

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0013

汪磊,王兆涵,姚治君,等.雅鲁藏布江流域枯水期化学风化及 CO₂ 消耗[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):118-126.
WANG L,WANG Z H,YAO Z J,et al.Study on chemical weathering and consumption of CO₂ during dry season in the Yarlung Zangbo River basin[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(1):118-126.(in Chinese)

雅鲁藏布江流域枯水期化学风化及 CO₂ 消耗

汪磊^{1,2},王兆涵¹,姚治君⁴,韩宇平^{1,2,3}

(1.华北水利水电大学,郑州 450046;2.水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心,郑州 450046;
3.河南省水环境治理与模拟重点实验室,郑州 450046;4.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要:基于雅鲁藏布江流域枯水期干支流地表径流、泉水、地下水以及降水样品,对主要离子、pH、TDS 和 CO₂ 消耗进行分析,研究枯水期水化学特征及成因,并分析流域化学风化速率及 CO₂ 消耗通量。结果表明:流域水体总体呈现弱碱性,地表径流 TDS 均值约为世界河流的 2.3 倍,和长江流域相似,但远低于黄河流域。岩石风化是地表径流离子来源的主要影响因素。碳酸盐风化、硅酸盐风化和蒸发盐风化分别占离子来源的 46.3%、28.6%和 21.3%,碳酸盐风化速率和硅酸盐风化速率分别为 1.43 t/(km²·a)和 1.11 t/(km²·a),对应的 CO₂ 消耗速率为 0.80×10⁵ mol/(km²·a)和 0.55×10⁵ mol/(km²·a),枯水期化学风化速率和 CO₂ 消耗速率较小。

关键词:雅鲁藏布江流域;枯水期;水化学特征;化学风化;CO₂ 消耗

中图分类号:X523 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on chemical weathering and consumption of CO₂ during dry season in the Yarlung Zangbo River basin

WANG Lei^{1,2}, WANG Zhaohan¹, YAO Zhijun⁴, HAN Yuping^{1,2,3}

(1. North China University of Water Recourse and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficiency Utilization and Support Engineering, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China;
4. Institute of Geoscience and Resources of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the surface runoff, spring water, groundwater, and precipitation samples obtained in the dry season from the main tributaries of Yarlung Zangbo River basin, the main ions, pH, TDS and CO₂ consumption were analyzed. The hydrochemical characteristics and causes were studied. The chemical weathering rate and CO₂ consumption flux in the basin were also analyzed. The results indicated that the basin water was mild alkaline as a whole. The mean TDS of surface runoff was approximately 2.3 times compared to the world's rivers. It was similar to the Yangtze River basin but far below the Yellow River basin. Rock weathering was the main factor affecting the ion source of surface runoff. Carbonate weathering, silicate weathering and evaporate weathering accounted for 46.3%, 28.6%, and 21.3% of the ion sources, respectively. The carbonate weathering rate and silicate rates were 1.43 t/(km²·a), and 1.11 t/(km²·a), the corresponding CO₂ consumption rates were 0.80×10⁵ mol/(km²·a) and 0.55×10⁵ mol/(km²·a), while the chemical weathering and CO₂ consumption rates were found lower in dry season.

Key words: The Yarlung Zangbo River basin; dry season; hydrochemical characteristics; chemical weathering; CO₂ consumption

收稿日期:2019-06-03 修回日期:2019-11-18 网络出版时间:2019-11-25
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191125.1341.004.html>
基金项目:国家自然科学基金(41807161;51679089)
作者简介:汪磊(1985—),男,安徽阜阳人,讲师,博士,主要从事水环境保护方面研究。E-mail:Wanglei2016@ncwu.edu.cn

河流作为陆海物质能量交换的重要通道在元素地球化学循环中起着重要作用,其水化学特征也反映了流域内岩石化学风化的强弱以及化学风化所消耗的 CO₂ 通量等重要信息^[1]。受全球气候变暖的影响,青藏高原冰川退缩明显^[2],冰川退缩变化及融水冲刷等导致该地区水循环加剧,化学风化速率、物质化学循环等都受到显著影响^[3-5]。

雅鲁藏布江是西藏境内最大的河流,年径流总量约1 395.4亿 m³,占西藏外流河川径流量的 42.4%,多年平均流量达4 425 m³/s,为黄河的 2.4 倍,仅次于长江、珠江,在全国河流中居第三位^[6]。早在中国科学院青藏高原综合科学考察队 1973—1976 年考察期间^[7],曾对雅鲁藏布江流域水质进行分析,首次揭开了雅鲁藏布江流域水化学特征的神秘面纱,但样品采集时间以雨季(6—9 月)为主;KAWASHIMA 等^[8]分析了 20 世纪 80 年代西藏地区的各种水体,发现雅鲁藏布江干流河水以及融雪水化学类型以 Ca-HCO₃ 为主(5—8 月);Huang 等^[9]对雅鲁藏布江流域雨季河水水质进行初步分析,发现 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 是优势离子,并且河水中溶解性重金属含量较小;Hren 等^[10]、Jiang 等^[11]研究了雅鲁藏布江羊村以上流域化学风化过程和 CO₂ 消耗,发现流域化学风化过程主要受碳酸盐和硅酸盐风化影响,并且不同季节化学风化过程和 CO₂ 消耗存在差异;Wu 等^[12]分析了青藏高原 10 条大河化学风化过程和对

大气 CO₂ 消耗通量,结果显示丰水季节化学风化和 CO₂ 消耗速率远远超过了枯水季节,表明青藏高原诸河化学风化过程和 CO₂ 消耗存在显著的季节性差异。

径流补给来源及气候的显著差异是影响季风区河流水文、水化学季节性特征的重要因素^[4],雅鲁藏布江流域枯水期大气降水较少,并且以降雪为主,径流补给来源与雨季差异显著,元素地球化学行为也与雨季不同。相对于我国其它水系,雅鲁藏布江流域水文、水化学科研基础较为薄弱^[13],特别是枯水期流域内各种水体的地球化学特征和化学风化过程鲜有报道。因此,研究该区域枯水期化学风化过程具有重要的意义。本文基于 2015 年 4 月份的地表径流、泉水、地下水以及大气降水样品,对雅鲁藏布江流域化学风化过程及 CO₂ 消耗进行分析研究。

1 研究区域与方法

1.1 样点布设及类型

根据流域的地质、地貌特征,并兼顾各支流汇入位置,径流样品采集均匀布设于雅鲁藏布江流域干流(Y_i 表示,干流源头为 Y₁,编号沿干流向下游递增)以及主要支流(图 1)。并在干支流的上游和下游采集地下水,以及地质变动区出露的泉水,同时还收集了采样期间的降水样品(雨、雪)。

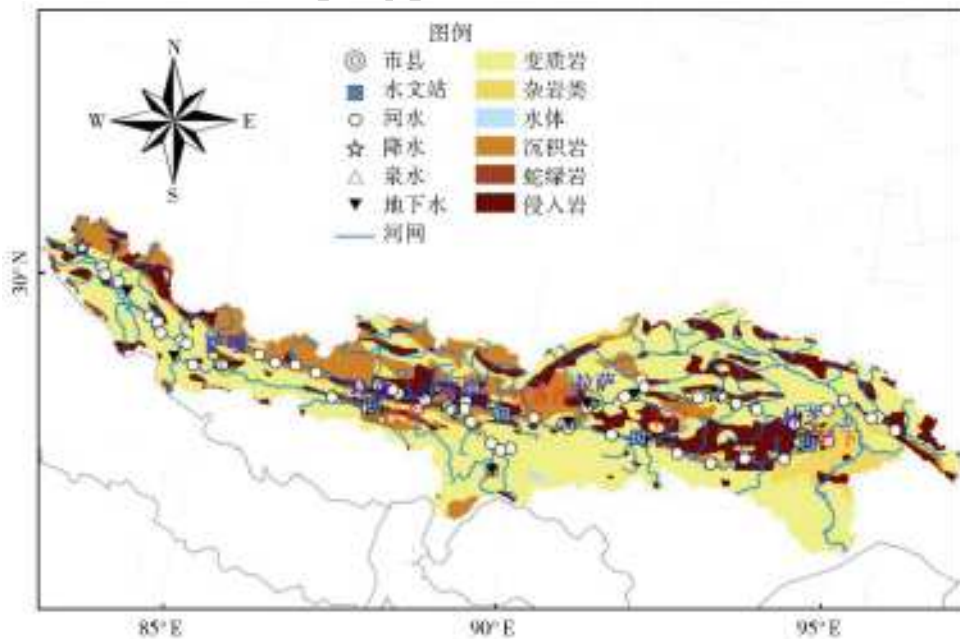


图 1 雅鲁藏布江流域及样点分布

Fig. 1 location map of the Yarlung Zangbo and the sampling sites

1.2 样品采集与分析

径流样品采用吊桶吊取,采样前先用河水润洗吊桶 2~3 次。样品瓶使用聚乙烯塑料瓶,取样前用

样点河水润洗 2~3 次,然后压入吊桶灌满,标记、密封后放入车载冰箱冷藏,带回实验室分析。地下水采自国家引水工程的深井水,井深一般在 30~80 m

范围内;温泉水在泉水出口采集刚流出的水样;降雪用 100 mL 样品瓶装满压实后密封、降雨使用采样桶放置于车顶收集。本次共收集河水 70 个、融雪 2 个、雨水 1 个、泉水 6 个、地下水 6 个,所有样品的采集过程严格按照相关采样规范进行,保证样品清洁无污染。

样品的温度、pH、电导率(EC)、氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)和总溶解固体(TDS)等使用便携式水质分析仪 Horiba U53 (HORIBA, Ltd, Japan)现场测定。碳酸氢根(HCO_3^-)采用酸碱双指示剂滴定法现场测定^[14]。样品的水化学指标在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析实验室分析测定,其中阳离子使用电感耦合等离子原子发射光谱仪(ICP-OES) Optima-5300DV (Perkin Elmer, USA)测定;阴离子使用离子色谱仪 ICS-2100 (Dionex, USA)测定。测定时,进行平行样校正,以确保分析结果与标样的误差小于 5%,保证测量数据

真实可靠。

2 结果与分析

4 月份是研究区枯水期末^[15-16],流域的中游以上地区降水仍以降雪为主,河源及上游地区的部分河段仍然在结冰或部分冰冻;下游地区处于春雨期,降水除了高山区以外,主要以降雨为主。

2.1 主要离子化学特征

2.1.1 主要离子化学特征

除干流、多雄藏布、年楚河、尼洋河的源头样点河道有冰(冰冻)外,其余的水温大都在 9~14 ℃;地下水温度比较稳定,在 10.5~12.7 ℃,温度较低的样点是上游的敞口井;地下水出露的温泉水温较高,在 40~55.8 ℃。流域水体总体呈现弱碱性,pH 值介于 7.38~10.10(表 1),平均值为 8.83;大气降水的 pH 平均值为 9.37,主要受枯水期大气溶胶中来自陆源的碱性土壤浮沉的影响^[17]。

表 1 雅鲁藏布江流域水化学组分

Tab. 1 Hydrochemical concentrations of Yarlung Zangbo

流域		EC	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS
干流	最大值	495	9.52	45.25	8.77	44.84	4.60	168.86	35.65	82.00	5.96	21.16	389.91
	最小值	187	7.62	22.25	4.11	4.95	1.09	65.59	0.51	4.14	0.29	6.80	147.36
	平均值	318	8.71	35.36	6.76	14.65	1.96	125.64	9.17	34.41	2.42	10.19	242.69
支流	最大值	528	10.10	57.10	14.48	67.78	6.13	213.74	83.58	121.66	4.33	44.30	395.29
	最小值	27	7.38	12.09	1.31	1.98	0.84	42.09	0.65	5.87	0.08	6.34	83.11
	平均值	270	8.89	30.16	5.93	11.11	1.88	98.11	9.55	37.50	1.92	10.28	207.34
降水	最大值	31	9.57	3.32	0.11	0.64	0.26	11.25	0.82	1.18	1.01	1.05	19.78
	最小值	12	9.14	0.64	0.03	0.12	0.03	1.11	0.46	0.65	0.58	0.13	5.08
	平均值	22	9.37	1.69	0.06	0.35	0.18	5.35	0.66	0.89	0.78	0.45	10.74
地下水	最大值	892	9.78	149.60	16.30	19.90	3.01	531.93	21.35	54.79	21.96	16.61	759.27
	最小值	165	8.25	19.85	2.00	3.21	0.11	72.26	4.21	9.47	1.87	10.77	144.33
	平均值	415	8.94	56.03	7.32	9.96	1.88	186.42	13.14	29.64	7.78	14.25	327.08
温泉	最大值	3 820	9.33	30.41	8.80	153.10	13.32	1 248.11	94.95	76.07	5.76	65.30	1 448.33
	最小值	549	7.56	1.22	0.03	24.01	2.20	281.64	4.02	2.41	0.42	6.60	489.97
	平均值	2 180	8.54	16.57	3.05	85.56	6.49	644.37	36.92	36.78	3.09	34.46	872.88
长江 ^[18]	平均值	—	8.03	17.15	4.01	10.39	2.15	115.75	9.89	14.79	—	5.97	225.00
黄河 ^[19]	平均值	528	8.01	25.70	11.36	51.70	2.88	196.91	52.66	48.14	7.08	9.82	513.85
世界河流 ^[20]	平均值	—	—	13.40	3.30	5.20	1.30	51.80	5.80	8.40	—	—	99.00

注:支流为多雄藏布、年楚河、拉萨河、尼洋河、帕隆藏布五大支流;EC 的单位是 $\mu\text{s}/\text{cm}$;离子及 TDS 的单位是 mg/L ;"—"表示未检测。

径流水体样品 TDSR 质量浓度值在 83.11~395.29 mg/L ,均值为 224.01 mg/L ,约为世界河流均值的 2.3 倍(表 1),与同样发源于青藏高原的长江流域相似,但远低于黄河流域,不足其 1/2。地下水和泉水的 TDS 值较大,平均值分别为 327.08 mg/L 和 872.88 mg/L 。降水的 TDS 较小。

HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 是河水中阴离子组分的优势离子,当量百分数分别为 64% 和 26%。 HCO_3^- 质量浓度大于世界河流均值,小于黄河流域,与长江流域接近。 SO_4^{2-} 大于世界河流均值和长江流域,略小于黄河流域; Cl^- 略大于长江流域,远小于黄河流域。除个别样点外,径流水体中 NO_3^- 很小。阳离

子质量浓度比例与长江流域、世界河流均值相似。除温泉水外,阳离子中 Ca²⁺ 质量浓度值最大,河水中 Ca²⁺ 当量百分数约为 59%。

雅鲁藏布江流域各个支流中,年楚河流域的阴离子总量(232.50 mg/L)最大,其次是多雄藏布流域,拉萨河流域,帕隆藏布流域,最小的是尼洋河流域(92 mg/L) (图 2)。受汇入支流离子总量的影

响,干流从上游到下游阴离子呈现递减的趋势,阴离子总量分别为 183.29,170.52 和 117.79 mg/L。阴离子组分中,HCO₃⁻ 占的比重最大,其次是 SO₄²⁻。上游 HCO₃⁻ 的比重最大,为 76%,支流中最大的是年楚河,为 71%,各支流中 HCO₃⁻ 的比重差异不大。流域水体中 NO₃⁻ 质量浓度很小,在不同区域水体中略有差异。

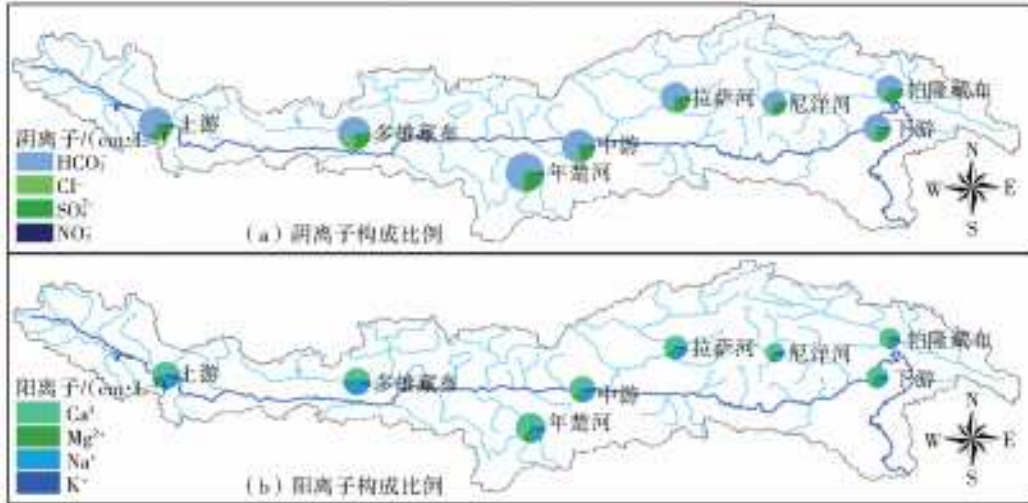


图 2 雅鲁藏布江流域离子构成比例

Fig. 2 Ion composition ratio diagram of Yarlung Zangbo

与阴离子总量一样,阳离子总量也是年楚河最大,为 76.77 mg/L,最小的尼洋河仅为 29.89 mg/L。干流从上游到下游亦呈递减的趋势。Ca²⁺ 在阳离子组分中占的比重最大,其中离子质量浓度最大的是年楚河(50.58 mg/L),但 Ca²⁺ 在阳离子组分中的比例却大相径庭,最大的则是流域下游的帕隆藏布(73%)。Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 具有很好的一致性。Mg²⁺ 离子质量浓度最高的是年楚河,除多雄藏布小于 10% 外,其余都在 11%~15% 范围内。除帕隆藏布外,Na⁺ 在阳离子组分中仅次于 Ca²⁺,最大的是多雄藏

布(25.38 mg/L)。K⁺ 在河水中质量浓度较小,占阳离子组分比例不大,在流域各段差异不明显。

2.1.2 干流水化学空间特征

源头样点采集时,河道里处于冰封或半冰封状态,积雪刚开始融化,受“离子脉冲”以及融雪水与碎屑岩石的相互作用^[21-23],Y₁ 至 Y₄ 离子浓度远高于其他样点(图 3)。同样受到融雪影响的还有 Y₆(柴曲)和 Y₁₁(加塔藏布)(图 3)。

上游及中游前段属于干旱区,枯水季节气温较低,大气降水以降雪为主,并且沿途没有大的支流汇

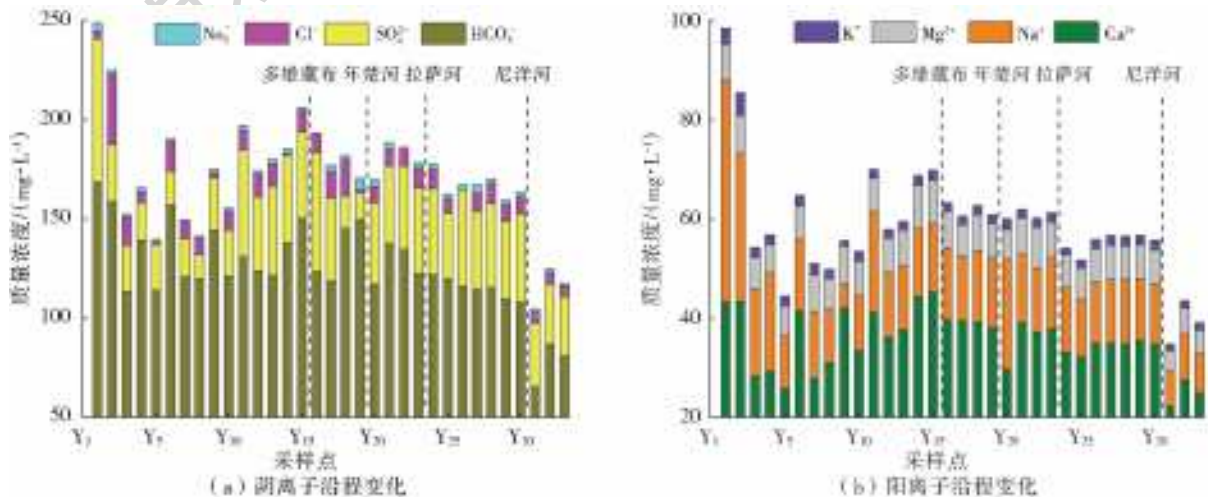


图 3 雅鲁藏布江干流离子沿程变化

Fig. 3 Spatial variation of ion in main stream of Yarlung Zangbo

入,径流补给以地下水为主,地下水 Ca^{2+} 的平均质量浓度 (56.03 mg/L) 大于河水的平均质量浓度 (35.36 mg/L) (表 1),而地下水 Na^+ 的平均质量浓度 (9.96 mg/L) 小于河水的平均质量浓度 (14.65 mg/L),导致 Na^+ 占阳离子的比例逐渐减少 (图 3)。从样点 Y_5 (除 Y_6 、 Y_{11}) 开始至 Y_{15} ,阳离子质量浓度增大,上升最明显的为 Ca^{2+} ,而 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 变化不大。 Y_{15} 以后,阳离子质量浓度总量呈下降趋势,以 Ca^{2+} 的减少为主,其次是 Na^+ 的减少。中游后段开始,流域由干旱区向半干旱区转化,到下游的湿润区,并且先后有多雄藏布、年楚河、拉萨河、尼洋河等大的支流汇入,而支流水体的离子质量浓度小于干流(表 1)。其中 Y_{20} Na^+ 质量浓度较大,主要受香曲汇入影响。

自多雄藏布和年楚河汇入后,阴离子质量浓度总量开始下降(图 3), HCO_3^- 质量浓度呈线性减少, SO_4^{2-} 质量浓度波动变化, Cl^- 与 NO_3^- 质量浓度较小,减少不明显。多雄藏布和年楚河的 SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 平均质量浓度分别为 47.20 mg/L 和 122.07 mg/L,而干流的是 34.41 mg/L 和 125.64 mg/L,

导致 SO_4^{2-} 质量浓度急剧上升和 HCO_3^- 质量浓度的减少。随着径流的充分混合、稀释以及与地下水的交换作用,支流汇入对干流水离子组分的扰动逐渐变小。

2.2 影响离子组成的因素分析

河水中离子来源主要有大气输送、岩石风化以及人类活动输入,通过分析离子构成及组分比例,可以了解水体主要组分来源的信息^[24]。

2.2.1 岩石风化作用的影响

Piper 图不仅能反映河水化学组分构成,而且还能区分河水中不同风化类型的物质来源^[25]。Piper 图中,菱形图与三角图相得益彰,在河流水化学的研究中得到了广泛应用^[26-28]。Spence(2005)在 Piper 图的基础上根据碳酸作用和硫酸作用的不同侵蚀特征,给出了不同岩石类型的典型风化端元。在阳离子三角图中(图 4),阳离子主要集中在右下角 Ca^{2+} 端,以及在 Ca^{2+} 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 连线上,说明 Ca^{2+} 是阳离子中的主要组成部分,反映了碳酸盐岩风化对雅鲁藏布江流域水化学的控制以及对干流水化学组分的贡献差异。

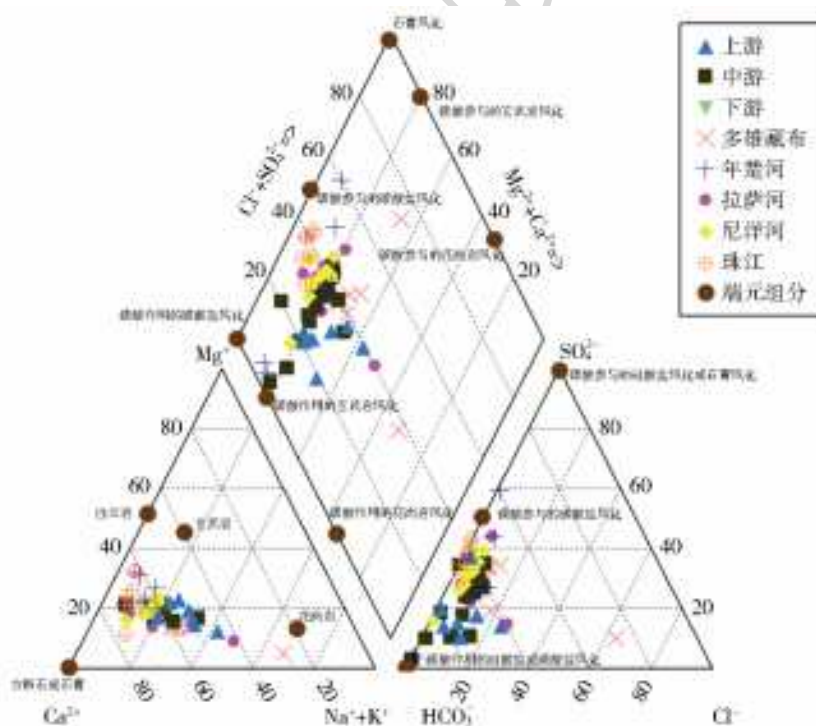


图 4 雅鲁藏布江流域河水 Piper 图
Fig. 4 Piper diagram of Yarlung Zangbo

在阴离子三角图中,样点主要分布在碳酸作用的硅酸盐风化或碳酸盐风化与硫酸参与的碳酸盐风化端元间;菱形图中,碳酸作用的碳酸盐风化与硫酸参与的碳酸盐风化端元间容纳了绝大多数样点,少量样点靠近碳酸作用玄武岩风化。由于雅鲁藏布江流域主要分布蛇绿岩复理石带与喜马拉雅山期花岗

岩类,说明该流域地表径流主要受方解石与花岗岩风化控制,碳酸作用与硫酸作用共同主导雅鲁藏布江流域河水的离子来源。

2.2.2 大气降水的影响

大气降水是雅鲁藏布江流域补给来源之一,但枯水期大气降水对地表径流的贡献较小,在此仅

作估算。以大气降水中 Cl⁻ 最大输入浓度为参考值 [C_{Cl}]_{ref}, 根据降水量与蒸发量的差值, 将大气降水中的离子浓度转化为其在地表径流中存在浓度^[29-30]。

$$[C_{Cl}]_{ref} = F \times (Cl^-)_{rw} \quad (1)$$

式中: (Cl⁻)_{rw} 是大气降水中 Cl⁻ 的浓度; $F = P / (P - E)$, 其中 P 为流域年均降水量, E 为年均陆面蒸发量。

根据 1971—2014 年的逐月降水数据, 雅鲁藏布江流域多年平均降水量为 494.6 mm, 陆面蒸发量^[31] 为 200 mm。流域大气降水中 Cl⁻ 的浓度是 20.08 μmol/L, 由公式(1)可得大气降水中 Cl⁻ 最大输送浓度为 33.71 μmol/L。采用海盐校正法, 由海水中各离子与 Cl⁻ 浓度之比 $X / (Cl^-)_{rw}$, 得到各离子的大气降水输入值 X_a ^[30]:

$$X_a = [C_{Cl}]_{ref} / [X / (Cl^-)_{rw}] \quad (2)$$

表 2 大气降水输入离子浓度

Tab. 2 The ionic concentration of atmospheric precipitation

离子比值	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻
与 Cl 值(海水)	0.86	0.02	0.04	0.21	0.11
大气输入值/(μmol · L ⁻¹)	28.99	0.67	1.35	7.08	3.71

根据表 2, 大气降水对雅鲁藏布江流域枯水期地表径流中 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 的浓度贡献值分别占地表径流的 5.2%、1.4%、0.2%、2.7% 和 1.0%。因此, 枯水期大气降水对河水离子浓度的贡献很小。

2.3 枯水期风化速率与 CO₂ 的消耗

2.3.1 地表径流主要离子来源

河水中任一种元素 X 的总量^[32] 可表示为

$$[X]_{river} = X_{cyclic} + X_{evaporite} + X_{carbonate} + X_{silicate} + X_{anthropogenic} \quad (3)$$

式中: [X]_{river} 为河水中离子总量; X_{cyclic} 为降水贡献离子量; $X_{evaporite}$ 为蒸发岩贡献离子量; $X_{carbonate}$ 为碳酸盐岩贡献离子量; $X_{silicate}$ 为硅酸盐贡献离子量; $X_{anthropogenic}$ 为人类活动贡献离子量。

除了大气降水输入贡献很少, 流域中人类活动也较小^[10-11]。枯水期大部分流域都处于冰雪覆盖之下, 没有农业生产活动, 并且表示人类活动输出的指标 NO₃⁻ 占阴离子总量较小, 表明人类活动输入有限, 可以忽略。

蒸发岩风化包括主要由海盐 (NaCl) 风化来源的 Na⁺、Cl⁻ (源于海盐风化的 Na⁺ 和 Cl⁻ 之比为 1:1) 和石膏 (CaSO₄) 溶解产生的 Ca⁺、SO₄²⁻ (源于

石膏溶解的 Ca⁺ 和 SO₄²⁻ 之比为 1:1)。除了降水输入, Cl⁻ 主要来源于海盐风化, 而 SO₄²⁻ 除了石膏溶解外, 还有可能是黄铁矿的氧化产生。根据 Piper 图分析和离子浓度比值, 得出石膏溶解和黄铁矿氧化各占一半。蒸发岩风化离子来源如下。

$$Cl_{eva} = Cl_{river} - Cl_{cyclic} = Na_{eva} \quad (4)$$

$$SO_{4eva} = 0.5(SO_{4river} - SO_{4cyclic}) = Ca_{eva} \quad (5)$$

$$\frac{TZ_{eva}^+}{TZ^+} = \frac{(Cl_{eva} + 2 \times SO_{4eva})}{(Na_{river} + K_{river} + 2 \times Ca_{river} + 2 \times Mg_{river})} \quad (6)$$

式中: Cl_{eva} 、 SO_{4eva} 、 Na_{eva} 、 Ca_{eva} 为蒸发岩风化贡献的各离子量; SO_{4river} 、 Mg_{river} 、 Cl_{river} 为河流中的各元素含量; $SO_{4cyclic}$ 、 Cl_{cyclic} 为降水中的各元素含量。TZ_{eva}⁺ 为蒸发岩风化贡献的正电荷; TZ⁺ 为总正电荷量。

硅酸盐风化主要由铝硅酸盐 (钠长石、钾长石) 风化的 Na⁺、K⁺ 和钙镁硅酸盐风化的 Ca²⁺、Mg²⁺。除了降水输入和蒸发岩风化, 剩余的 Na⁺ 主要是硅酸盐岩风化产生的, 而 K⁺ 主要来源于硅酸盐风化和大气降水。

$$Na_{sil} = Na_{river} - Na_{cyclic} - Na_{eva} \quad (7)$$

$$K_{sil} = K_{river} - K_{cyclic} \quad (8)$$

$$\frac{TZ_{sil}^+}{TZ^+} = \frac{(Na_{sil} + K_{sil} + 2 \times Ca_{sil} + 2 \times Mg_{sil})}{(Na_{river} + K_{river} + 2 \times Ca_{river} + 2 \times Mg_{river})} \quad (9)$$

式中: TZ_{sil}⁺ 为硅酸盐岩风化贡献的正电荷; TZ⁺ 为总正电荷量; Na_{sil} 、 K_{sil} 、 Ca_{sil} 、 Mg_{sil} 为硅酸盐岩风化贡献的各离子量; Na_{river} 、 K_{river} 、 Ca_{river} 、 Mg_{river} 为河流中各离子浓度。

硅酸盐风化的 Ca⁺、Mg⁺ 表达式^[12] 为

$$Ca_{sil} = (Ca/Na)_{sil} \times Na_{sil} \quad (10)$$

$$Mg_{sil} = (Mg/Na)_{sil} \times Na_{sil} \quad (11)$$

河水中硅酸盐岩风化输出的 Ca²⁺ 通常是在钙长石风化成高岭石时产生的, 理想情况下, 应该用流域内所有样点的钙长石化学成分数据来计算 Ca/Na 的比值, 然后得到硅酸盐岩风化输出的 Ca²⁺ 贡献值。然而, 极少有流域尺度上钙长石化学成分中 Ca/Na (Mg/Na) 比值数据^[33-34], 通常采用河床沙或少数样点相似成分的岩石数据^[12]。由于本研究没有检测流域内钙镁硅酸盐岩石中 Ca/Na 和 Mg/Na 的比值, 参考以前研究结果^[11], 分别取值 0.55 和 0.3。

地表径流中剩余的 Ca²⁺/Mg²⁺ 全部为碳酸盐风化产生, 则有

$$Ca_{car} = Ca_{river} - Ca_{cyclic} - Ca_{eva} - Ca_{sil} \quad (12)$$

$$Mg_{car} = Mg_{river} - Mg_{cyclic} - Mg_{sil} \quad (13)$$

$$\frac{TZ_{car}^+}{TZ^+} = \frac{2 \times (Ca_{river} - Ca_{cyclic} - Ca_{eva} - Ca_{sil}) + 2 \times (Mg_{river} - Mg_{cyclic} - Mg_{sil})}{(Na_{river} + K_{river} + 2 \times Ca_{river} + 2 \times Mg_{river})} \quad (14)$$

式中:Ca_{car}、Mg_{car}为碳酸盐岩贡献的各离子量;TZ⁺为碳酸盐岩贡献的正电荷量;TZ⁺总正电荷量(其他符号含义与上文相同)。

枯水期流域地表径流中离子来源主要以碳酸盐风化为主,占 46.3%,硅酸盐风化和蒸发盐风化分别为 28.6%和 21.3%,大气降水贡献较小,仅占 3.8%。干流及子流域(图 5)也是以碳酸盐和硅酸盐风化为主,比例略有差异。

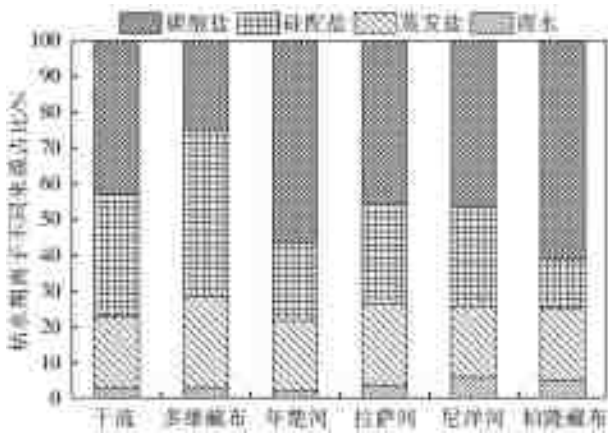


图 5 离子不同来源比例

Fig. 5 Proportion of different ions in Yarlung Zangbo

2.3.2 风化速率与 CO₂ 的消耗

硅酸盐风化速率(SWR)和碳酸盐风化速率

(CWR)常用来表示地表径流对流域的化学侵蚀率^[12]

$$SWR = \frac{(Na_{sil} + K_{sil} + Ca_{sil} + Mg_{sil}) \times Q}{F} \quad (15)$$

$$CWR = \frac{(Ca_{car} + Mg_{car}) \times Q}{F} \quad (16)$$

式中:Na_{sil}、K_{sil}、Ca_{sil}、Mg_{sil}分别表示硅酸盐岩贡献的各离子量;Ca_{car}、Mg_{car}分别表示碳酸盐岩贡献的各离子量;Q为流量;F为流域面积。

硅酸盐风化和碳酸盐风化 CO₂ 消耗速率为

$$\Phi[CO_2]_{sil} = \Phi[TZ^+]_{sil} = \frac{(Na_{sil} + K_{sil} + 2Ca_{sil} + 2Mg_{sil}) \times Q}{F} \quad (17)$$

$$\Phi[CO_2]_{car} = \Phi[TZ^+]_{car} = \frac{2(Ca_{car} + Mg_{car}) \times Q}{F} \quad (18)$$

式中:Φ[CO₂]_{sil}、Φ[CO₂]_{car}为硅酸盐岩和碳酸盐岩风化 CO₂ 消耗通量;Φ[TZ⁺]_{sil}、Φ[TZ⁺]_{car}为硅酸盐岩风化和碳酸盐风化的阳离子通量,Q、F 意义同上。

根据枯水期流域多年平均流量和本次监测数据,得到枯水期的 CWR 和 SWR 分别为 1.43 t/(km²·a)和 1.11 t/(km²·a),对应的 CO₂ 消耗速率分别为 0.80×10⁵ mol/(km²·a)和 0.55×10⁵ mol/(km²·a) (表 3)。

表 3 枯水期风化速率和 CO₂ 消耗

Tab. 3 Chemical weathering rates and CO₂ consumption fluxes

流域	SWR/ (t·km ² ·a ⁻¹)	Φ _{CO₂, sil} / (10 ⁵ mol·km ² ·a ⁻¹)	CWR/ (t·km ² ·a ⁻¹)	Φ _{CO₂, carb} / (10 ⁵ mol·km ² ·a ⁻¹)
雅鲁藏布江	1.11	0.55	1.43	0.80
雅鲁藏布江(羊村) ^[11]	3.43	1.70	4.49	2.54
黄河 ^[12]	3	0.90	22	2.30
长江 ^[18]	—	3.81	—	0.72
印度河 ^[35]	3.80	0.60	7.20	0.60

和丰水期^[11]相比,枯水期流域化学风化速率与 CO₂ 的消耗较小,其中硅酸盐和碳酸盐风化速率约为丰水期的 1/3 左右(表 3)。枯水期雅鲁藏布江流域化学风化速率也远低于同样发源于青藏高原的长江、黄河和印度河流域的枯水期化学风化速率。

3 讨论

根据雅鲁藏布江流域 1951—2000 年气候数据月平均值的 30 秒栅格数据(http://www.worldclim.org/current),将数据叠加求和得到 30 秒栅格尺度的多年平均气温数据可知,枯水季节流域大部分地区平均气温都在零下,仅下游“大转弯”至河口处气温大于 10℃(由于道路塌方被阻未能进入收集

样品),受低温影响,融水产生较少。大气降水在枯水季节相对较少,并且主要以降雪形式为主,不能直接补给地表径流。

河流的化学风化过程受多种因素的影响。雅鲁藏布江流域枯水期平均气温较低,冰雪融水量较小,融水与碎屑岩石的相互作用减弱,而且大气降水以降雪为主,汇流过程中对下垫面的冲刷等因素作用较小。丰水期气温较高,降水集中,融水和降水冲刷等因素作用强烈,物质化学循环远大于枯水期。根据多年实测径流资料分析,枯水期径流量仅占 10%,河流的剥蚀作用也比丰水期较小。因此,枯水期流域化学风化速率与 CO₂ 的消耗通量和丰水期差异明显。

4 结 论

本文基于枯水期的地表径流、地下水以及大气降水样品的监测资料,对雅鲁藏布江流域水体化学特征及成因进行深入研究,得到以下主要结论。

(1) 干流离子质量浓度出现一个先升后降的空间变化,主要受沿程径流补给来源的影响。主要支流的汇入对干流离子质量浓度有一定的“稀释作用”,其中尼洋河对流域的作用最为明显。

(2) 地表径流离子组成主要受岩石风化作用的控制,结合流域地质背景数据进一步分析,主要受方解石与花岗岩风化过程影响。

(3) 枯水期大气降水对地表径流中 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 的质量浓度贡献值分别占地表径流的 5.2%、1.4%、0.2%、2.7% 和 1.0%,比例较小。

(4) 枯水期碳酸盐风化贡献离子来源的 46.3%,硅酸盐风化和蒸发盐风化分别占 28.6% 和 21.3%;碳酸盐风化速率和硅酸盐风化速率分别为 1.43 t/(km²·a) 和 1.11 t/(km²·a),对应的 CO₂ 消耗速率分别为 0.80×10⁵ mol/(km²·a) 和 0.55×10⁵ mol/(km²·a)。

参考文献(References):

- [1] GAILLARDET J, DUPRÉB, LOUVAT P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1): 3-30.
- [2] WANG L P, XIE Z C, WANG X, et al. The glacier area changes in the Qangtang Plateau based on the multi-temporal grid method and its sensitivity to climate change[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(6): 882-893.
- [3] KUMAR K, MIRAL M S, JOSHI S, et al. Solute dynamics of meltwater of Gangotri glacier, Garhwal Himalaya, India[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(6): 1151-1159.
- [4] SINGH V B, RAMANATHAN A L, POTTAKKAL J G, et al. Seasonal variation of the solute and suspended sediment load in Gangotri glacier meltwater, Central Himalaya, India[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014(79): 224-234.
- [5] SINGH V, RAMANATHAN A L, SHARMA P, et al. Dissolved ion chemistry and suspended sediment characteristics of meltwater draining from Chhota Shigri Glacier, Western Himalaya, India[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 1(8): 281-293.
- [6] 关志华, 陈传友. 西藏河流水资源[J]. *资源科学*, 1980(2): 25-35. (GUAN Z H, CHEN C Y. Water resource in Tibet[J]. *Resources Science*, 1980(2): 25-35. (in Chinese))
- [7] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏水利[M]. 北京: 科学出版社, 1981. (Science Researches in the Comprehensive Scientific Surveys of Qinghai-Tibet Plateau Team. Tibet Water[M]. Science Press, 1981. (in Chinese))
- [8] KAWASHIMA M, NISHIYAMA T. Salt concentrations and chemical types of lake, river, snow and hot spring waters from the Tibetan Plateau [J]. *Rikusuigaku Zasshi*, 1989, 50(2): 93-104.
- [9] HUANG X, SILLANPÄÄ M, GJESSING E T, et al. Water quality in the southern Tibetan Plateau: chemical evaluation of the Yarlung Tsangpo (Brahmaputra)[J]. *River Research and Applications*, 2011, 27(1): 113-121.
- [10] HREN M T, CHAMBERLAIN C P, HILLEY G E, et al. Major ion chemistry of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River: Chemical weathering, erosion, and CO₂ consumption in the southern Tibetan Plateau and eastern syntaxis of the Himalaya[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(12): 2907-2935.
- [11] JIANG L G, YAO Z J, WANG R, et al. Hydrochemistry of the middle and upper reaches of the Yarlung Tsangpo River system: weathering processes and CO₂ consumption[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015: 1-11.
- [12] WU W H, XU S, YANG J, et al. Silicate weathering and CO₂ consumption deduced from the seven Chinese rivers originating in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chemical Geology*, 2008, 249(3): 307-320.
- [13] 沈大军, 陈传友. 青藏高原水资源及其开发利用[J]. *自然资源学报*, 1996, 11(1): 8-14. (SHEN DA J, CHEN C Y. Water resources of the Qingzang Plateau and its exploitation[J]. *Journal of Natural Resources*, 1996, 11(1): 8-14. (in Chinese))
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4 版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. (Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Methods for chemical analysis of water and wasted water, 4th ed[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese))
- [15] 刘剑 姚治君 陈传友. 雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(3): 471-477. (LIU J, YAO Z J, CHEN C Y. Evolution trend and causation analysis of the runoff evolution in the Yarlung Zangbo River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(3): 471-477. (in Chinese))
- [16] 杨志刚, 卓玛, 路红亚, 等. 1961—2010 年西藏雅鲁藏布江流域降水量变化特征及其对径流的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 166-172. (YANG Z G,

- ZHUO M, LU H Y, et al. Characteristics of precipitation variation and its effects on runoff in the Yarlung Zangbo River basin during 1961-2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 166-172. (in Chinese)
- [17] ZHANG D, PEART M, JIM C Y, et al. Precipitation chemistry of Lhasa and other remote towns, Tibet[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(2): 231-240.
- [18] CHETELAT B, LIU C Q, ZHAO Z Q, et al. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers; anthropogenic impacts and chemical weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(17): 4254-4277.
- [19] FAN B L, ZHAO Z Q, TAO F X, et al. Characteristics of carbonate, evaporate and silicate weathering in Huanghe River basin: A comparison among the upstream, midstream and downstream[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014(96): 17-26.
- [20] MEYBECK M. Global occurrence of major elements in rivers[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003(5): 207-223.
- [21] 刘风景. 天山乌鲁木齐河融雪径流的“离子脉冲”现象初探[J]. *科学通报*, 1997, 42(4): 417-419. (LIU F J. Preliminary investigation on the "ionic pulse" of snowmelt runoff at the headwater of Rumqi River, Tianshan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42: 417-419. (in Chinese))
- [22] JOHANNESSEN M, HENRIKSEN A. Chemistry of snow meltwater; Changes in concentration during melting[J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(4): 615-619.
- [23] BALES R C, DAVIS R E, WILLIAMS M W. Tracer release in melting snow; Diurnal and seasonal patterns[J]. *Hydrological Processes*, 1993, 7(4): 389-401.
- [24] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water Chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [25] PIPER A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, 25(6): 914-928.
- [26] WANG P, YU J J, ZHANG Y C, et al. Groundwater recharge and hydro-geochemical evolution in the Ejina basin, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013(476): 72-86.
- [27] MOSTAFAEI A. Application of multivariate statistical methods and water-quality index to evaluation of water quality in the Kashkan River[J]. *Environmental management*, 2014, 53(4): 865-881.
- [28] SPENCE J, TELMER K. The role of sulfur in chemical weathering and atmospheric CO₂ fluxes; evidence from major ions, $\delta^{13}\text{C DIC}$, and $\delta^{34}\text{S SO}_4$ in rivers of the Canadian Cordillera[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(23): 5441-5458.
- [29] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 玉龙雪山周边典型河流雨季水化学特征分析[J]. *地理科学*, 2011, 31(6): 734-740. (PU T, HE Y Q, ZHU G F, et al. Hydrochemical characteristics of three rivers around Yulong mountain in rainy season[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(6): 734-740. (in Chinese))
- [30] GROSOBOIS C, NÉGREL P, GRIMAUD D, et al. An overview of dissolved and suspended matter fluxes in the Loire River basin; Natural and anthropogenic inputs[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2001, 7(2): 81-105.
- [31] 贾建伟, 吕孙云, 王政祥. 雅鲁藏布江流域水资源量特性分析[J]. *人民长江*, 2008, 39(17): 71-72. (JIA J W, LV S Y, WANG Z X. Analysis on the water resource of the Yarlung Zangbo River [J]. *Yangtze River*, 2008, 39(17): 71-72. (in Chinese))
- [32] GALY A, FRANCE-LANORD C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1): 31-60.
- [33] MOON S, HU H Y, QIN J, et al. Chemical weathering in the Hong (Red) River basin; rates of silicate weathering and their controlling factors[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(6): 1411-1430.
- [34] NOH H, HU H 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.
- [35] GALY A, FRANCE-LANORD C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1): 31-60.

• 科普知识 •

什么是“海绵城市”?

海绵城市是指城市能够像海绵一样,在适应环境变化和应对雨水带来的自然灾害等方面具有良好的“弹性”,也可称之为“水弹性城市”。下雨时吸水、蓄水、渗水、净水,需要时将蓄存的水释放并加以利用。