

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价

何晓丽^{1,2}, 吴艳宏^{1*}, 周俊¹, 邢海健¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在系统采集贡嘎山地表水样的基础上, 综合运用描述性统计、Gibbs 图和阴阳离子三角图, 分析了贡嘎山地区地表水化学主离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}) 特征及其控制因素、重金属元素 (Cu、Cd、Pb、Zn) 和营养元素 (N、P) 的空间分布特征, 并利用单因子评价法对贡嘎山地区地表水质进行评价。结果表明, 贡嘎山地区总溶解固体 (total dissolved solid, TDS) 质量浓度均值为 $103.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 为低矿化度水, 全流域水化学类型以 HCO_3^- -Ca 型为主。全区水化学主离子主要来自碳酸盐岩风化, 但大气降水对东部地区河流的化学离子来源具有重要影响。研究区地表水中重金属元素和营养元素的质量浓度总体较低, 且东部明显高于西部。贡嘎山地区地表水水质总体优良, 并呈现西部优质, 东部良好的空间分布特征, 该特征主要受自然因素控制, 但东南坡的部分水体已受到人类影响。

关键词: 地表水; Gibbs 图; 水化学特征; 水质评价; 贡嘎山

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3798-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.017

Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region

HE Xiao-li^{1,2}, WU Yan-hong^{1*}, ZHOU Jun¹, BING Hai-jian¹

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The concentrations of major ions (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , and SO_4^{2-}), heavy metals (Cu, Cd, Pb, and Zn), and nutrient elements (N and P) in surface water collected from Gongga Mountain region were analyzed to decipher their spatial distribution and assess the water quality. The descriptive statistics, Gibbs Figure, and triangular diagrams of anions and cations were employed, and single factor evaluation was conducted. The results showed that the average value of total dissolved solid (TDS) in Gongga Mountain region was $103.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ indicating low salinity, and the hydro-chemical type was HCO_3^- -Ca. For whole catchment, the major ion chemistry of river water was controlled by carbonate weathering, while the effect of atmospheric deposition was high in the eastern area. The overall concentrations of heavy metals and nutrient elements were low, and the eastern area had significantly higher concentrations than the west. The quality of surface water was good from the whole point of view, while that in the west was better than the east. It indicated that the spatial distribution was mainly controlled by natural factors, but the water of southeast slope had been affected by humans.

Key words: surface water; Gibbs Figure; hydro-chemical characteristics; water quality assessment; Gongga Mountain

山地不仅是生态和环境安全的重要屏障, 还为人类提供多种赖以生存的自然资源。作为全球的“天然水塔”, 山地是主要河流的发源地^[1,2], 为全球 50% 以上的人口提供淡水资源^[3]。贡嘎山地区是横断山脉的典型区域, 位于青藏高原与四川盆地的过渡地带, 该区水资源极为丰富, 是大渡河和雅砻江等河流的重要补给区, 其水环境质量不仅是当地生态系统健康发展的保障, 对下游水安全也具有直接影响。因此, 全面认识贡嘎山地区地表水环境质量的现状和影响因素, 是科学合理利用该区水资源和保护当地生态安全的现实需要。

山地地表水中的离子组成、重金属和营养元素质量浓度是评价水质的重要指标, 但目前三者贡嘎山地区的研究主要集中在东部地区(东南坡、东

坡和东北坡), 且以小流域为主, 对西坡和北坡的研究较少, 针对贡嘎山整个区域的地表水环境质量的系统研究更少, 不利于准确认识和评估贡嘎山地区的地表水环境质量。不仅如此, 高山地区水体中离子的自然来源主要为岩石风化^[4], 岩石风化受岩性、温度、降水、植被和地形等诸多因素影响^[5,6], 而贡嘎山东部地区、西坡及北坡的各因素差异对岩石风化、水体离子组成和水质的影响, 目前仍不清楚。同时, 重金属与营养元素对贡嘎山地区地表水

收稿日期: 2016-04-06; 修订日期: 2016-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272200); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41401253)

作者简介: 何晓丽(1990~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: xlhe@imde.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: yhwu@imde.ac.cn

质量的影响已不容忽视。一方面,贡嘎山高山环境有利于重金属等污染物聚集,山地土壤已成为重金属等污染的“汇”^[7~9]。另一方面,贡嘎山东部亚高山地区因坡度大、土层薄、土壤 pH 较低(4~6)^[10]、降水极为丰富^[11]等原因,土壤磷流失速率快^[12]、且流失的形态以可交换态为主^[13],因此该区可能成为该地区水体污染的源。

本研究通过对贡嘎山东南坡、东坡、东北坡、北坡和西坡这 5 个区域的地表水中主要离子、营养元素和重金属元素的质量浓度分析,了解研究区地表径流的主要离子特征,并利用 Gibbs 模型等方法探讨控制水体主要离子组成的关键因素;阐明该区域地表水中重金属元素和营养元素的空间分布特征;采用单因子评价法评估该地区的地表水环境质量,以期对贡嘎山地区的水资源保护和合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贡嘎山是横断山系最高峰,海拔 7 556 m,区域面积约 2×10^4 km²(图 1);位于青藏高原与四川盆地的过渡地带,同时也位于青藏高原高寒气候区与亚热带季风气候区的过渡带上,因此,贡嘎山东部地区(东南坡、东坡和东北坡)、西坡和北坡的地貌、气候、土壤和植被等差异巨大。

贡嘎山东部地区主要受东南季风和四川盆地暖湿气流影响,基带年均温 15~17℃,西坡主要受西南季风影响,基带年均温 $\geq 8^\circ\text{C}$,全区域年均温度表现为东高西低和北低南高的水平规律,但西坡河谷地带较为特殊,同海拔上西部气温较东部高 1~3℃。整个地区温暖湿润,降水量较大,从河谷到高山带年降水量达 1 000~3 000 mm,以东南坡的田河湾一带最多,东坡次之,西坡和北坡较少,仅有 600~1 000 mm。植被和土壤具有明显的坡向分化和垂直分带现象^[14]。受冰川作用和高山峡谷地貌的影响,贡嘎山成土母质多为冰川堆积物和坡积物。东部地区主要岩类为花岗岩,含大量云母;西坡多为砂板岩、灰质砂页岩及第三纪红色岩层的风化物,北坡以第四系松散堆积岩组为主^[15]。

1.2 样品采集与分析

为进一步分析,将东部地区划分为东南坡(大渡河、湾东河及其支流)、东坡(海螺沟、燕子沟及其支流)和东北坡(雅家梗、雅家河及其支流)。按照坡向和海拔特点于 2013 年 9 月采集了贡嘎山地

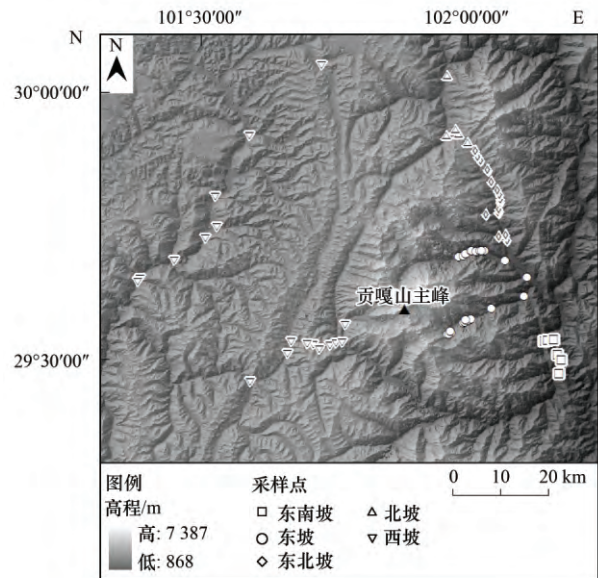


图 1 贡嘎山地理位置与采样点分布示意

Fig. 1 Location of Gongga Mountain and sampling sites

表水共 70 个样品,其中东南坡 7 个、东坡 22 个、东北坡 18 个、北坡 5 个、西坡 18 个。水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤前测定 N、P 质量浓度,过滤后将样品分为两部分,一部分用于测定阴离子,另一部分加入超纯 HCl 用于测定阳离子。样品在室内测定前保存于 4℃ 冰箱中。

采用美国戴安公司离子色谱仪(ICS-90)测定水体中的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度,检出限均为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。同时采用美国 Teledyne Leeman LABS 公司电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)检测 K、Na、Ca 和 Mg 的质量浓度,检出限分别为 0.1、0.03、0.01 和 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此外,采用美国珀金埃尔默 PE NexION 300X 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测 Cu、Cd、Pb、Zn 和 P 的质量浓度,检出限分别为 0.01、0.005、0.01、0.1 和 $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。采用中国托普公司全自动凯氏定氮仪(ZDDN-II)测定 N 质量浓度。实验过程中,每批样品均设置 3 个空白、标准样品,同时测定平行样。测定工作在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所理化分析实验室完成,测试精度为 $\pm 5\%$ 。

1.3 统计分析

采用 IBM SPSS 软件(版本号: V19.0)进行描述性统计和 Bonferroni-Test 显著性分析。描述性统计主要包括:整个研究区和各坡向的主离子、重金属元素和营养元素质量浓度均值和标准差;显著性分析则用于判断在 0.05 置信水平上各坡向水化学数据之间是否存在显著性差异。

基于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002), 采用单因子评价法评估贡嘎山地区地表水环境质量.

采用 OriginLab® Origin 软件(版本号: V8.0) 绘制所有图件.

2 结果与讨论

2.1 水化学主离子特征及水化学类型

贡嘎山东南坡、东坡、东北坡、北坡和西坡这 5 个区域(图 1 和表 1) TDS 质量浓度变化范围为 43.37 ~ 169.29 mg·L⁻¹, 自东南坡-东坡-东北坡逐渐降低, 沿东北坡-北坡-西坡方向逐渐升高; 东南坡和西坡间无显著性差异, 但两者与东坡、东北坡和北坡均存在显著性差异($P < 0.05$). 这可能是由于

沿东南坡-东坡-东北坡方向, 海拔逐渐升高, 温度降低, 造成岩石风化减弱, 则 TDS 质量浓度逐渐降低; 而东北坡、北坡和西坡的样点, 海拔变化不大, 因同海拔上西部气温较东部高, 则西坡岩石风化较同海拔北坡、东北坡强, 不仅如此, 受东南季风影响, 沿东北坡-北坡-西坡方向降雨量逐渐减小, 主离子流失降低, 则 TDS 质量浓度逐渐升高. 从全流域来看(表 2), TDS 质量浓度均值为 103.22 mg·L⁻¹, 略高于全球河流 TDS 平均值 99.00 mg·L⁻¹, 但低于雅砻江、岷江、长江和亚洲河流 TDS 质量浓度. 这与贡嘎山地层岩性有关, 贡嘎山主要岩类为花岗岩, 碳酸盐岩矿物质量分数较低, 而由表 2 可知, 造成贡嘎山地表水 TDS 质量浓度较低的主要贡献离子正是 HCO₃⁻.

表 1 贡嘎山地表水主要离子质量浓度¹⁾ /mg·L⁻¹

Table 1 Mass concentrations of major ions in surface water of Gongga Mountain/mg·L⁻¹

主要离子	东南坡	东坡	东北坡	北坡	西坡	全区
K ⁺	5.26 ± 4.24	2.51 ± 1.34	1.31 ± 3.18	0.51 ± 0.17	0.89 ± 1.13	1.92 ± 2.58
Na ⁺	9.19 ± 17.76	1.87 ± 3.16	1.04 ± 0.63	1.45 ± 0.92	1.27 ± 0.51	2.20 ± 6.02
Ca ²⁺	20.24 ± 7.46	16.83 ± 9.46	9.66 ± 9.83	14.51 ± 5.85	24.46 ± 10.55	17.13 ± 10.74
Mg ²⁺	7.99 ± 8.91	1.62 ± 0.99	1.32 ± 2.66	2.95 ± 2.85	10.43 ± 8.20	4.54 ± 6.47
CO ₃ ²⁻	—	—	—	—	1.04 ± 1.44	0.27 ± 0.85
HCO ₃ ⁻	91.59 ± 61.62	48.45 ± 23.14	25.64 ± 28.27	44.08 ± 27.49	117.64 ± 48.88	64.38 ± 51.38
Cl ⁻	4.56 ± 10.26	0.49 ± 0.75	0.49 ± 0.03	0.65 ± 0.28	0.53 ± 0.07	0.92 ± 3.29
SO ₄ ²⁻	25.81 ± 17.51	12.99 ± 12.45	3.91 ± 2.89	11.89 ± 2.64	13.02 ± 12.15	11.86 ± 12.23
TDS	164.65 ± 119.67	84.76 ± 41.20	43.37 ± 41.07	76.03 ± 38.86	169.29 ± 74.97	103.22 ± 76.17

1) 数值均表示平均值 ± 标准差; “—”表示低于检出限

表 2 不同河流的主要离子质量浓度¹⁾ /mg·L⁻¹

Table 2 Mass concentrations of major ions in water of different rivers/mg·L⁻¹

主要离子	本研究	雅砻江 ^[16]	岷江 ^[16]	长江 ^[16]	亚洲 ^[17]	全球河流流量加权平均值 ^[18]
K ⁺	1.92 ± 2.58	/	/	/	4.00	/
Na ⁺	2.20 ± 6.02	/	/	8.30	6.00	5.20
K ⁺ + Na ⁺	4.12 ± 7.74	6.60	5.10	/	10.00	/
Ca ²⁺	17.13 ± 10.74	27.30	32.00	34.10	18.00	13.40
Mg ²⁺	4.54 ± 6.47	5.70	7.70	7.60	6.00	3.30
CO ₃ ²⁻	0.27 ± 0.85	/	/	/	/	/
HCO ₃ ⁻	64.38 ± 51.38	114.40	118.40	133.80	79.00	51.80
Cl ⁻	0.92 ± 3.29	3.50	2.80	2.90	9.00	5.80
SO ₄ ²⁻	11.86 ± 12.23	4.50	16.50	11.70	8.00	8.40
TDS	103.22 ± 76.17	162.00	182.50	198.40	140.00	99.00

1) /表示数据缺失

水体阳离子各组分质量浓度在东南坡依次为: Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺, 东坡为 Ca²⁺ > K⁺ > Na⁺ > Mg²⁺, 东北坡为 Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Na⁺, 北坡和西坡为 Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺. 全流域水体阳离子各组分质量浓度排序与北坡、西坡相同, Ca²⁺ 始终是最主要的阳离子组分, 阴离子质量浓度在各坡

向和全流域的比例都比较一致, 绝大多数样点均为 HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > CO₃²⁻. 因此, 贡嘎山地表水化学类型可归结为 HCO₃-Ca 型, 与青藏高原东部长江水系的水化学特征和类型基本一致^[19].

2.2 水体主离子来源及控制因素

Gibbs 根据全球 100 多条河流的统计结果, 将控

制天然河水主要离子来源的因素分为 3 个类型: 大气降水控制型、岩石风化控制型和蒸发-结晶控制型, 该理论是定性判断区域大气降水、岩石风化和蒸发-结晶过程对河流水化学影响的重要手段^[20]。如图 2 所示, 贡嘎山水体化学离子组成绝大部分都落在 Gibbs 分布模型内, 且研究区大部分水样处于岩石风化控制区域, 说明贡嘎山地区水化学主

离子主要来自于岩石风化, 与整个长江上游水系水体离子的主要来源一致^[21]。但值得注意的是, 位于 Gibbs 图最下部边界上的采样点具有靠近大气降水控制端的趋势, 这些采样点位于东部地区, 而贡嘎山东部地区受东南季风影响强烈, 说明贡嘎山东部地区水体离子来源受大气降水的影响较强。

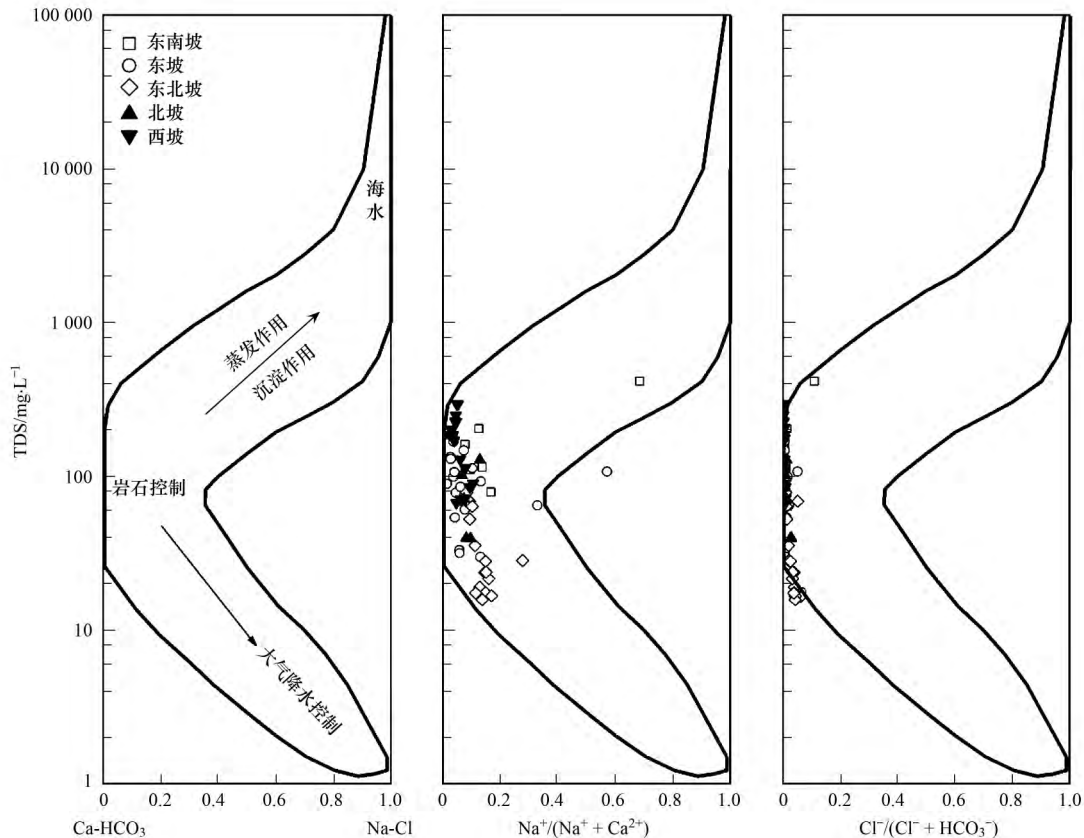


图 2 贡嘎山水化学 Gibbs 分布

Fig. 2 Gibbs figure of hydrochemistry in Gongga Mountain

利用阴、阳离子三角图, 可以在已知为岩石风化控制贡嘎山水体离子组分的基础上, 进一步确定是哪类岩石的风化控制其组成。由图 3 可知, 在阳离子三角图中, 组分点主要靠近 Ca^{2+} 端元, 阴离子三角图则显示阴离子分布在 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 线上, 且靠近 HCO_3^- 一端, 这说明贡嘎山全区域水体化学成分主要受碳酸盐岩风化的控制。贡嘎山东坡主要岩类为花岗岩, 西坡多为砂板岩、灰质砂页岩, 但地表水体却表现出受碳酸盐岩风化控制的特征。这可能是由于该地区温度较低, 湿度较大, 尽管地层中碳酸盐岩矿物质量分数较低, 但更易风化, 造成贡嘎山流域水体主离子组成表现出受碳酸盐岩风化控制的特征。但值得注意的是, 由图 3 可知有两个点 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 毫克当量百分数高于 50%, 分别为东坡海拔

2 512 m 和西坡海拔 3 622 m 的采样点。这可能是由于这两个采样点岩层中盐岩矿物质量分数较高, 且易风化, 造成 Na^+ 、 Cl^- 毫克当量百分数偏高, 两个采样点 Na^+ 毫克当量百分数依次为 48.16% 和 73.03%。

2.3 水体中重金属元素空间分布特征

从不同坡向来看(图 4), 东坡地表水中 Cu、Cd、Pb 和 Zn 的质量浓度高于其它坡向, 均值分别为 0.57、0.02、0.32 和 13.17 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。东坡 Cu、Cd 和 Zn 质量浓度与东北坡、西坡存在显著性差异 ($P < 0.05$), 与东南坡、北坡无显著性差异; 东坡 Pb 的质量浓度与东南坡、东北坡、西坡存在显著性差异 ($P < 0.05$), 与北坡无显著性差异。虽然已测积雪融水中各重金属元素质量浓度极低(Cu 和 Zn 的

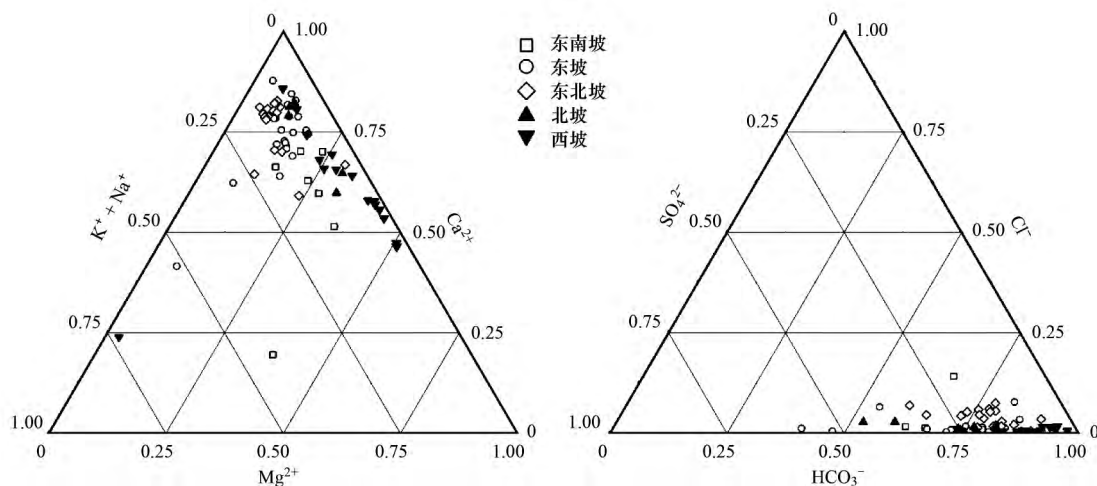


图 3 贡嘎山阳离子和阴离子三角图

Fig. 3 Ternary diagrams of anions and cations in water of Gongga Mountain

均值 ± 标准差分别为 $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.75 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, Cd 和 Pb 均未超出检出限) ,但东坡降雨中 Cd 较高^[22] ,且雅砻江、岷江和大渡河水体中重金属元素质量浓度均比研究区高 ,因此 ,影响贡嘎山东、西部地表水中重金属质量浓度差异的因素可能是大气降水。

从全流域来看 ,贡嘎山地表水各重金属元素中 Zn 质量浓度最高 ,为 $4.50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,Cd 质量浓度最

低 ,为 $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,且各重金属元素质量浓度均低于长江和全球河流背景值(表 3) 。这些结果表明 ,尽管东坡表层土壤中 Cd 质量浓度较高 ,但地表水中 Cd 的质量浓度较低(图 4) ,说明大气输入沉降到土壤中的 Cd 大部分还存在于土壤圈中 ,尚未对地表水水质造成明显影响。

2.4 水体中营养元素空间分布特征

从空间分布来看(图 5) ,贡嘎山东南坡地表水

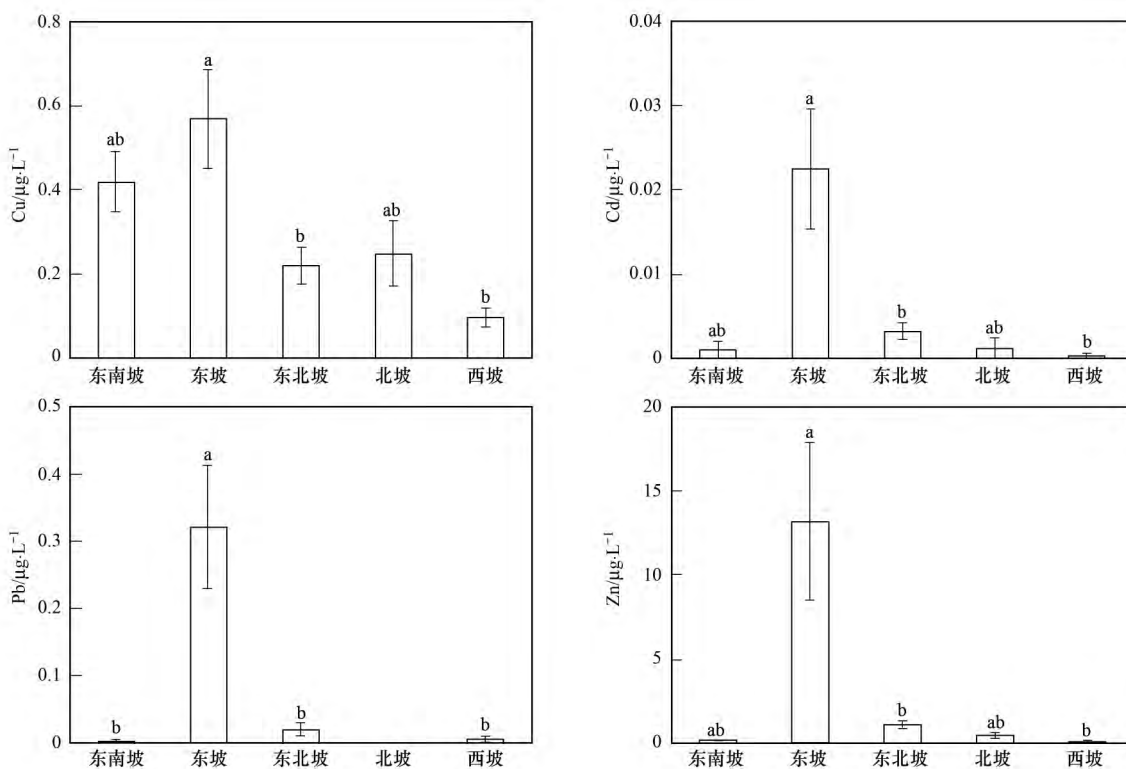


图 4 贡嘎山地区地表水重金属元素的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metals in surface water of Gongga Mountain

表3 不同河流的重金属质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Mass concentrations of heavy metals in water of different rivers/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

重金属	本研究	雅砻江 ^[23]	岷江 ^[24]	大渡河 ^[25]	长江 ^[26]	全球河流背景值 ^[26]
Cu	0.32 ± 0.38	2.17	1.94	/	8.40	1.00
Cd	0.01 ± 0.02	0.72	0.47	0.41	0.28	0.02
Pb	0.11 ± 0.28	7.37	11.48	6	6.40	0.20
Zn	4.50 ± 13.52	17.97	21.95	/	18.75	10

中 N、P 质量浓度显著高于东北坡、北坡和西坡 ($P < 0.05$), 分别为 $0.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 东坡 P 质量浓度显著高于东北坡、北坡和西坡 ($P < 0.05$), 为 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 东北坡和西坡水体中 N 质量浓度最低, 均为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 东北坡地表水中 P 质量浓度最低, 所有样品均低于检出限. 总体来看, 贡嘎山地区地表水的 N、P 质量浓度较低, 其质量浓度与雅砻江水体中基本一致, 但低于大渡河、岷江和长江水体中 N、P 质量浓度(表 4), 且沿贡嘎山-雅砻江-大渡河-岷江方向 N、P 质

量浓度逐渐升高.

由于已测积雪中 N、P 质量浓度极低(P 低于检出限, N 均值为 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 说明降水对贡嘎山地表水中营养元素质量浓度的影响较小. 随着旅游业的迅速发展, 东南坡和东坡成为贡嘎山地区人类活动强度最大的区域^[27], 而这两个区域也正是营养元素质量浓度最高的地区, 且 N、P 质量浓度最高的采样点位于东南坡低海拔处, 分别为海拔 1 284 m 和 1 082 m, 因此, 贡嘎山地区地表水主要营养元素的空间分布主要受人类活动影响.

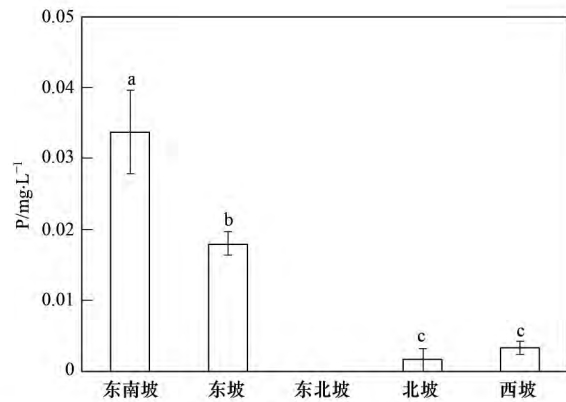
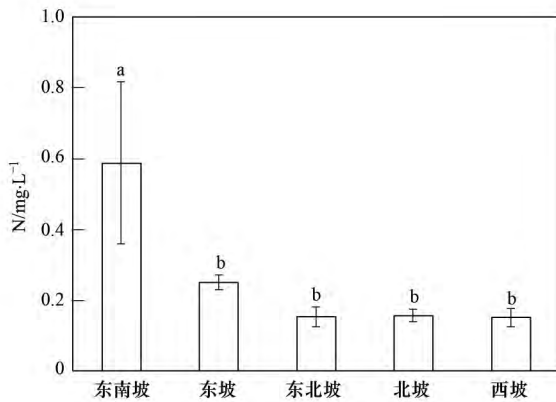


图5 贡嘎山地区地表水营养元素的空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of nutrient elements in water of Gongga Mountain

表4 其他河流营养元素质量浓度均值^[28] / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Average mass concentrations of nutrient elements in water of different rivers/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

营养元素	本研究	雅砻江	大渡河	岷江	长江
N	0.23 ± 0.24	0.28	1.02	1.47	2.23
P	0.01 ± 0.01	0.01	0.02	0.05	0.04

2.5 地表水环境质量评价

根据单因子评价法, 将每个样品的 Cu、Cd、Pb、Zn 和 N、P 质量浓度与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中的各项目标准限值进行比较, 以水质最差的单项指标所属水质类别确定水体综合水质类别. 结果表明(图 6), 贡嘎山地表水总体水质优良, 未受到较大影响, 且全区地表水中重金属元素的质量浓度均在 I 类水范围内. 空间分布呈西部优质, 东部良好的特征. 除东南坡外, 各坡水质均在 II

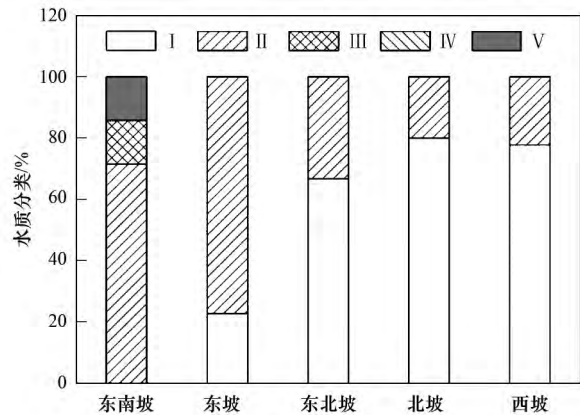


图6 贡嘎山地区地表水环境质量分类

Fig. 6 Quality classification of surface water in Gongga Mountain

类水以上. 东南坡属于 III 类和 V 类水的样品, 主要是由于 N 质量浓度介于 III 类和 V 类水的范围. 此

外,沿东南坡-东坡-东北坡-北坡、西坡方向,地表水质明显呈现出渐优趋势。

由于贡嘎山地区地表水水质总体较好,因此,目前该区域水质仍主要受岩石风化等自然因素的影响;而从Ⅲ类和Ⅴ类水样点的分布情况来看,这些样点都位于人类活动较强的低海拔地区(东南坡),而Ⅰ类和Ⅱ类水样点离人类活动区域较远,说明东南坡的部分水体受到了人类活动的影响。因此,为科学合理利用该区水资源和保护当地生态环境,应加强对贡嘎山东南坡水环境的重视程度。

3 结论

(1) 尽管贡嘎山东部地区、西坡和北坡的气候、植被和土壤差异显著,但该地区的水化学主离子来源主要受碳酸盐矿物风化作用的控制。其中在东部地区,由于受东南季风影响强烈,大气降水输入对该区河流化学离子来源具有较大影响。

(2) 从全流域来看,地表水中重金属元素和营养元素质量浓度均较低,自然因素是控制该区域水化学的主要因素。从不同坡向来看,水体中重金属元素在东坡质量浓度最高,大气沉降对其产生一定影响;营养元素在东南坡低海拔处最高,该分布特征受到人类活动影响。

(3) 结合重金属元素和营养元素空间分布特征对贡嘎山地表水环境质量进行评价,贡嘎山地区除东南坡外,各坡水质均在Ⅱ类水以上,未受到污染。空间分布呈西部优质、东部良好特征,目前该区域水质仍主要受自然因素影响,但东南坡部分水体已受到一定人类活动的干扰。

参考文献:

[1] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, **328**(5984): 1382-1385.

[2] 杨永刚,李彩梅,秦作栋,等. 汾河源区不同景观带水文过程研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2108-2113.

Yang Y G, Li C M, Qin Z D, et al. Hydrologic processes of the different landscape zones in Fenhe River headwater catchment [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2108-2113.

[3] Viviroli D, Weingartner R. The hydrological significance of mountains: From regional to global scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, **8**(6): 1017-1030.

[4] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, **287**(5): 401-428.

[5] Wongfun N, Götze J, Furrer G, et al. Effect of water regime and vegetation on initial granite weathering in a glacier forefield: evidences from CL, SEM, and Nomarski DIC microscopy [J]. *Geoderma*, 2013, **211-212**: 116-127.

[6] 周嘉欣,丁永建,曾国雄,等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3315-3324.

Zhou J X, Ding Y J, Zeng G X, et al. Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River Basin and the possible controls [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3315-3324.

[7] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, et al. Mobility and eco-risk of trace metals in soils at the Hailuoguo Glacier foreland in eastern Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(6): 5721-5732.

[8] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, et al. Atmospheric deposition of lead in remote high mountain of eastern Tibetan Plateau, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 425-435.

[9] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, et al. Vegetation and cold trapping modulating elevation-dependent distribution of trace metals in soils of a high mountain in eastern Tibetan Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 24081.

[10] Zhou J, Bing H J, Wu Y H, et al. Rapid weathering processes of a 120-year-old chronosequence in the Hailuoguo Glacier foreland, Mt. Gongga, SW China [J]. *Geoderma*, 2016, **267**: 78-91.

[11] Wu Y H, Zhou J, Yu D, et al. Phosphorus biogeochemical cycle research in mountainous ecosystems [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**(1): 43-53.

[12] Wu Y H, Zhou J, Bing H J, et al. Rapid loss of phosphorus during early pedogenesis along a glacier retreat chronosequence, Gongga Mountain (SW China) [J]. *PeerJ*, 2015, **3**: e1377.

[13] 吴艳宏,周俊,邴海健. 贡嘎山冷杉林带草海子小流域土壤及湖泊沉积物中磷的形态及迁移特征[J]. *地球环境学报*, 2013, **4**(1): 1208-1214.

Wu Y H, Zhou J, Bing H J. Soil and lake sediment phosphorus fractions and migrating in a small *Abies* forested watershed, Gongga Mountain, Southwest China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2013, **4**(1): 1208-1214.

[14] 钟祥浩,张文敬,罗辑. 贡嘎山地区山地生态系统与环境特征[J]. *AMBIO*, 1999, **28**(8): 648-654.

Zhong X H, Zhang W J, Luo J. The characteristics of the mountain ecosystem and environment in the Gongga Mountain Region [J]. *Ambio*, 1999, **28**(8): 648-654.

[15] 余大富. 贡嘎山的土壤及其垂直地带性[J]. *土壤通报*, 1984, **15**(2): 65-68.

[16] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Chemical Geology*, 2002, **187**(3-4): 231-255.

[17] Huang X, Sillanpää M, Gjessing E T, et al. Water quality in the Tibetan Plateau: major ions and trace elements in the headwaters of four major Asian rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(24): 6242-6254.

[18] Meybeck M, Helmer R. The quality of rivers: from pristine stage to global pollution [J]. *Global and Planetary Change*, 1989, **1**(4): 283-309.

[19] 秦建华,冉敬,杜谷. 青藏高原东部长江流域盆地陆地化学风化研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2007, **27**(4): 1-6.

Qin J H, Ran J, Du G. Subaerial chemical weathering in the Changjiang drainage systems on eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, **27**(4): 1-6.

- [20] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [21] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因 [J]. *地质通报*, 2010, **29**(2-3): 446-456.
Wang Y P, Wang L, Xu C X, *et al.* Hydro-geochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, **29**(2-3): 446-456.
- [22] Wu Y H, Bing H J, Zhou J, *et al.* Atmospheric deposition of Cd accumulated in the montane soil, Gongga Mt., China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(6): 940-946.
- [23] 孙超白, 张抱膝, 童远瑞, 等. 应用大型底栖无脊椎动物评价金沙江(渡口市段)枯水期的水质 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1985, **21**(3): 525-536, 572.
Sun C B, Zhang B X, Tong Y R, *et al.* The benthic macro-invertebrates for the assessment of the water quality in Jinsha Jiang River (the section of Du Kou) [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1985, **21**(3): 525-536, 572.
- [24] 孙洁. 岷江中游水系沉积物中重金属的环境地球化学评价 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010. 13-15.
Sun J. Environmental geochemistry evaluation of heavy metal elements in sediments from middle reaches of Minjiang River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010. 13-15.
- [25] 姚远, 李云祯, 赵希锦, 等. 地表河流水环境重金属污染风险评价 [J]. *水资源与水工程学报*, 2013, **24**(5): 120-123.
Yao Y, Li Y Z, Zhao X J, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution of water environment for surface river [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, **24**(5): 120-123.
- [26] Wang L, Wang Y P, Xu C X, *et al.* Analysis and evaluation of the source of heavy metals in water of the River Changjiang [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **173**(1-4): 301-313.
- [27] 银元, 李晓琴. 山地旅游业态影响因素及规划实证研究——以贡嘎山风景名胜为例 [J]. *热带地理*, 2012, **32**(6): 676-682.
Yin Y, Li X Q. Influential factors on mountain tourism format: a case study of Gongga Mountain in Sichuan [J]. *Tropical Geography*, 2012, **32**(6): 676-682.
- [28] Liu S M, Zhang J, Chen H T, *et al.* Nutrients in the Changjiang and its tributaries [J]. *Biogeochemistry*, 2003, **62**(1): 1-18.