

# 长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源

刘敏<sup>1,2</sup>, 赵良元<sup>1,2\*</sup>, 李青云<sup>1,2</sup>, 邹靖怡<sup>1,2</sup>, 胡园<sup>1,2</sup>, 张屹哲<sup>4</sup>, 徐平<sup>3</sup>, 吴志广<sup>3</sup>, 邓玮<sup>1,2</sup>, 陶晶祥<sup>1,2</sup> (1.长江科学院 流域水环境研究所, 湖北 武汉 430010; 2.流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010; 3.长江科学院, 湖北 武汉 430010; 湖北 武汉 430010; 4.长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局, 湖北 襄阳 441022)

**摘要:** 通过开展水环境调查并结合历史数据, 分析了长江源区主要河流水体主要离子分布特征, 揭示了长江源区主要河流水化学类型及其主要控制因子, 阐明了长江源区主要离子来源, 同时评价了长江源区主要河流的适用性。结果表明, 长江源区河流水体主要阳离子的平均含量高低依次为:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , 其中  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的平均含量分别占总阳离子含量的 65.9% 及 18.8%。主要阴离子的平均含量高低顺序依次为:  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ , 其中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{HCO}_3^-$  的平均含量分别占总阴离子含量的 47.6% 及 32.9%。长江源区主要河流水化学类型为 Na-Cl、Ca-HCO<sub>3</sub> 和 Ca-SO<sub>4</sub>, 水化学特征主要受蒸发结晶和岩石风化作用控制, 主要离子来源于岩石风化。不同河流水化学特征存在一定差异, 其中当曲水化学类型主要为 Ca-HCO<sub>3</sub> 和 Ca-SO<sub>4</sub>, 主要受岩石风化控制, 主要离子来源于碳酸盐溶解。沱沱河和楚玛尔河水化学类型主要为 Na-Cl, 主要受蒸发结晶控制, 主要离子来源于蒸发岩的溶解。通天河主要水化学类型为 Na-Cl 和 Ca-HCO<sub>3</sub>, 主要受岩石风化和蒸发结晶控制, 主要离子来源于蒸发岩、碳酸盐和硅酸盐的溶解。长江源区河流水体硬度相对较高, 当曲水质宜用于灌溉, 但是沱沱河和楚玛尔河及通天河水质建议慎用于灌溉, 且不宜直接饮用。研究成果以期为长江源区水资源保护与利用提供基础支撑。

**关键词:** 长江源区; 河流; 主要离子; 水化学特征; 离子来源; 水质

**中图分类号:** X5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)03-1243-12

**Hydrochemical characteristics, main ion sources of main rivers in the source region of Yangtze River.** LIU Min<sup>1,2</sup>, ZHAO Liang-yuan<sup>1,2\*</sup>, LI Qing-yun<sup>1,2</sup>, ZOU Jing-yi<sup>1,2</sup>, HU Yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-zhe<sup>4</sup>, XU Ping<sup>3</sup>, WU Zhi-guang<sup>3</sup>, DENG Wei<sup>1,2</sup>, TAO Jing-xiang<sup>1,2</sup> (1. Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of River Basin Water Resources and Environmental Sciences, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4. Hanjiang River Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Hydrology Bureau of the Yangtze River Water Conservancy Committee, Xiang Yang, 441022, Hubei, China). *China Environmental Science*, 2021, 41(3): 1243~1254

**Abstract:** Based on the field investigation of water environment and historical monitoring data in SRYR, the present research analyzed the distribution characteristics of main ions in the main rivers of the SRYR, revealed the hydrochemical types and main controlling factors of the main rivers, clarified the main ion sources and evaluated the applicability of the main rivers. The results indicated that the average concentration of the main cations in the river water of the SRYR displayed in the order of  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , of which the average concentration of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  accounted for 65.9% and 18.8% of the total cations, respectively. The average content of major anions was in the order of  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ , in which the average content of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{HCO}_3^-$  accounted for 47.6% and 32.9% of the total anions, respectively. The hydrochemical types of the main rivers in the SRYR were Na-Cl, Ca-HCO<sub>3</sub> and Ca-SO<sub>4</sub>, which was mainly controlled by evaporative crystallization and rock weathering, the main ion come from the rock weathering. However, there were certain differences in the water chemistry characteristics in different rivers. Hydrochemical type of Dangqu was mainly Ca-HCO<sub>3</sub> and Ca-SO<sub>4</sub>, which was mainly controlled by rock weathering. Hydrochemical types of Na-Cl were showed in Tuotuo river and Chumar river, which were mainly controlled by evaporative crystallization, and the main ions come from the dissolution of evaporative rocks. The hydrochemical types of Tongtian river were Na-Cl and Ca-HCO<sub>3</sub>, which were mainly controlled by weathering and evaporative crystallization of rocks, and the main ions come from the dissolution of evaporated rocks, carbonates and silicates. The hardness of the river water in the SRYR was relatively high, while the water quality of the Dangqu river was suitable for irrigation, the water quality of the Tuotuo River, Chumar River and Tongtian River were recommended to be used for irrigation with caution and not suitable for direct drinking. The results were expected to provide basic data support for the protection and utilization of water resources in the SRYR.

**Key words:** the source region of Yangtze River; River; main ion; hydrochemical characteristics; ion source; water quality

收稿日期: 2020-07-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2019292/SH, CKSF 2017062/SH); 湖北省科技创新创业服务能力建设专项(2018BEC488)

\* 责任作者, 高级工程师, zhaoliangyuannew@163.com

河流水的化学组成记录了水的形成和迁移的历史,反映了流域内河流水化学特征<sup>[1-2]</sup>。水化学特征及水质可作为河流水质评价以及河流生态系统的重要指标,对流域内人类生活用水、灌溉用水以及工业用水等有重要的影响,但河流水化学特征和水质受区域自然因素地质(岩石风化、土壤侵蚀、地下水等)、气候(降雨、蒸发)以及人类生产生活(农业活动、工业生产、城镇生活污水)等影响<sup>[3-6]</sup>,因此,河流水化学特征及水质在一定程度上可反应流域内基本特征。

长江源区地处青藏高原腹地,素有“中华水塔”的美誉。区域内人口稀少,自然环境差,是气候和生态环境变化的敏感区和脆弱区,容易受到外界干扰,而且一旦遭到破坏将难以恢复<sup>[3,7]</sup>。长江源区是典型气候寒冷干燥,径流主要由冰雪融水和多年冻土提供,因此水循环受气温影响较大。近些年来全球性温度升高,导致长江源区冰川融化,区域的水源补给量增加,主要河流的径流量发生变化<sup>[8-9]</sup>,河流的地球化学也随之发生了变化。相关研究表明,长江源区构造复杂,河流中普遍存在蒸发岩的溶解<sup>[5]</sup>,冰川融水、雪水和河水的水化学类型主要为重碳酸盐类钙组水和镁组水<sup>[10]</sup>。长江源区河水和沼泽水中阴离子均以  $\text{HCO}_3^-$  为主,阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  为主;温泉水以阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,阳离子以  $\text{Na}^+$  为主;湖水阴离子均以  $\text{Cl}^-$  为主,阳离子以  $\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  为主<sup>[11]</sup>。长江源区冻土融水阴离子和阳离子主要受蒸发岩和碳酸盐岩等地壳源的控制,不同海拔高度冻土融水的水化学类型不相同,高海拔(>4800m 以上)区域冻土融水主要水化学类型为  $\text{Ca-SO}_4$ ,中海拔高度(4400~4700m)区域主要水化学类型为  $\text{Na-Cl}$ ,而低海拔高度水化学类型较为复杂<sup>[12]</sup>。沱沱河(正源)、楚玛尔河(北源)及通天河水体水化学类型主要为  $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na-Ca}$ ,水化学主要控制因子为岩石风化<sup>[13]</sup>,沱沱河和楚玛尔河主要离子为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,主要来源于蒸发岩和石膏的溶解以及地下水补给<sup>[5,14]</sup>。沱沱河地下水存在  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、As、 $\text{NH}_4^+$ 、总硬度和溶解性固体含量超过《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)标准值,沱沱河河谷南北两侧的地下水主要离子为  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$ ,水量较大且不受季节影响<sup>[15]</sup>。当曲作为长江的南源,具有海拔高、水系复杂及大片沼泽湿地等特点,一直是神秘的无人区,一些科学考察者主张将当曲作为正源,使已经成为定论的长江源问题成为

社会关注的焦点<sup>[16-18]</sup>,目前关于长江南源研究较少。前期研究者主要集中研究自然因素对长江源区局部区域水化学特征的影响,将长江三源(南源、正源、北源)及通天河的水化学特征系统研究的尤其有限。因此本研究结合历史调查结果,分析长江源区三源(南源、正源、北源)及通天河水化学主要离子含量特征,综合考虑人为和自然因素对长江源区水化学特征影响,综合阐明长江源区主要离子的来源,并综合评价长江源区水体的适用性,以期长江源区的水生态环境保护及水资源的综合利用提供基础支撑。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究区域概况

长江源区流域面积约 13.82 万  $\text{km}^2$ ,长江源头包括北源楚玛尔河水系、正源沱沱河水系、南源当曲水系以及干流通天河水系<sup>[13,19]</sup>。长江源地形呈半封闭状态,年内温差小,基本上只有冬夏两季,日温差大,日照长,辐射强<sup>[18]</sup>。6~9 月降水量占全年的 80%,水量随海拔高度变化较大<sup>[10,20]</sup>。年蒸发量是年降水量的 2~6 倍,蒸发量空间上的分布基本上呈由西北向东南减少的趋势<sup>[21]</sup>。

当曲发源于唐古拉山东段的霞舍日阿巴山东麓,源头具有丰富的地下水(以泉群形式)补给,并分布大面积沼泽,平均海拔在 4600m 以上,长约 352km<sup>[18,22]</sup>。当曲多年平均气温为  $-4.1^\circ\text{C}$ ,年际差异小,多年平均降水量 400mm<sup>[9,18]</sup>。沱沱河发源于各拉丹东雪山东侧的姜根迪如冰川,平均海拔 4500m 以上,长约 350km,<sup>[22]</sup>。流域内多年平均气温为  $-4.4^\circ\text{C}$ ,多年平均降水量约为 282.3mm,降水多集中在夏、秋季的 7~9 月。多年平均年蒸发量为 1646.1mm<sup>[18,23]</sup>。楚玛尔河发源于昆仑山南支可可西里山黑脊山南麓,流域上游分布有诸多高原湖泊,长约 515km<sup>[22]</sup>。流域年平均气温  $-2.9^\circ\text{C}$ ,年均降水量约 257mm,年内分配不均,年平均蒸发量为 1550mm,通天河自当曲、正源沱沱河汇合点的治多县西部的囊极巴陇起至青海省玉树州的玉树市区结古镇西巴塘河口,总长 828km,海拔高 3000~4000m<sup>[9]</sup>。通天河年均蒸发量为 1200mm<sup>[24]</sup>。

长江源区由第四纪河流沉积、中生代碎屑岩、碳酸盐岩与蒸发岩、火山岩夹层组成<sup>[21]</sup>,楚玛尔河-通天河断裂带裸露二叠系和三叠系,分别由碳酸盐

沉积岩和碎屑岩组成.沱沱河和尕尔曲以碎屑岩为主,主要成分为砂岩和灰岩.南源当曲为碳酸盐-杂岩和松散沉积岩-杂岩,碳酸盐-杂岩由碳酸盐岩或碳酸盐岩碎屑构造<sup>[13]</sup>.

1.2 水样的采集与检测

1.2.1 样品采集 2019 年 8 月根据长源区区域特征及历史监测情况,共选取 30 个采样点(图 1),其中在当曲 8 个采样点(D1~D8),沱沱河布设 4 个采样点(T1~T4),楚玛尔河布设 5 个采样点(C1~C5),通天河

布设 13 个采样点(G1~G13).水样采自水下约 10cm 处,且在采样前干净的采用瓶用地表水冲洗润洗,同时每个采样点三次重复的混合水样收集到 500mL 的塑料瓶中.现场部分水样过 0.22 $\mu$ m 滤膜,保存在 100mL 的聚丙烯的瓶子中,其中取 30mL 加浓硝酸,直至水样 pH<2,用于测水体中主要阳离子( $K^+$ , $Na^+$ , $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ ),其他过滤好的水样用于水体中阴离子( $Cl^-$ , $NO_3^-$ , $SO_4^{2-}$ 和 $F^-$ )的检测,水样保存在 4 $^{\circ}C$  的冰箱中待测.

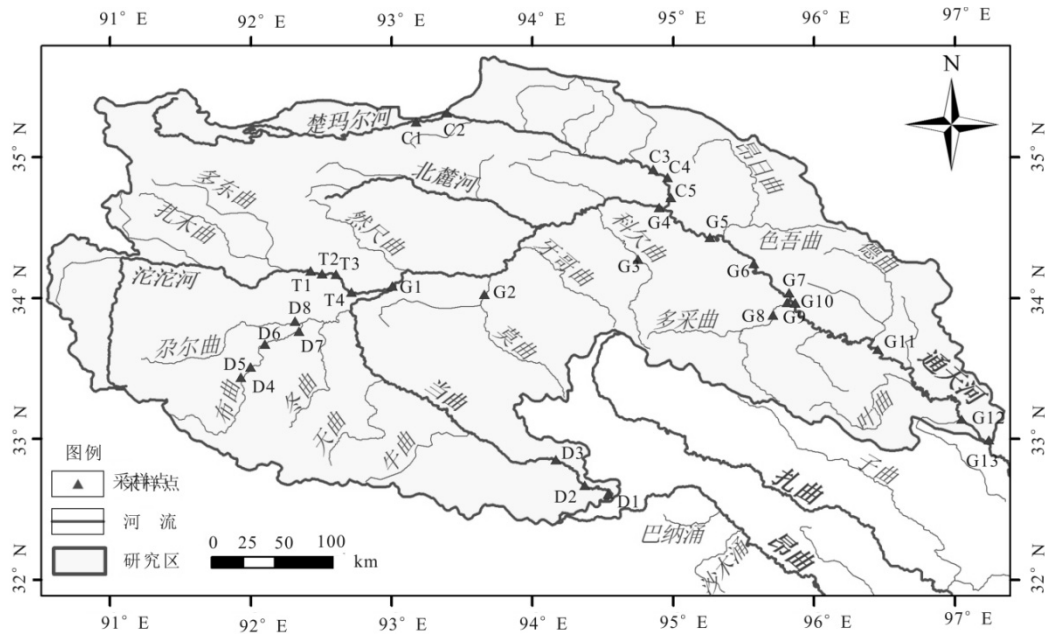


图 1 长江源区主要河流采样点  
Fig.1 The sampling points of the main rivers in the source region of Yangtze River

1.2.2 样品分析 水体中 pH 值、电导率(EC)、溶解性总固体(TDS)采用便携式水质分析仪现场监测.水体中的阴离子  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  含量根据中国标准<sup>[25]</sup>,采用离子色谱进行分析(ICS900,USA),检出限为 0.006~0.018mg/L,回收率为 99.1%~116.3%;水体中阳离子采用微波等离子体原子发射光谱仪(MP-AES)进行检测<sup>[3]</sup>,检出限为 0.0002~0.0004mg/L,回收率为 95.6%~97.3%.水体中  $HCO_3^-$  采用酸碱滴定法分析(甲基橙作为指示剂,稀盐酸滴定)<sup>[26]</sup>.水体中总硬度(TH)根据经验公式计算获得<sup>[27]</sup>.采用硅钼黄光度法测定水体中二氧化硅( $SiO_2$ )含量.

2 结果与讨论

2.1 主要离子分析

2.1.1 河流理化性质分析 由调查结果可知(表 1),

长江源区 pH 值的范围为 7.83~8.78,平均值为 8.3,说明长江源区河流水呈现弱碱性.水体中 TDS 含量范围为 50~3012mg/L,平均含量为 871.7mg/L,远高于世界河流 TDS 平均值(150mg/L)<sup>[28]</sup>,这可能是由于构造运动所致<sup>[29]</sup>.TH 范围为 63.2~593.4mg/L,TH 平均值为 281.2mg/L,远高于长江中下游<sup>[30]</sup>,表明长江源区水体硬度较高.

表 1 长江源区主要河流理化性质  
Table 1 The physicochemical property of the main rivers in the SRYP

| 指标  | pH 值 | TDS(mg/L) | TH(mg/L) |
|-----|------|-----------|----------|
| 最小值 | 7.83 | 50        | 63.2     |
| 最大值 | 8.78 | 3012      | 593.4    |
| 平均值 | 8.27 | 871.7     | 281.2    |

由图 2 分析可知,当曲和通天河属于中等硬度

的淡水,而沱沱河和楚玛尔河属于高硬度以上的微咸水,表明长江源区不同河流水体理化性质存在一定的差异,这可能主要是受复杂的地形地貌及多变的局部气候影响所致。

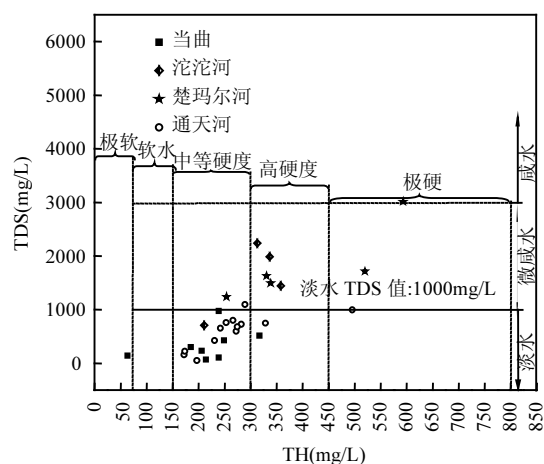


图2 长江源区主要河流中溶解性总固体和硬度的分布  
Fig.2 Distribution of total soluble solids and hardness the main rivers in the SRYP

2.1.2 河流主要离子含量 长江源区水体中的主要阴阳离子平均含量远高于长江流域<sup>[31-32]</sup>和全球

河流<sup>[33]</sup>,表明长江源区水体中主要离子受岩石风化影响较大.长江源区主要阳离子的平均含量高低依次为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ,其中  $\text{Na}^+$  平均含量占总阳离子含量的 65.9%, $\text{Ca}^{2+}$  平均含量占总阳离子含量的 18.8%.主要阴离子的平均含量高低顺序依次为: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ ,其中  $\text{Cl}^-$  平均含量占总阴离子含量 47.6%, $\text{HCO}_3^-$  平均含量占总阴离子含量 32.9%,而  $\text{NO}_3^-$  仅占总阴离子含量 0.2%,表明长江源区河流水体主要离子受蒸发岩和碳酸盐溶解影响<sup>[5]</sup>,这与青藏高原其他河流相似<sup>[14]</sup>.

## 2.2 主要离子空间分布

由图 3 分析可知,当曲阳离子主要以  $\text{Ca}^{2+}$  为主,阴离子主要以  $\text{HCO}_3^-$  为主,说明当曲主要受碳酸盐风化影响;沱沱河、楚玛尔河和通天河阳离子均以  $\text{Na}^+$  为主,阴离子均以  $\text{Cl}^-$  为主,表明沱沱河、楚玛尔河和通天河水体主要离子受岩盐影响.当曲、沱沱河、楚玛尔河和通天河  $\text{NO}_3^-$  均低于其他离子,表明长江源区主要河流受人为活动影响有限<sup>[6]</sup>.当曲水体中主要阳离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ )和主要阴离子( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{NO}_3^-$ )含量均低于其他河流,表明当曲离子含量相对较低。

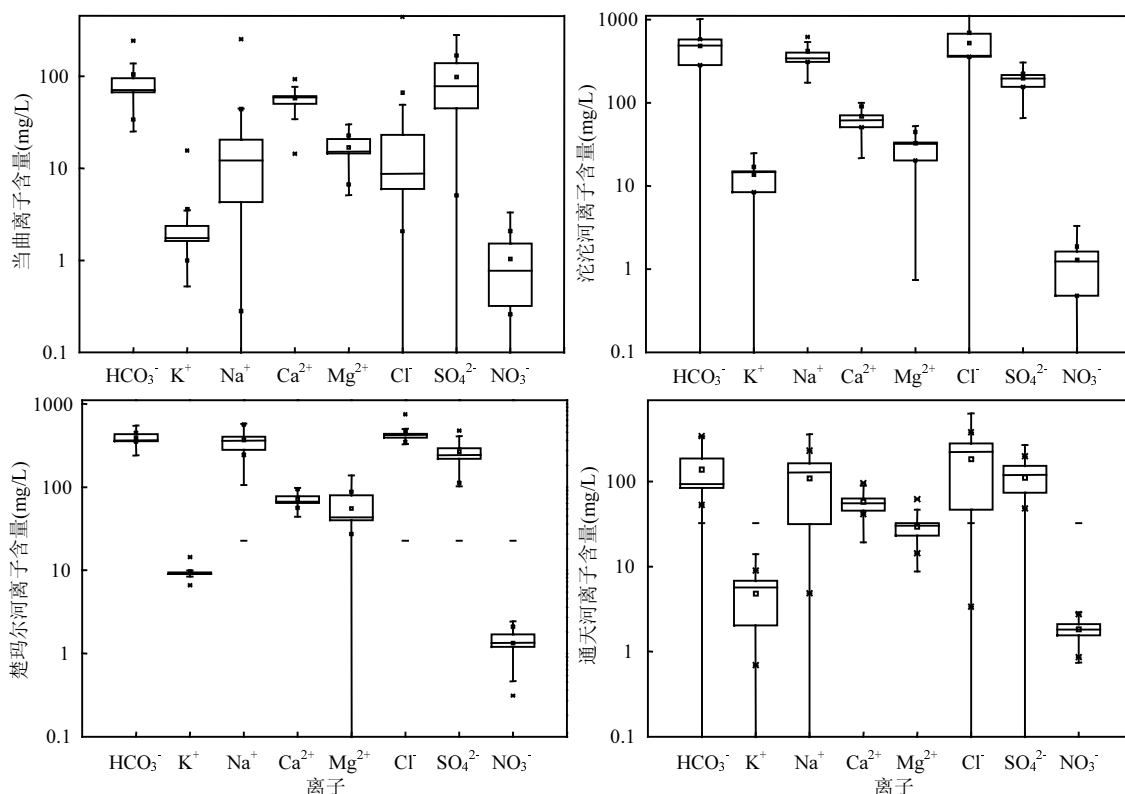


图3 长江源区主要河流中主要阴、阳离子含量

Fig.3 The major ion concentration of the main rivers in the source region of Yangtze River

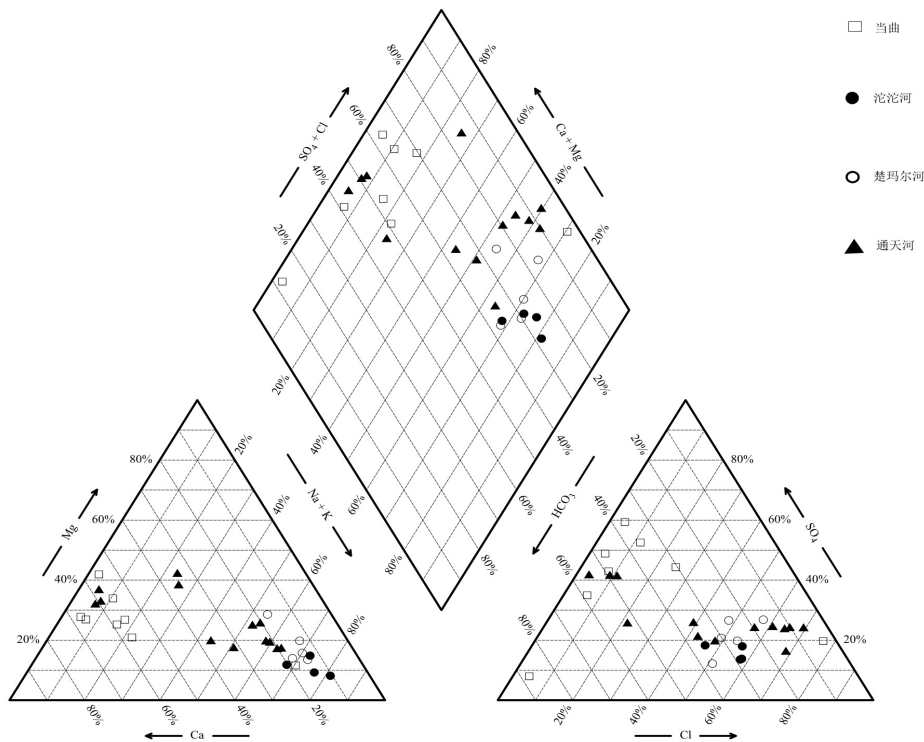


图 4 长江源区主要河流的 Piper 三线图

Fig.4 The Piper diagram of major rivers in the source region of Yangtze River

2.3 水化学特征分析

2.3.1 水化学类型分析 由图 4 分析可知,当曲水化学类型主要为  $\text{Ca-SO}_4$  和  $\text{Ca-HCO}_3$ ,表明当曲水化学类型可能受碳酸盐、蒸发岩和硅酸盐溶解影响.沱沱河和楚玛尔河水化学类型主要为  $\text{Na-Cl}$ ,表明沱沱河和楚玛尔河水化学类型受蒸发岩溶解影响较大<sup>[5]</sup>.通天

河水化学类型主要为  $\text{Na-Cl}$  和  $\text{Ca-HCO}_3$ ,其中通天河干流水体主要为  $\text{Na-Cl}$ ,通天河干流与楚玛尔河和沱沱河水化学类型相同,说明沱沱河和楚玛尔河离子的汇入对通天河干流水化学类型影响较大.这主要是由于楚玛尔河和通天河水体中离子含量较高,汇入通天河后,对通天河水体中离子贡献较大.

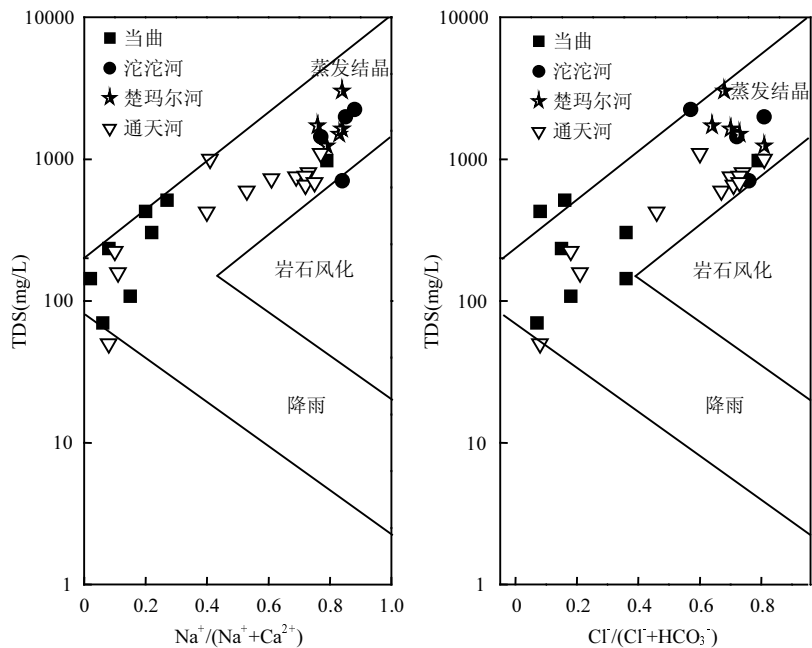


图 5 长江源区主要河流采样点的阴、阳离子吉布斯图

Fig.5 Gibbs chart of anion and cationic ions of main river sampling points in the SRYP

**2.3.2 主要控制因子** Gibbs<sup>[34]</sup>采用 TDS- $\text{Na}^+$ / $(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 图和 TDS- $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 图对世界地表水(雨水、河水、湖水等水体)化学组分及其形成原因(大气降水、岩石风化、蒸发结晶)进行直观分析.由图 5 可知,长江源区的大部分的采样点基本处于岩石风化作用和蒸发结晶作用的过渡带,并远离大气降雨作用带.不同河流呈现不同的主控因子,当曲水体中 TDS 含量较低, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值较低,属于典型的岩石风化控制.楚玛尔河和沱沱河水体中 TDS 含量较高, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值较高,属于典型的蒸发结晶控制,进一步说明楚玛尔河和沱沱河流蒸发作用较强.通天河部分采样点分位于岩石风化和蒸发结晶,属于岩石风化和蒸发结晶共同控制,与 Jiang 等<sup>[13]</sup>研究结果一致.

2.4 主要离子来源分析

长江源区主要离子相关性结果表明(表 2),EC

和 TDS 与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 呈显著正相关,而 EC 和 TDS 反映了地下水中溶解固体的总量<sup>[35]</sup>,表明岩石风化是长江源区水体中离子的主要来源.海拔与  $\text{NO}_3^-$ 呈现显著负相关,而  $\text{NO}_3^-$ 主要来源与人类活动<sup>[6]</sup>,表明海拔越高,人为活动对水体离子贡献越小. $\text{NO}_3^-$ 与其他离子无显著相关,表明除  $\text{NO}_3^-$ 外,其他离子主要来源于岩石风化和大气输送等自然源. $\text{HCO}_3^-$ 与  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ 呈弱相关,而与  $\text{Na}^+$ 和  $\text{K}^+$ 呈显著正相关,表明  $\text{HCO}_3^-$ 除了来与源于碳酸盐溶解外,可能部分来源于蒸发岩和硅酸盐溶解. $\text{Na}^+$ 和  $\text{K}^+$ 显著正相关,表明  $\text{Na}^+$ 和  $\text{K}^+$ 主要来源于蒸发岩溶解<sup>[5]</sup>. $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ 呈显著正相关,表明研究区域内存在白云石的溶解<sup>[34]</sup>. $\text{SO}_4^{2-}$ 与  $\text{Ca}^{2+}$ 相关性较弱,而  $\text{SO}_4^{2-}$ 与  $\text{Cl}^-$ 相关性较弱,表明  $\text{SO}_4^{2-}$ 主要来源于蒸发岩溶解<sup>[5,12]</sup>.由相关性分析结果表明,长江源区主要离子可能主要来源于自然源,即大气传输、碳酸盐、蒸发岩和硅酸盐溶解.

表 2 相关性分析结果  
Table 2 Correlation matrix of hydrogeochemical compositions in the SARY

| 指标                 | 海拔              | pH 值           | CE             | TDS            | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{K}^+$   | $\text{Na}^+$  | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NO}_3^-$ |
|--------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|-----------------|
| 海拔                 | 1.000           |                |                |                |                  |                |                |                  |                  |               |                    |                 |
| pH                 | -0.169          | 1.000          |                |                |                  |                |                |                  |                  |               |                    |                 |
| CE                 | -0.028          | 0.044          | 1.000          |                |                  |                |                |                  |                  |               |                    |                 |
| TDS                | -0.045          | 0.276          | <b>0.893**</b> | 1.000          |                  |                |                |                  |                  |               |                    |                 |
| $\text{HCO}_3^-$   | 0.007           | 0.307          | <b>0.614**</b> | <b>0.789**</b> | 1.000            |                |                |                  |                  |               |                    |                 |
| $\text{K}^+$       | -0.096          | 0.406*         | <b>0.622**</b> | <b>0.750**</b> | <b>0.726**</b>   | 1.000          |                |                  |                  |               |                    |                 |
| $\text{Na}^+$      | 0.006           | 0.340          | <b>0.805**</b> | <b>0.935**</b> | <b>0.796**</b>   | <b>0.828**</b> | 1.000          |                  |                  |               |                    |                 |
| $\text{Ca}^{2+}$   | -0.032          | -0.114         | <b>0.563**</b> | <b>0.541**</b> | 0.438*           | 0.387*         | 0.402*         | 1.000            |                  |               |                    |                 |
| $\text{Mg}^{2+}$   | -0.167          | 0.000          | <b>0.754**</b> | <b>0.790**</b> | 0.457*           | 0.358          | <b>0.607**</b> | <b>0.595**</b>   | 1.000            |               |                    |                 |
| $\text{Cl}^-$      | -0.048          | -0.004         | <b>0.783**</b> | <b>0.845**</b> | <b>0.654**</b>   | <b>0.650**</b> | <b>0.757**</b> | <b>0.510**</b>   | <b>0.784**</b>   | 1.000         |                    |                 |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | 0.029           | <b>0.488**</b> | <b>0.652**</b> | <b>0.783**</b> | <b>0.522**</b>   | <b>0.672**</b> | <b>0.856**</b> | 0.343            | <b>0.512**</b>   | 0.433*        | 1.000              |                 |
| $\text{NO}_3^-$    | <b>-0.545**</b> | 0.081          | 0.061          | -0.043         | -0.086           | 0-.028         | -0.076         | 0.058            | 0.155            | -0.064        | 0.004              | 1.000           |

注:\*\* $P<0.01$ , \* $P<0.05$ .

主成分分析(PCA)常被用来判断离子的主要来源的分析手段<sup>[6,12,36]</sup>,在采用主成分分析长江源区水样中离子来源前,先对水体离子含量进行 Kaiser-Meyer-Olkin 统计,抽样适度测定值为 0.629,而且为 Bartlett 球度检验为零,表明长江源区水体中离子含量可用 PCA 进行分析<sup>[37]</sup>.主成分 1、2、3 的特征值大于 1,其他主成分的特征值均小于 1,且这 3 个主成分的累积贡献率为 79.35%,说明这 3 个主成分就能够解释大部分采样点的离子含量数据.水体中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和  $\text{HCO}_3^-$ 含量在第一主

成分上具有较高负荷(图 6),可以解释 53.0%的方差,表明这些离子主要是来源为自然源,即来源于岩石风化、大气输送等<sup>[6,38]</sup>. $\text{NO}_3^-$ 在第二主成份可以解释 13.51%的方差,表明  $\text{NO}_3^-$ 与其他离子来源不同,主要为人类活动(农业、工业生产,以及居民生活污水排放等)<sup>[6]</sup>.第三主成分为 pH,可以解释 12.83%的方差,表明 pH 与离子来源不相同.

**2.4.1 大气传输** 流域的水体中  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ 和  $\text{K}^+/\text{Cl}^-$ 的平均值分别为 1.45、0.08,高于海水中相应的比例( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-=0.86, \text{K}^+/\text{Cl}^-=0.02$ ),而且长江源区远离海洋,

雨水中  $\text{Na}$  和  $\text{Cl}$  含量较低,表明大气输入的贡献较低。 $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  值大于 1,而硅酸盐溶解速率较低,对水体中  $\text{Na}^+$  贡献相对较小,因此认为长江源区钠离子主要是来源于蒸发岩溶解<sup>[5,39]</sup>。

**2.4.2 人为活动** 随着近年来藏区旅游业的发展和放牧活动的快速增长,长江源区的自然水体化学特征可能随之发生改变<sup>[12]</sup>。 $\text{NO}_3^-$  可作为人为活动的对水环境影响的指标<sup>[6]</sup>,长江源区水体中  $\text{NO}_3^-$  含量范围为 0.26~2.75mg/L,均值为 1.46mg/L,  $\text{NO}_3^-$  含量整体较低,而且长江源区人口密度较低,因此长江源区水体中离子受人为活动影响极为有限。为了进一步研究长江源区不同河流水体受人为活动影响情况,采用  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  经  $\text{Na}$  标准化后的比值区分地壳源和人为源,长江源区水体中  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  经  $\text{Na}$  标准化后的比值无明显相关性,表明  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  存在不同的来源。由图 7 分析可知,当曲源头的  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$  值接近 0.5,表明该处受到一定的人为活动影响<sup>[12]</sup>。同

时,现场调查表明,在当曲源头发现大量牛群,因此当地居民的放牧活动对当曲局部水化学特征有一定的影响。

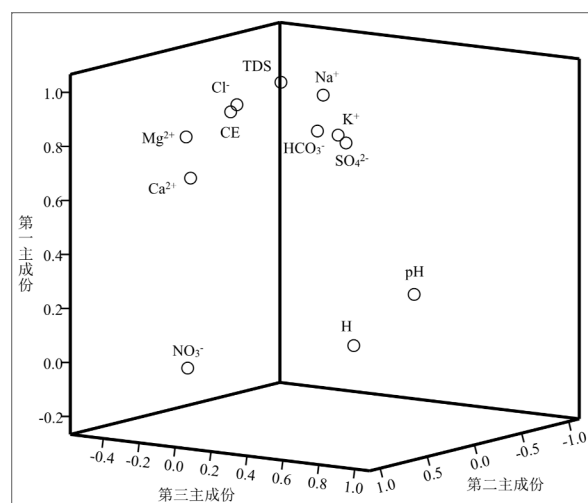


图 6 长江源主要离子主成分分析

Fig.6 Principal component analysis (PCA) for major ion in the source region of Yangtze River

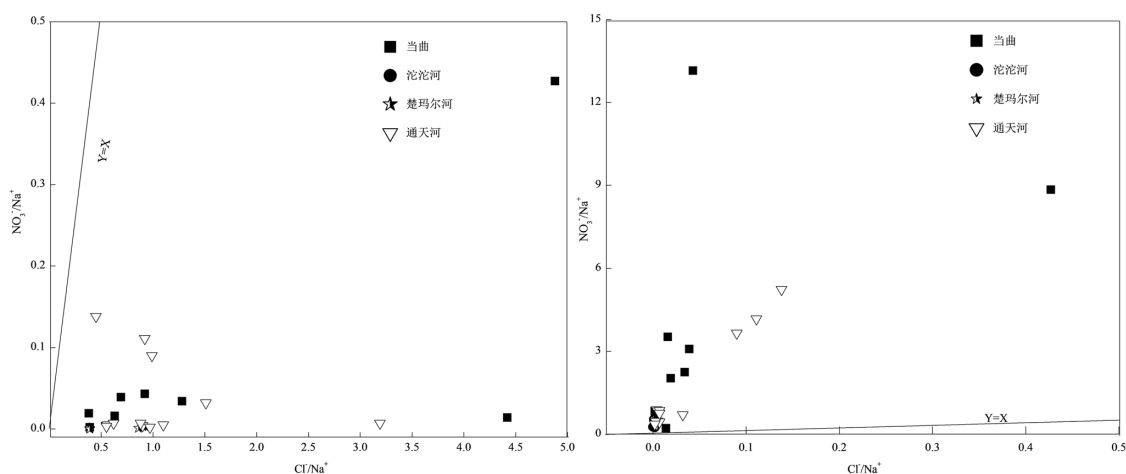


图 7  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  与  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  及  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$  与  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  关系

Fig.7  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  for major rivers in the source region of Yangtze River

**2.4.3 岩石风化** 天然水中的  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  主要来源于蒸发岩或硅酸盐的风化产物,  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  可能来源于碳酸盐、蒸发岩或硅酸盐,  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来源于蒸发岩的溶解,  $\text{HCO}_3^-$  主要来源于碳酸盐岩<sup>[5]</sup>。典型岩性的风化作用产生了不同的离子,而不同离子比例可以反映离子受不同类型岩石风化的影响程度<sup>[1]</sup>。由图 8 分析可知,长江源区水体中  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  物质的量当量比值在 1 附近,表明长江源区水体中离子受蒸发岩溶解影响较大。长江源区当曲和沱沱河大部分采样点位于  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$  等量线的上方,表明  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$

除了受碳酸盐溶解影响外<sup>[40]</sup>,还受硅酸盐和蒸发岩溶解的影响,而楚玛尔河和沱沱河位于此等量线附近,表明楚玛尔河和沱沱河受碳酸盐溶解影响。沱沱河和楚玛尔河采样点位于  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$  等量线的上方,表明沱沱河和楚玛尔河主要碳酸盐和蒸发岩溶解影响,而当曲和通天河位于等量线附近,沱沱河和楚玛尔河主要离子受碳酸盐和硫酸盐溶解影响<sup>[35]</sup>。长江源区主要采样点位于  $(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$  与  $\text{HCO}_3^-$  等量线下方,并且偏离较远,表明长江源区主要离子受蒸发岩溶解影响大于碳酸盐溶解<sup>[41]</sup>。

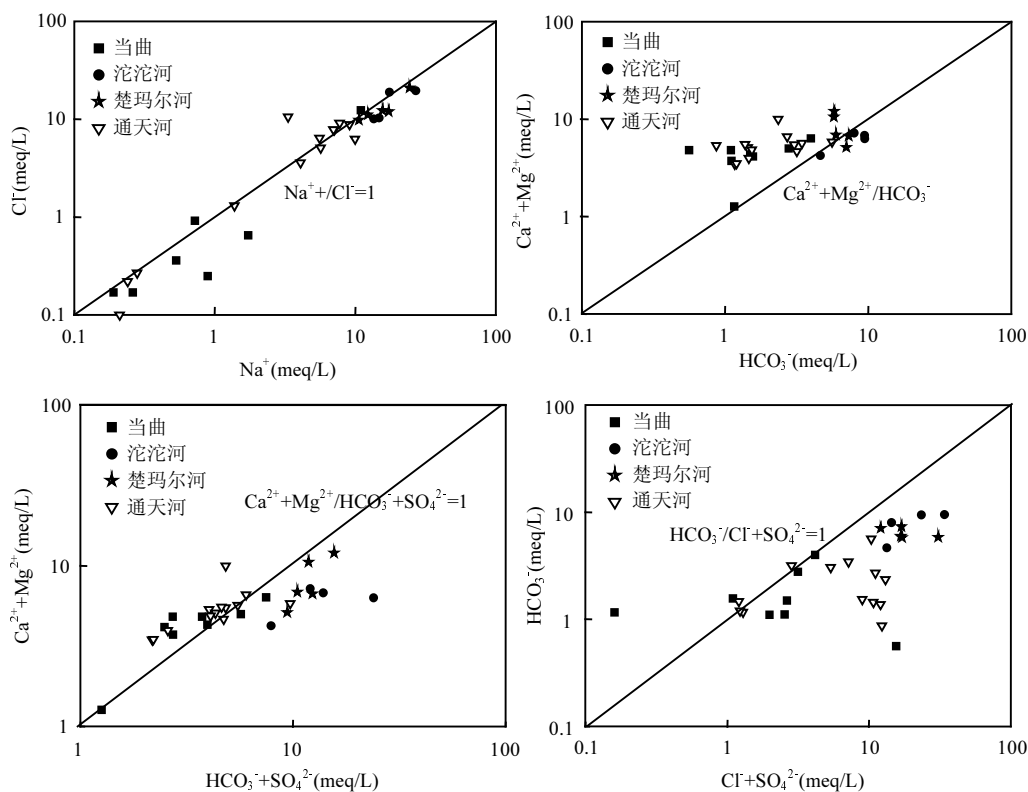
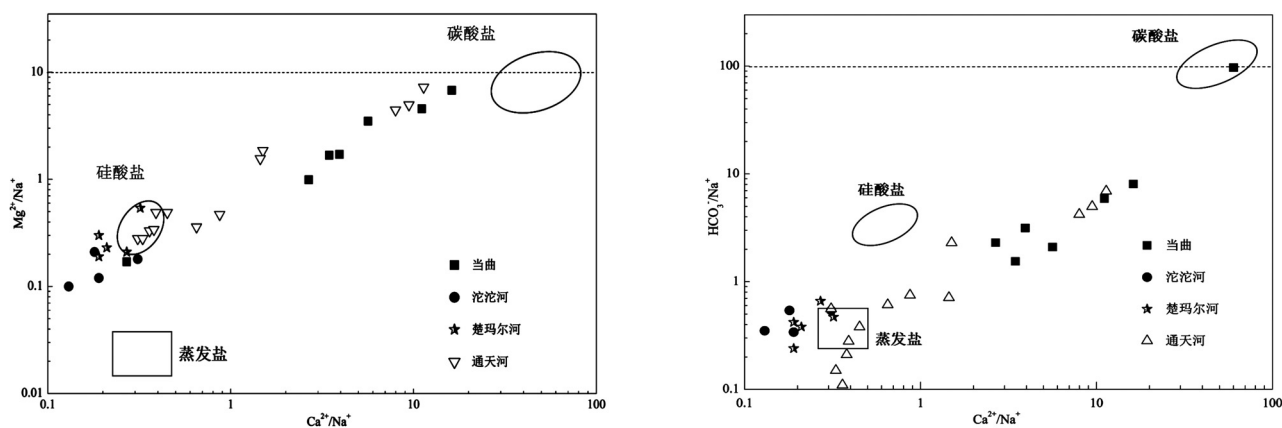


图8 长江源区主要离子关系

Fig.8 Main ion relation diagram of the source region of the Yangtze river

图9 长江源区主要河流  $Mg^{2+}/Na^+$  与  $Ca^{2+}/Na^+$ ,  $HCO_3^-/Na^+$  与  $Ca^{2+}/Na^+$  关系Fig.9  $Mg^{2+}/Na^+$  and  $Ca^{2+}/Na^+$ ,  $HCO_3^-/Na^+$  and  $Ca^{2+}/Na^+$  for the source region of the Yangtze river

钠校正物质的量比法可消除稀释作用的影响,可以用于分析溶解溶质的主要来源(蒸发盐、硅酸盐和碳酸盐)<sup>[6]</sup>。由图9分析可知,当曲采样点主要位于碳酸盐和硅酸盐端,表明当曲水体中离子主要来源于碳酸盐和硅酸盐溶解<sup>[42]</sup>,在自然条件下,碳酸盐的溶解度比硅酸盐高12~40倍,说明当曲受碳酸盐溶解影响更为显著。沱沱河和楚玛尔河采样点主要位于蒸发岩和硅酸盐端,表明沱沱河和楚玛尔河水体中离子主要来源于蒸发岩和硅酸盐溶解,一般情况

下,水体中蒸发岩的溶解速率是碳酸盐的4~7倍,而且沱沱河和楚玛尔河水体中  $SiO_2$  的含量(分别为6.29mg/L和1.64mg/L)远低于世界河流平均含量(7.62mg/L)<sup>[43]</sup>,说明沱沱河和楚玛尔河水体受蒸发岩溶解的影响更为显著。通天河则位于蒸发盐、硅酸盐和碳酸盐共同溶解的影响,通天河水体中  $SiO_2$  的平均含量(4.42mg/L)低于世界河流平均值<sup>[43]</sup>,说明通天河受蒸发盐和碳酸盐溶解的影响更为显

著.综合以上分析可知,长江源区主要河流与青藏高原河流离子主要来源相似,主要受碳酸盐风化和蒸发岩溶解的影响较为显著<sup>[14]</sup>.

2.5 水质评价

由于长江源区主要河流主要离子浓度较高,因此对其水质的适宜性进行评价.由于长江源区河水主要用于农田灌溉及饮用,因此参照农田灌溉用水水质标准和饮用水标准进行评价.

2.5.1 灌溉用水水质评价

(1)盐度危害和碱危害

灌溉水中过量的钠和盐度浓度会导致钠的危害和盐度的危害.水中的钠离子取代土壤中的钙、镁离子,使磷含量和渗透性降低,使土壤硬化.可根据计算钠(Na%)、钠吸附比(SAR)及电导率等参数,评价灌溉用水的水质<sup>[27,36,41]</sup>.

$$\text{Na\%} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+} \times 100\%$$
 (1)

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ \sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2}$$
 (2)

长江源区水体中钠吸附比范围为 0.02~21.7,均值为 4.01,表明长江源区河流大部分(90%)采样点水体没有碱危害风险.水体中电导率范围为 181.1~4356μS/cm,均值为 1171μS/cm,表明长江源区盐度整体较高,存在盐度危害风险<sup>[27]</sup>.由图 10 分析可知,当

曲采样点落在 C1S1 和 C2S1 区域,表明当曲主要为低钠中盐水体,符合灌水质质的要求.沱沱河河采样点主要位于 C3 和 C4,而且 SAR 均大于 10,表明沱沱河和楚玛尔河河水不适合直接用于灌溉<sup>[36]</sup>.通天河采样点主要位于 C2S1 和 C3S1,表明河水可以用于灌溉,但是为了降低盐碱化危害风险,建议用于耐盐植物的灌溉<sup>[44]</sup>.

根据 Na%值,将灌溉水分为 5 类:Na%<20,水质非常好;20<Na%<40,水质较好;40<Na%<60,水质一般可以用来灌溉;60<Na%<80,水质不一定适合灌溉;Na%>80,水质不能直接用于灌溉<sup>[1]</sup>.长江源区 Na%的范围为 0.9~84.2,均值为 41.1,其中 7.5%的采样点水体中不能直接用于灌溉,23.9%的采样点水体不一定适用于灌溉,68.6%的采样点水体可用于灌溉.不同河流间差异较大,当曲、沱沱河、楚玛尔河及通天河水体中 Na%比分别为 17、62、56 和 47.3.表明当曲所有采样点水体均适宜于灌溉.钠与碳酸盐结合形成碱性土壤,钠与氯结合形成盐渍土,高的钠含量会引起土壤的反絮凝作用,损害土壤的肥力和渗透性.而且当灌溉水中钠离子浓度较高时,钠离子容易被粘土颗粒吸附,通过碱基交换过程取代镁离子和钙离子,更加不利于农作物生长<sup>[27]</sup>.因此,沱沱河和楚玛尔河以及通天河的水体用于灌溉时需要慎重.

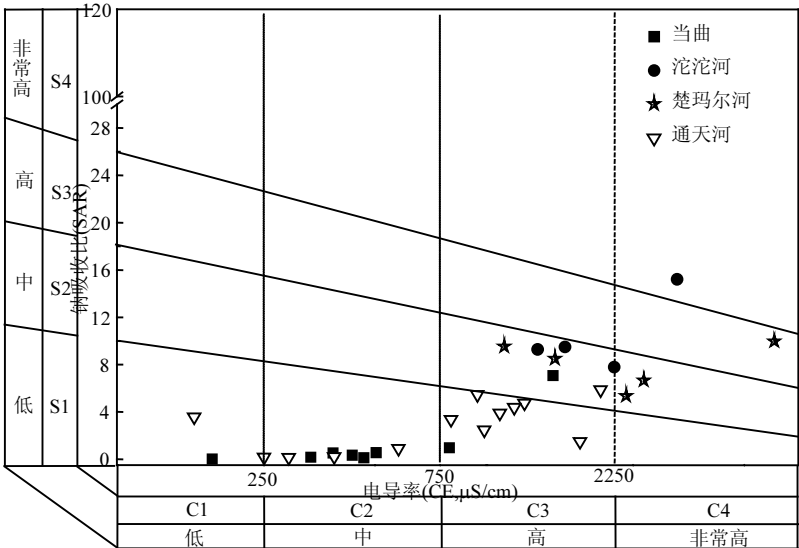


图 10 长江源区灌溉水质分类

Fig.10 Diagram for irrigation waters classification in the S the source region of Yangtze River

(2)渗透性指数

长期使用高盐灌溉水会影响土壤渗透性,根据渗透性指数,可以判断水体对灌溉区土壤渗透性的

影响<sup>[27]</sup>.灌溉指数(PI)的计算公式表示如下:

$$\text{PI} = \frac{\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+}$$
 (3)

式中各离子含量单位均为 meq/L.如果水体  $PI > 70\%$ ,表明不会影响灌溉渠土壤渗透性, $PI < 25\%$ ,则影响灌溉土壤渗透性<sup>[27]</sup>.由计算可知,长江源区  $PI$  值为 30.4~90.3%,均值为 71.2%.其中 47%的采样点水体对土壤渗透性没有影响,53%的采样点可能对水体渗透性具有一定的影响.

**2.5.2 饮用水水质评价** 参照《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006),对长江源区水体中 TDS、TH、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  进行评价.由图 12 分析可知,与其他河流相比,当曲水体中 TDS、TH、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  平均含量相对较低,均符合《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006).沱沱河  $Na^+$  和  $Cl^-$  平均含量超《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)中标准限值( $Na^+$  标准限值:200mg/L, $Cl^-$  标准限值:250mg/L),表明沱沱河水体不宜直接饮用.楚玛尔河 TDS、 $Na^+$  和  $Cl^-$  平均含量均超出饮用水标准限值(TDS 标准限值:1000mg/L),不宜直接用于饮用.通天河  $Cl^-$  平均含量均超出饮用水标准限值,不宜直接饮用.总体上长江源区水体中  $Na^+$  和  $Cl^-$  离子含量远高于长江中下游<sup>[31]</sup>,主要是由于长江源区蒸发作用强烈,区域内存在较多的盐湖和温泉<sup>[21,14]</sup>.

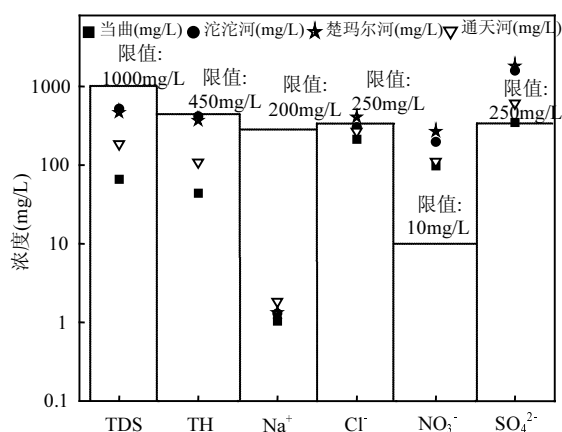


图 11 长江源区饮用水水质评价

Fig.11 Evaluation of drinking water quality in the source region of the Yangtze river

### 3 结论

**3.1 长江源区水体 pH 平均值** 为 8.3,呈现弱碱性,硬度平均值为 281.2mg/L,其中当曲通天河为中等硬度以下的淡水,而沱沱河和楚玛尔河为中等硬度以上的微咸水.研究区域内的阳离子主要以  $Na^+$  和  $Ca^{2+}$

为主,分别占总阳离子含量的 65.9%及 18.8%,阴离子主要以  $Cl^-$  和  $HCO_3^-$  为主,分别占总阴离子含量的 47.6%及 32.9%.

**3.2 长江源区的主要水化学类型** 为  $Na-Cl$ 、 $Ca-HCO_3$  和  $Ca-SO_4$ ,其中当曲水化学类型主要为  $Ca-HCO_3$  和  $Ca-SO_4$ ,沱沱河和楚玛尔河主要水化学类型为  $Na-Cl$ ,通天河水化学类型主要为  $Na-Cl$  和  $Ca-HCO_3$ .

**3.3 长江源区主要受岩石风化作用和蒸发结晶控制**,但不同河流水体水化学特征具有一定的差异,.当曲主要受岩石风化控制,沱沱河和楚玛尔河主要受蒸发结晶控制,而通天河主要受岩石风化作用和蒸发结晶控制.长江源区整体上水体离子受大气传输和人为活动影响较小,受岩石风化影响较大,但是当曲局部河段居民放牧对河流离子具有一定影响.当曲水体中离子主要来源于碳酸盐溶解,楚玛尔河和沱沱河离子主要来源于蒸发岩溶解,通天河离子主要来源蒸发岩、碳酸盐及硅酸盐的溶解.

**3.4 通过水质分析表明**,长江源区当曲水体可以直接用于灌溉,而沱沱河、楚玛尔河及通天河水体建议慎用于灌溉.长江源区当曲水体中 TDS、TH、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  平均含量均符合 GB5749-2006,而沱沱河、楚玛尔河及通天河水质相对较差,不宜直接用于饮用.

### 参考文献:

- [1] Pant R R, Fan Zhang, Rehman F U, et al. Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal [J]. Science of the Total Environment, 2017,622-623:770-782.
- [2] Li Z., Feng Q, Wang Q.J, et al. Quantitative evaluation on the influence from cryosphere meltwater on runoff in an inland river basin of China [J]. Global and Planetary Change, 2016a,143:189-195.
- [3] Zhao L Y, Li W, Lin L, et al. Field Investigation on River Hydrochemical Characteristics and Larval and Juvenile Fish in the Source Region of the Yangtze River [J]. Water, 2019,11(7):1-20.
- [4] Gopal V, Shanmugasundaram A, Nithya B, et al. Water quality of the Uppanar estuary, Southern India: implications on the level of dissolved nutrients and trace elements [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 130:279-286.
- [5] Noh H, Huh Y, Qin J, et al. Chemical weathering in the Three Rivers region of Eastern Tibet [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(7):1857-1877.
- [6] Zhou Li, Jun Xiao, Jaivime Evaristo, et al. Spatiotemporal variations in the hydrochemical characteristics and controlling factors of streamflow and groundwater in the Wei River of China [J].

- Environmental Pollution, 2019,254:113006.
- [7] 刘晓琼,吴泽洲,刘彦随,等.1960~2015 年青三江源地区降水时空特征 [J]. 地理学报, 2019,74(9):1803-1820.
- Liu Y Q, Wu Z Z, Liu Y S, et al. Temporal and spatial characteristics of precipitation in the Three River Source Region of Qinghai from 1960 to 2015, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1803-1820.
- [8] Liu S Y, Zhang Y, Zhang Y S, et al. Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China [J]. Journal of Glaciology, 2009,55(190):353-362.
- [9] Shen Y P, Wang G Y, Wang G X, et al. Impacts of climate change on glacial water resources and hydrological cycles in the Yangtze River source region, the Qinghai-Tibetan Plateau, China: A Progress Report [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2009,1(6):0475-0495.
- [10] Qu B, Sillanpää M, Zhang Y, et al. Water chemistry of the headwaters of the Yangtze River [J]. Environmental earth Sciences, 2015,74(8): 6443-6458.
- [11] 邓 伟.长江河源区水化学基本特征的研究 [J]. 地理科学, 1988, 8(4):363-370.
- Deng W. Research on fundamental characteristics of hydrochemistry in the region of the Changjiang River Headwater, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 1988,8(4):363-370.
- [12] Li Z J, Li Z X, Song L L, et al. Environment significance and hydrochemical characteristics of supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River [J]. Science of the Total Environment, 2018,644:1141-1151.
- [13] Jiang L, Yao Z, Liu Z, et al. Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015,155(76-83).
- [14] Bin Q, Yulan Z, Shichang K, 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.
- [15] 谭立涓,李富学,李振萍,等.沱沱河多年冻土区地下水水特征及开发利用研究 [J]. 人民黄河, 2016,38(5):62-67.
- Tan L W, Li F X, Li Z P, et al. Study on groundwater characteristics and development in permafrost region of Tuotuo River, China [J]. Yellow River, 2016,38(5):62-67.
- [16] 李志良,宋英进.让江源之说回归真实 [J]. 地域研究与开发, 2010,29(2):139-144.
- Li Z L, Song Y J. Let the source of the Yangtze River return true said, China [J]. Areal Research and Development, 2010,29(2):139-144.
- [17] 三江源科学考察领导小组办公室.三江源头科学考察报告 [R]. 青海:三江源科学考察领导小组办公室, 2009.
- Sanjiangyuan Scientific Investigation Leading Group. A scientific investigation report on the source of Sanjiang river [R]. Qinghai: Office Sanjiangyuan Scientific Investigation Leading Group, 2009.
- [18] 陈 进.长江源—当曲水系及其生态系统特征探讨 [J]. 长江科学院院报, 2014,31(10):1-6.
- Chen J. One of the source of Yangtze River: Dangqu River Basin and its ecological system, China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014,31(10):1-6.
- [19] Chen B B, Li S L, Pogge von Strandmann Philip A E, et al. Ca isotope constraints on chemical weathering processes: Evidence from headwater in the Changjiang River, China [J]. Chemical Geology 2020, 531:119341.
- [20] Han P, Long D, Han Z, et al. Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling [J]. Remote Sensing of Environment, 2019,224:44-59.
- [21] 张海红.长江源及其周边地区蒸发量特征及变化趋势研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2004,24(3):49-52.
- Zhang Y P. Research of evaporation characteristics and its variation tendency in the source of the Yangtze river and the region around, China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2004, 24(3):49-52.
- [22] 李志威.三江源河床演变与湿地退化机制研究 [D]. 北京:清华大学, 2013.
- Li Z W. Fluvial Processes and wetland Degradation Mechanism of the Sanjiangyuan Source, China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [23] 吴珊珊.沱沱河流域冰川变化对气候变化的响应及其对径流的影响 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- Wu S S. Response of glacier changes to climate change and their influence on the runoff in Tuotuo River Basin, China [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [24] 钱开铸,吕京京,裴超重,等.长江源区通天河基流的计算与分析 [J]. 干旱区地理, 2011,34(3):511-518.
- Qian K T, Lv J J, Pei C Z, et al. Calculation and analysis of baseflow of Tongtian River in the source region of Yangtze River, China [J]. Arid Land Geography, 2011,34(3):511-518.
- [25] HJ 84-2016 水质 无机阴离子的测定 离子色谱法 [S].
- HJ 84-2016 Water Quality-Determination of Inorganic Anions - Ion Chromatography [S].
- [26] Gran G. Determination of the equivalence point in potentiometric titrations. Part II [J]. Analyst, 1952,77:661-671.
- [27] Raju N J, Shukla U K, Ram P. Hydrogeochemistry for the assessment of groundwater quality in Varanasi: a fast-urbanizing center in Uttar Pradesh, India [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2011,173 (1-4):279-300.
- [28] Gaillardet J, Viers J, Dupré B. 7-7-trace elements in river waters [J]. Treatise on Geochemistry, 2014,181:195-235.
- [29] 左禹政,安艳玲,吴起鑫,等.贵州省都柳江流域水化学特征研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(7):2684-269.
- Zuo Y Z, An Y L, Wu Q X, et al. Study on the hydrochemical characteristics of Duliu River basin in Guizhou province [J]. China Environmental Science, 2017,37(7):2684-2690.
- [30] 张馨月,马沛明,高干红,等.三峡大坝上下游水质时空变化特征 [J]. 湖泊科学, 2019,31(3):27-39.
- Zhang X Y, Ma P M, Gao Q H, et al. Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(3):27-39.
- [31] 夏学齐,杨忠芳,王亚平,等.长江水系河水主要离子化学特征 [J]. 地学前缘, 2008,15(5):194-202.
- Xia X Q, Yang X Q, Wang Y P, et al. Major ion chemistry in the Yangtze River, China [J]. Earth Science Frontiers, 2008,15(5):194-202.
- [32] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, et al. Major element chemistry of the

- Changjiang (Yangtze River) [J]. chemical geology, 2002,187(3):231–255.
- [33] Meybeck M, Helmer R. The quality of rivers: from pristine stage to global pollution [J]. Palaeogeog Palaeoclimat Palaeocol, 1989,75:283–309.
- [34] Gibbs RJ. Mechanism controlling world water chemistry [J]. Science, 1970,170(3962):1088–1090.
- [35] El Alfy M, Lashin A, Abdalla F, et al. Assessing the hydrogeochemical processes affecting groundwater pollution in arid areas using an integration of geochemical equilibrium and multivariate statistical techniques [J]. Environmental Pollution, 2017,229:760–770.
- [36] Long J, Luo K L. Elements in surface and well water from the central North China Plain: Enrichment patterns, origins, and health risk assessment [J]. Environmental Pollution, 2020,258:1–13.
- [37] Varol M. Assessment of heavymetal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,195: 355–364.
- [38] Khadka U R, Ramanathan A. Major ion composition and seasonal variation in the Lesser Himalayan lake: Case of Begnas Lake of the Pokhara Valley, Nepal [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(11):4191–4206.
- [39] Xiao J, Jin Z D, Ding H, et al. Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012,54: 162–173.
- [40] Thomas J, Joseph S, Thrivikramji K P, et al. Seasonal variation in major ion chemistry of a tropical mountain river, the southern Western Ghats, Kerala, India [J]. Environmental earth sciences, 2014,71(5): 2333–2351.
- [41] 朱秉启,杨小平.塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因 [J]. 科学通报, 2007,52(13):1561–1566.
- Zhu B Q, Yang X P. Chemical characteristics and origin of natural water in the Taklimakan Desert. Chinese Science Bulletin, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007,52(13):1561–1566.
- [42] 曹晏凤,张明军,瞿德业,等.祁连山东端地表及地下水水化学时空变化特征 [J]. 中国环境科学, 2020,40(4):277–286.
- Cao Y F, Zhang M J, Zhai DY, et al. Temporal–spatial variation of surface and groundwater chemistry in the eastern part of Qilian Mountains [J]. China Environmental Science, 2020,40(4):277–286.
- [43] Meybeck, M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. American Journal of Science, 1987, 287(5):401–428.
- [44] Zhang B, Song X, Zhang Y, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China [J]. Water Research, 2012,46(8):2737–2748.
- 作者简介:** 刘 敏(1987–),男,湖北咸宁人,工程师,硕士,主要水环境污染与治理研究.发表论文 20 余篇.

## 《中国环境科学》核心影响因子学科排名实现五连冠

根据中国科学技术信息研究所 2016 年 10 月 12 日发布的《2016 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,中国环境科学学会主办的《中国环境科学》2015 年核心影响因子 1.812,在环境科学技术及资源科学技术学科排名继续位居第一,在统计的 1985 种中国核心科技期刊中排名 38 位.自 2011 年以来,《中国环境科学》影响因子排名一直保持学科榜首.

《中国环境科学》编辑部