质的影响起到很重要的作用。牲畜存栏数、人口数、农村人口数和国民经济生产总值属于人类活动方面的因子。相比较而言,工业、第二产业、第三产业等因子的驱动力较弱,这说明拉萨河流域的工业发展水平较弱,不是水环境恶化的主要驱动力。人口增长和国民经济生产总值的提高直接导致人类活动对拉萨河流域水环境干扰的加深。随着社会经济的发展,拉萨河流域水环境状况可能会进一步恶化,协调好经济社会发展和水环境保护的关系是政府今后需要考虑的重点。具体而言,拉萨地区经济发展相对落后,城镇化率较低,工业基础较为薄弱,农村农业非点源污染是流域水环境恶化的主要因素。发达的农牧业会产生大量废弃物,加之农村居民生活污废水排放,非点源污染的输出风险易进一步加剧。需着重识别

种植业源、牲畜饲养源和农村生活源的重点控制区域,采取针对性管控措施应对可能出现的非点源污染问题。

流域水环境系统是一个自然-人文双重驱动下的复合大系统,驱动机理和影响因素均十分复杂,未来研究中需进一步细化深入,一方面细化时间尺度,开展基于月或日的水环境变化趋势判断,探讨流域水环境的日或季节性的变化特征;另一方面细化对象尺度,立足于每种水环境指标,分析其在受到自然环境和人类活动影响时的变化,为当地污染源识别和水环境保护提供更有针对性的建议。

表 3 内梅罗指数与驱动因子的灰色关联度

Table 3 Grey relational degree of driving factors and Nemerow pollution index

驱动因子 Driving factors	灰色关联度 Grey relational degree	驱动因子 Driving factors	灰色关联度 Grey relational degree	驱动因子 Driving factors	灰色关联度 Grey relational degree
水温 Water temperature I_1	0.522	第二产业产值 Secondary industry output value I_6	0.540	农作物播种面积 Planting area I_{11}	0.582
降水量 Precipitation I_2	0.711	第三产业产值 Tertiary industry output value I_7	0.504	城镇居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban households I_{12}	0.582
人口数 Population I_3	0.646	工业产值 Industry output value I_8	0.556	农牧民人均可支配收入 Per capita disposable income of rural households I_{13}	0.535
国民经济生产总值 General domestic product I_4	0.603	城镇人口数 Urban population I_9	0.526	人均粮食产量 Food production per capita I_{14}	0.511
第一产业产值 Primary industry output value I_5	0.517	农村人口数 Rural population I_{10}	0.610	牲畜存栏数 Livestock stock I_{15}	0.655

4 结论

本研究从较长时间尺度上(1995—2014 年)分析了拉萨河流域水环境状况及年际变化,从自然环境和社会经济发展两个方面识别了影响拉萨河流域水环境的关键驱动因子,并结合流域实际进行了分析探讨。拉萨河流域水环境状况总体良好,基本满足水功能区要求,适宜生活和工农业用水。然而,由于人类活动和气候变化的影响,拉萨河水环境状况有所下降,不过趋势并不明显,要充分重视社会经济发展和水环境保护间的协调,保障拉萨健康生态环境。从识别得到的关键驱动因子看,拉萨河流域水环境变化主要受到降水量、牲畜存栏数、人口数、农村人口数和国民经济生产总值等因素的影响,农村农业非点源污染是拉萨河流域的主要污染源,要重点关注和管控。相关结果与拉萨河流域实际较为吻合,可为流域水资源管理和水环境保护提供借鉴。

参考文献(References):

[1] 王磊, 张磊, 段学军, 董雅文, 秦贤宏. 江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应. 生态学报, 2011, 31(22): 6832-6844.

[2] Singh K P, Malik A, Mohan D, Sinha S. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India)-a case study. Water Research, 2004, 38(18): 3980-3992.

[3] Chang H. Spatial and temporal variations of water quality in the Han River and its tributaries, Seoul, Korea, 1993-2002. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 161(1/4): 267-284.

[4] Şener Ş, Şener E, Davraz A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). Science of the Total Environment, 2017, 584-585: 131-144.

[5] 山鹰, 张玮, 李典宝, 王丽卿. 上海市不同区县中小河道氮磷污染特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5239-5247.

[6] 张汪寿, 李晓秀, 王晓燕, 于洋, 任万平, 李建辉. 北运河武清段水污染时空变异特征. 环境科学学报, 2012, 32(4): 836-846.

[7] 王超, 单保庆, 秦晶, 张洪. 海河流域社会经济发展对河流水质的影响. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2354-2361.

[8] 方广玲, 香宝, 杜加强, 王宝良, 张立坤, 胡钰, 徐杰. 拉萨河流域非点源污染输出风险评估. 农业工程学报, 2015, 31(1): 247-254.
[9] 李根, 毛锋. 我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估. 中国水土保持, 2008, (2): 9-11.
[10] Shi H Y, Fu X D, Chen J, Wang G Q, Li T J. Spatial distribution of monthly potential evaporation over mountainous regions: case of the Lhasa river basin, China. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(10): 1856-1871.
[11] 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.
[12] 余婷婷, 甘义群, 周爱国, 刘存富, 刘运德, 李小倩, 蔡鹤生. 拉萨河流域地表径流氢氧同位素空间分布特征. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(5): 873-878.
[13] 黄俊雄, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江径流演变规律及其驱动因子分析. 水文, 2007, 27(5): 31-35.
[14] 施云芬, 刘月华, 李英赞. 2001—2005 年松花湖水质评价. 水生态学杂志, 2009, 2(1): 11-15.
[15] 陈旭华. 用尼梅罗(Nemerow)污染指数评价地表水营养状况的探讨. 安全与环境学报, 2003, 3(2): 24-26.
[16] 高伟, 陈岩, 徐敏, 郭怀成, 谢阳村. 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.
[17] 左其亭, 刘欢, 马军霞. 人水关系的和谐辨识方法及应用研究. 水利学报, 2016, 47(11): 1363-1370, 1379-1379.