

基于水化学及径流组成的中国西北 内陆河流域水资源风险评估

王诗语^{1,2}, 孙从建^{1,2}, 陈 伟^{1,2}, 张 鑫^{1,2}, 周思捷^{1,2}

(1. 山西师范大学地理科学学院, 太原 030031; 2. 山西师范大学黄河中游生态环境研究中心, 太原 030031)

摘要: 水资源作为西北内陆区重要的战略性资源, 关系着区域经济社会可持续发展。内陆河作为区域重要的水资源组成部分对全球气候变化响应显著。本文选取祁连山、天山、昆仑山地区典型的内陆河流域, 基于长期径流监测, 以及降水、融水、河水、地下水等多水体水化学、同位素分析数据, 分析了区域径流组成特征及其与主要环境要素的相互关系, 评估了其水资源风险。结果表明: ① 除石羊河外, 20世纪70年代以来研究区大部分河流的年径流量呈现上升趋势; ② 研究区各水体大部分为碱性, 各水体主导阴阳离子为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 和 Na^+ , 水化学类型多为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型, 且受岩石风化控制影响大; 河水TDS呈现相似的季节变化趋势(夏秋低冬春高), 而各离子的季节差异显著; ③ 除呼图壁河外, 区域河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出夏秋低冬春高的季节变化特征; ④ 研究区地下水、降水和冰川/雪融水对区域径流的年平均贡献分别为42.6%、34.4%和23.0%, 区域径流组成存在空间异质性; ⑤ 气温变化会增加阿克苏河、和田河和石羊河发生径流变化的风险, 而降水波动可能对提孜那甫河流域和疏勒河流域的径流过程构成潜在的风险, 和田河存在潜在水质风险。本文研究结果对于区域水资源可持续利用具有重要意义。

关键词: 内陆河流域; 水化学; 稳定同位素; 径流组分; 西北内陆河流域

DOI: 10.11821/dlxb202311008

1 引言

水资源是中国西北内陆地区重要的保障性自然资源及战略性经济资源, 是制约经济社会发展、生态环境建设的最关键因素, 其对维系该区域脆弱的生态平衡具有重要意义^[1]。内陆河作为区域水资源的重要组成部分, 对气候变化响应显著^[2]。20世纪70年代以来, 区域气温升高、降水波动变化加剧、蒸散发能力提高, 内陆河流域水循环日益复杂化, 区域水资源格局发生变化, 这严重威胁了区域水安全^[3]。

西北内陆河流域径流主要由冰雪融水、高山降水以及基岩裂隙地下水补给^[4]。在气候变化影响下, 区域水文过程变化显著, 径流量、径流组分特征日益复杂化^[5]。20世纪70年代以来, 该地区变暖趋势显著, 气温上升速率接近全球平均增温速率($0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)的3倍^[6]; 而降水则以 0.89 mm/a 的速度显著减少^[6-7]; 受此影响, 该区域冰川消融速率加快, 祁连山冰川面积和冰储量分别减少20.88%和20.26%^[1, 8], 而天山山区约有97.52%的冰川表现出退缩状态^[1, 9]。径流过程也发生显著变化, 除石羊河流域外, 区域总体呈现出径流增加的趋势, 径流的季节波动加剧^[10], 这给区域水资源安全带来严重挑战^[11]。此外, 区

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-11-06

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0101) [Foundation: The Third Xinjiang Scientific Expedition Program, No.2022xjkk0101]

作者简介: 王诗语(1999-), 女, 硕士生, 主要研究方向为地表水地下水转化。E-mail: wangshiyuzuibang@sina.com

通讯作者: 孙从建(1986-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事同位素水文学研究。E-mail: suncongjian@sina.com

2763-2780 页

域水化学特征和径流组分变化也给区域水资源安全带来巨大挑战^[1-3, 6, 12]。塔里木盆地西南部内陆河径流组分的季节波动会导致水资源管理难度增加,降水的波动对区域水资源的可持续利用具有重要影响^[12];阿克苏河流域冰川消融是目前水资源管理面临的重要挑战^[13];乌鲁木齐河水化学特征及径流组成的稳定性对下游城镇和农业发展具有重要意义^[14];河西走廊内陆河流域绿洲生态的稳定性被证明与其水化学特征具有密切关系^[4]。

维持区域生态环境可持续发展,迫切需要系统深入的探讨中国西北内陆河水化学特征及径流组分特征。而以往研究主要针对于气候变化下径流过程的响应评估^[10-11],对于气候变化下内陆河水化学特征及其径流组成特征的研究还有待进一步深入。尽管有部分研究者针对于塔里木盆地^[15-16]、河西走廊^[4, 17]、新疆北部^[17-21]的河流径流组成特征进行了探讨,亦有学者针对气候变化导致的水质风险提出了灌溉性适宜性评估体系^[22],但基于大尺度的综合分析还有待进一步加强。如何解析气候变化背景下大尺度的内陆河水化学、同位素变化规律及其径流组分特征已成为区域水循环研究及水资源高效利用等亟待解决的关键问题。

基于此,本文选取祁连山、天山、昆仑山地区典型的西北内陆河流域,基于长期野外径流监测,以及降水、融水、河水、地下水样品的搜集与测试,利用同位素分割模型,并结合环境要素变化特征,进一步分析:① 探讨中国西北内陆河流域不同水体的水化学、稳定同位素时空变化规律;② 解析研究区不同内陆河的径流组分特征;③ 探讨气候变化下不同内陆河径流变化的风险特征,提出针对于不同类型河流的水安全对策。研究结果对于提高区域水文过程的认识以及区域水资源的有效管理和合理利用具有重要意义,并为内陆河径流对气候变化的敏感性分析提供理论支撑。

2 研究区概况

西北内陆河流域具有山、盆相间的地貌格局,山区冰川广布,是中国西北绿洲农业和区域城镇的主要分布区^[4],该区属于典型的大陆性气候,干旱少雨,降水稀少且多集中于山区,其年平均降水量小于 200 mm,年平均温度约为 8 °C^[1, 3]。其流域径流补给主要来源于高山积雪和冰川融水、中山森林降水和低山基岩裂隙水^[4]。区域内覆被类型主要以荒漠、草甸和针叶林为主^[7](图 1)。综合考虑内陆河流量大小及对下游水资源的供给能力,本文选取天山山区(博尔塔拉河、乌鲁木齐河、伊犁喀什河、开都河、阿克苏河、呼图壁河)、祁连山区(疏勒河、黑河和石羊河)以及昆仑山区(叶尔羌河、提孜那甫河、和田河)等典型的内陆河流域作为研究对象,进一步解析气候变化背景下西北内陆河流域水化学及径流组成特征。其中天山区年降水量可达 400~500 mm,流域年平均气温约为 4 °C^[15]。祁连山地区年平均气温在 -5~4 °C 之间,年平均总降水量在 200 mm 左右,在较高海拔地区约为 600~700 mm 左右^[17],区域冰川和冻土消融严重。昆仑山区属于典型的大陆性暖温带气候,多年年均气温 11.9 °C,年均降水量 186.9 mm,高山地区终年积雪、冰川广布,大量冰雪融水和大气降水是本区地表水的补给源^[4, 23]。

3 材料与方法

3.1 样品的采集

本文数据主要包括流量数据、水化学数据、多水体同位素数据 3 种。其中河水的水化学、稳定同位素数据采集自研究河流出口水文站中流动的自然水面;降水以次降水

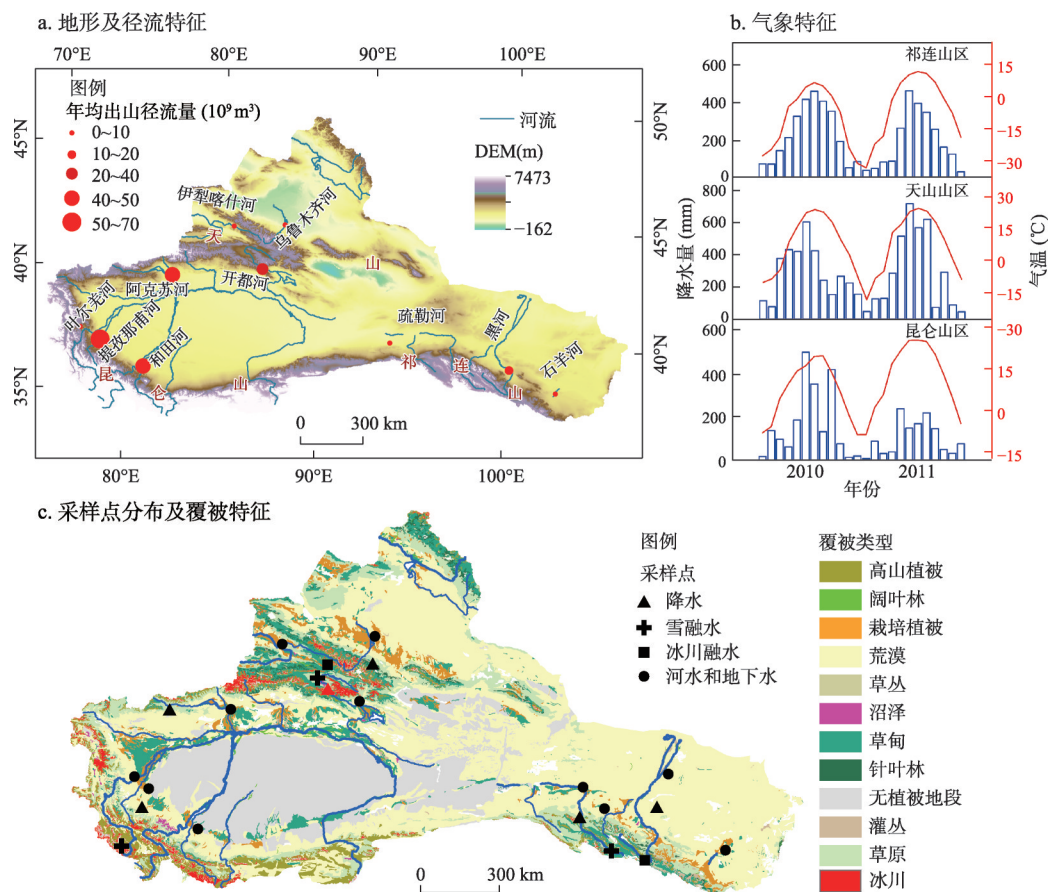


图1 研究区位置及自然概况

Fig. 1 Location and overview of the study area (Northwest China)

事件为单位采集自研究区内陆河上游的站点；地下水采集自研究区固定的浅层地下水（< 20 m）观测站点，冰川及冰雪融水采集自研究区典型的山区观测点（表1）；流量数据选取各河流出口口径流站的水文观测数据。水体稳定同位素样品采样后保存于5 mL玻璃瓶中，并立即用Parafilm封口膜密封，以减少蒸发。采集水化学样品时，先用待采样品清洗100 mL棕色聚乙烯瓶3次，用封口膜密封并及时冷藏于4℃的冰箱，在7 d内送到实验室进行测定。样品的采集工作集中于研究区平水年的2018年开展，为了进一步揭示区域整体的水化学特征，选取了部分已发表文献中与本文采样时间相近的平水年的数据进行比较（表1）。

3.2 样品的测定

$\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值由液态水同位素分析仪（DLT-100型）测定，其精度水平分别为0.1‰和0.3‰，测量结果以维也纳标准平均海水（VSMOW）为标准的千分差 δ （‰）表示。主要阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 和 K^{+} 采用电感耦合等离子体发射光谱仪（美国安捷伦735 ICP-OES）进行测定，阴离子 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 由离子色谱仪（美国戴安ICS-5000）测定， HCO_3^{-} 和 CO_3^{2-} 采用电位滴定法测定，测试精度为0.01 mg/L。

3.3 分析方法

Piper 三线图、Gibbs 图和环境同位素示踪法是探讨不同水体的水化学特征和主要风

表 1 研究区内陆河流数据类型及来源
Tab. 1 Data types and sources of inland rivers in Northwest China

区域	流域	水体类型	采样站	采集时间	采集频率	样品数量 (个)	数据来源
天山山区	乌鲁木齐河	冰川融水	天山一号冰川 (43°06'N, 86°48'E)	2018 年	3 月、5 月、 7 月、10 月	8	本文
		雪融水	大西沟站 (43°06'N, 86°50'E)		3 月、10 月	2	
		降水			降水事件	26	
		河水	后峡水文站 (43°17'N, 87°11'E)		月	24	
		地下水			3 月、5 月、 7 月、10 月	8	
	开都河	冰川融水	开都河上游 (42.31°N, 84°24'E)	2018 年	4 月、7 月	12	本文
		雪融水	巴音布鲁克水文站 (43°°N, 84°13'E)		3 月、11 月	2	
		降水			降水事件	30	
		河水	黄水沟水文站 (42°27'N, 86°14'E)		月	24	
		地下水				24	
	博尔塔拉河	降水	温泉县(44°58'N, 81°01'E)	2017 年	降水事件	16	[24]
		河水	博乐市(44°52'N, 82°03'E)		8 月	38	
		地下水				22	
	伊犁喀什河	冰川融水	伊犁喀什河上游 (43°44'N, 84°24'E)	2018 年	7 月	2	[25]
		雪融水				2	
		降水	尼勒克站(43°49'N, 82°22'E)		降水事件	55	
		河水	尼勒克站(43°49'N, 82°22'E)		月	12	
		地下水				12	
	阿克苏河	降水	沙里桂兰克站 (40°38'N, 78°32'E)	2018 年	降水事件	25	本文
		河水	神木园(41°16'N, 80°13'E)		月	24	
		地下水				12	
	呼图壁河	雪融水	军塘湖(44°11'N, 86°53'E)	2014 年	4 月	8	[26]
		降水	石门水文站 (44°79'N, 86°64'E)		降水事件	30	
		河水			月	24	
		地下水				12	
祁连山区	疏勒河	冰川融水	老虎沟(39°26'N, 96°32'E)	2013 年	5 月、9 月	9	[27]
		雪融水			8 月	2	
		降水	苏里(38°27'N, 98°18'E)		降水事件	40	
		河水			月	24	
		地下水				12	
	黑河	冰川融水	托勒站(38°48'N, 99°14'E)	2014 年	5 月、7 月	12	[11, 28]
		雪融水	野牛沟(38°25'N, 99°22'E)		5 月、7 月	6	
		降水			降水事件	80	
		河水	嘉峪关(39°45'N, 98°16'E)		月	12	
		地下水				12	
	石羊河	冰川融水	八一冰川(38°28'N, 98°53'E)	2014 年	7 月	8	[14, 29-32]
		雪融水	民勤(38°31'N, 103°E)			4	
		降水			降水事件	43	
		河水	古浪(37°27'N, 102°53'E)		月	24	
		地下水				12	

续表 1

区域	研究流域	水体类型	采样站	采集时间	采集频率	样品数量 (个)	数据来源
昆仑山区	叶尔羌河	河水	莎车站(37°52'N, 77°25'E)	2018年	每月	12	本文
		地下水				12	
	提孜那甫河	冰川融水	库地站(37°05'N, 76°49'E)	2018年	8月	8	本文
		雪融水				2	
		降水	江卡水文站		降水事件	32	
		河水	(37°44'N, 77°15'E)		每月	24	
	和田河	地下水				12	
		河水	和田河大桥	2018年	5月	14	本文
		地下水	(37°5'N, 79°77'E)		9月	14	

化过程影响的常用方法^[33]。经验正交函数分析方法（Empirical Orthogonal Function, EOF），用来定量分析区域TDS、主要离子和氢氧同位素的时空变化规律^[34]。

同位素径流分割是基于同位素质量守恒和水量平衡的径流分割手段^[35]，三水源径流分割时，需要两种相互独立的稳定示踪剂，而水体中稳定氢同位素和氧同位素高度线性相关，因此需要将同位素和其他水化学的示踪剂联合使用（通常用Cl⁻或TDS），则三水源径流分割公式可写为：

$$Q=\sum_{m=1}^nQ_m$$
$$QC_Q^b=\sum_{m=1}^nQ_mC_m^b,\quad b=l,\cdots,k$$

(1)

式中： Q 为多种水源补给形成的总径流量； Q_m 为第 m 种径流； C_m^b 为径流 m 的示踪剂 b ，其中参数 C_m^b 在观测期间应为一个稳定的常量，并且为了避免误差需要选取两种示踪剂，在本文中选取 $\delta^{18}\text{O}$ 和TDS作为示踪剂。

SAR（纳吸附比）、Na%（钠含量）和RSC（残余碳酸钠）是进行灌溉适宜性分析评价的重要指标^[22]。其中SAR反映河水中钠离子与土壤组分发生交替吸附作用的相对活度，Na%利用钠百分比评估在所有溶解的阳离子中钠的危害水平，RSC是对比碳酸盐和重碳酸盐与河水中钙镁离子的比值^[22]，公式如下所示：

$$\text{SAR}=\frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

(2)

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

(3)

$$\text{RSC}=(\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-)-(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$$

(4)

式中：Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻分别为该离子的浓度（meq/L）。

4 结果与分析

4.1 研究区径流量和水化学特征

4.1.1 研究区径流量变化特征 内陆河径流量对气候变化及外界环境变化十分敏感^[22]。从年径流总量上看，研究区呈现为昆仑山区>天山山区>祁连山区的趋势（图1）；20世纪70年代以来，各内陆河年径流量多呈现上升趋势。在昆仑山区，叶尔羌河以及和田流域多

年平均径流量较大,尤其是叶尔羌河多年平均径流量为 68.55 亿 m³,在夏季时径流量最大可达到 96.28 亿 m³,近年来其径流量上升速度也较快。而在天山地区,阿克苏河、开都河等径流量均在 20 亿 m³ 以上,且径流量较 20 世纪 70 年代明显上升,这可能与天山山区冰川分布广泛,春夏季冰川融水以及雪融水的补给充足有关^[8-9];西部的博尔塔拉河径流量在年际和秋季上升明显,而冬季却呈下降趋势^[23];中部的乌鲁木齐河年均径流量呈稳定态势,这可能与其主要由地下水补给有关^[4, 14]。祁连山区的河流年径流量相对较小,基本在 3 亿~16 亿 m³,特别是石羊河多年平均径流量仅 3.18 亿 m³;20 世纪 70 年代以来,黑河、疏勒河径流增速显著,其中黑河的秋季径流量、疏勒河的夏季径流量增速显著^[15, 21],而石羊河流域只有夏季径流呈现微弱增加^[35]。

4.1.2 多种水体水化学特征 3 个区域不同水体的 pH 值的总范围为 6.70~8.80,总体呈现碱性,而天山山区的降水和冰川融水 pH 值低于 7,呈现偏酸化。研究区水体 TDS 值总范围为 54.70~794.50 mg/L,其中降水 TDS 值范围为 64.20~103.45 mg/L,且天山山区高于祁连山区(表 2);冰川融水 TDS 值范围为 54.70~112.59 mg/L,祁连山区的冰川融水 TDS 远高于天山山区,这可能与大量冰川消融对山区岩石的冲蚀溶解以及封存于冰川中的元素、降尘颗粒物以及污染物质释放有关^[21, 29, 36];而河水 TDS 值在 313.04~649.24 mg/L 之间,地下水的 TDS 值范围为 655.96~794.50 mg/L,研究区河水与地下水 TDS 值均呈现昆仑山区>祁连山区>天山山区。

离子组成方面,研究区降水的主导离子为 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺,但乌鲁木齐河流域降水中 Cl⁻ 也占有重要地位(图 2)。石羊河与黑河流域的冰川融水的 SO₄²⁻ 浓度较高,而石羊河的雪融水的 SO₄²⁻ 及 Mg²⁺ 亦呈现较高浓度。在河水离子组成中,除昆仑山区几条河流的呈现出较高的 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 浓度外,其他流域均以 HCO₃⁻ 为主导阴离子,以 Na⁺ 和 Ca²⁺ 为主导阳离子。研究区地下水主导阴阳离子与河水相似,为 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺,但石羊河流域地下水离子中 SO₄²⁻ 浓度较高,和田河流域地下水 Cl⁻ 浓度较高。

4.1.3 河流水化学时空特征 为进一步揭示区域河水 TDS 值和阴阳离子的时空分布特征,本文对具有代表性的乌鲁木齐河、开都河、伊犁喀什河以及石羊河进行 EOF 分析

表 2 研究区多种水体的水化学信息
Tab. 2 Hydrochemical information from water bodies in Northwest China

水体类型	研究区域	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH
河水	天山山区	313.04	50.98	10.62	21.54	2.32	21.67	130.62	64.53	7.86
	祁连山区	389.04	47.81	21.23	21.07	1.60	9.97	234.46	50.43	7.79
	昆仑山区	649.24	73.49	24.64	67.36	65.10	101.13	152.19	154.35	7.99
降水	天山山区	103.45	19.99	1.69	3.72	1.86	8.64	41.38	12.31	6.83
	祁连山区	64.20	14.78	1.44	7.32	2.15	2.43	25.32	7.18	7.32
冰川融水	天山山区	54.70	4.58	0.56	0.05	0.38	2.49	37.98	2.83	6.79
	祁连山区	112.59	22.09	6.97	2.16	0.90	1.37	39.40	22.59	8.79
雪融水	天山山区	69.75	17.26	0.94	2.69	0.66	5.41	31.11	2.82	7.46
	祁连山区	57.80	11.61	4.06	2.01	0.57	0.54	25.03	8.02	8.01
地下水	天山山区	655.96	61.68	26.53	60.03	3.92	45.81	225.35	212.80	7.98
	祁连山区	699.59	87.38	36.22	54.49	4.91	24.84	293.75	197.62	7.62
	昆仑山区	794.50	45.90	31.55	146.55	12.90	152.75	227.75	171.45	8.00

注:除 pH 无量纲外,其他指标单位为 mg/L。

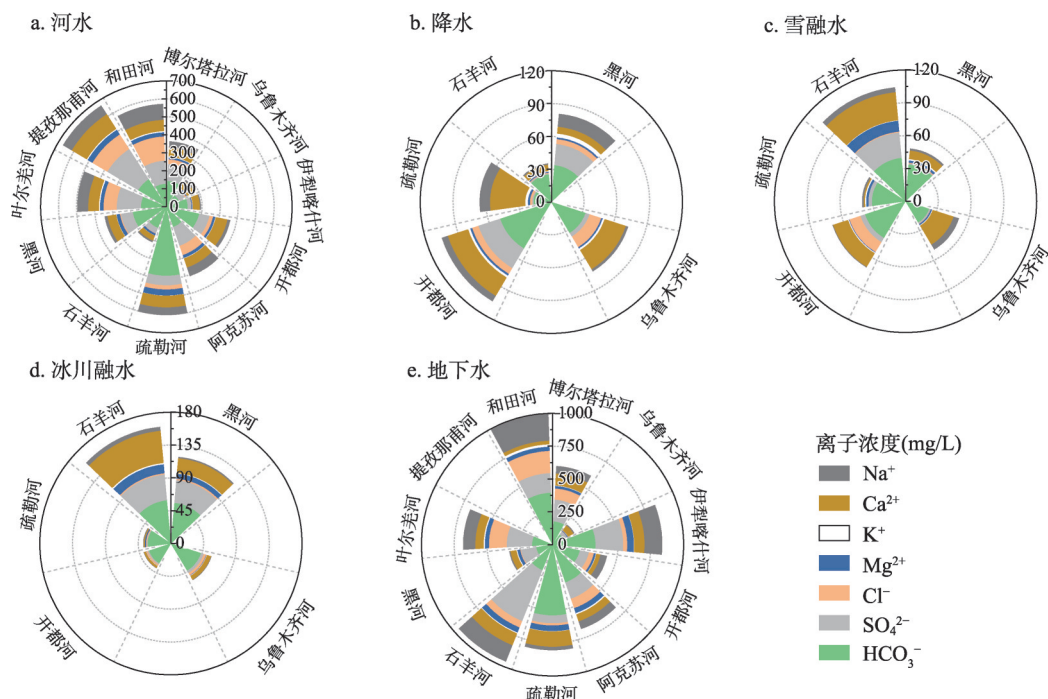


图2 研究区内陆河流域不同水体离子浓度分布

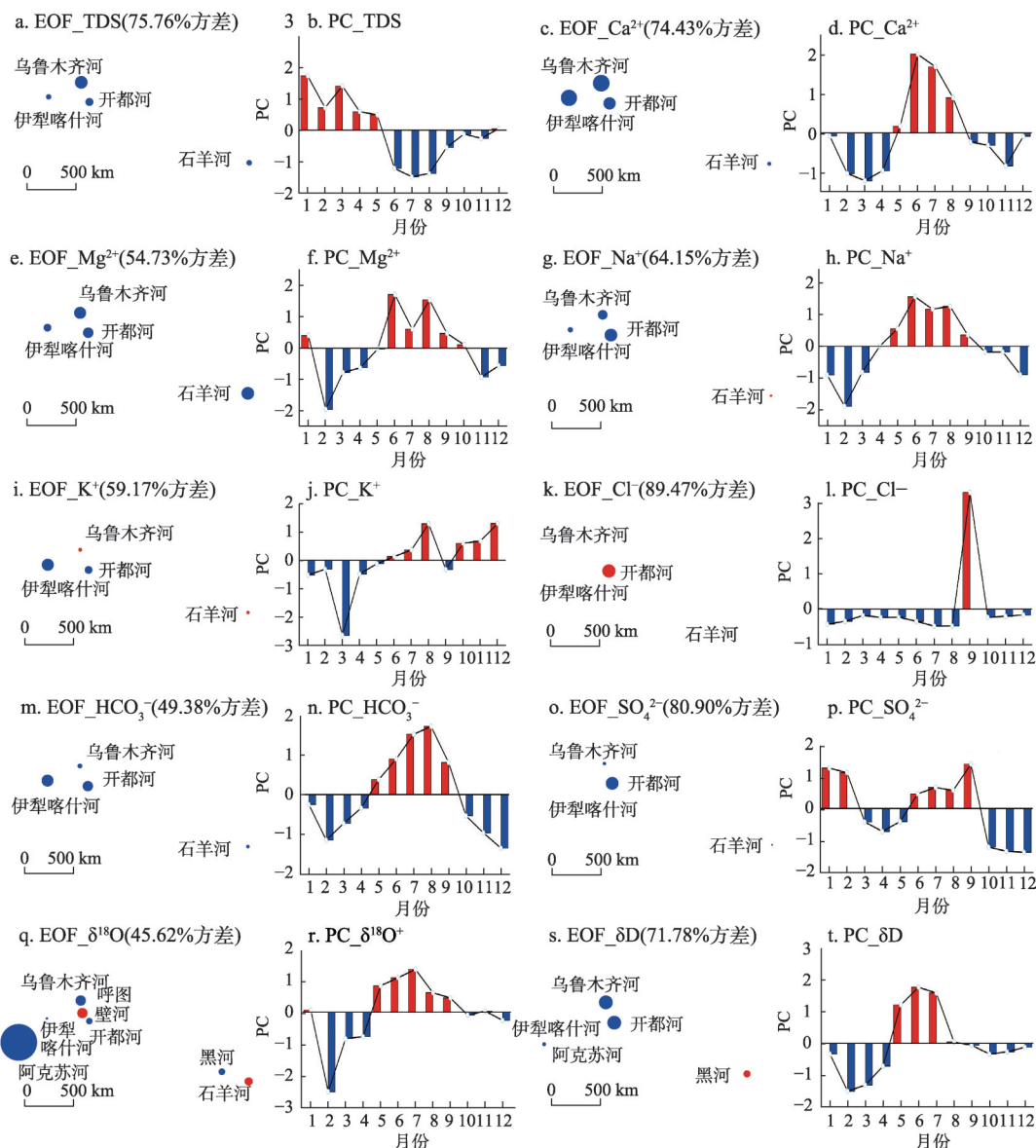
Fig. 2 Ion concentration distribution of different water bodies in the inland river basins of Northwest China

(图3), 结果表明4条河流的TDS变化趋势具有一致性, 全年呈现出夏秋低冬春高的季节变化特征, 其中以开都河河水的季节变化最为显著, 冬春季降水少、蒸发旺盛, 水体的蒸发富集作用强烈是研究区冬春TDS值高的主要原因, 而夏季冰雪融水及高山降水的增加带来的河水的稀释是夏季河水TDS较低的主要原因^[21, 33]。

对比几个离子发现, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 HCO_3^- 呈现出较为相似的变化趋势, 即夏秋高冬春低, 这是因为这几种离子主要来源于蒸发岩矿物、硅酸盐岩矿物和碳酸盐岩矿物的溶解^[18], 而夏季冰雪融水和高山降水冲刷岩石后产生水盐交互, 其汇入河流后导致夏秋季节浓度较高^[33]。图31显示研究区河水 Cl^- 表现出特殊的分布态势, 这与当地绿洲农业灌溉用水对地表盐分淋洗有密切关系^[20-21]; 而夏季 Na^+ 值的升高, 也被证明与研究区夏季较为频繁的农业灌溉有一定关系^[18, 20]。研究区四条河流的 SO_4^{2-} 的浓度在春季呈现上升趋势, 尤其乌鲁木齐河季节变化最为显著, 这可能由于积雪中富集 SO_4^{2-} 离子的粉尘随着积雪融化汇入到河流中, 使其浓度增大^[14, 29]。

4.1.4 多水体水化学影响因素 研究区地表水的水化学类型较为单一, 多为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型(图4); 乌鲁木齐河、开都河、疏勒河以及石羊河的降水都是 HCO_3^- - Ca^{2+} 型, 而黑河的降水为 HCO_3^- - Na^+ 型; 区域雪融水与冰川融水水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型; 研究区河水水化学类型亦为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型。而区域地下水的水化学类型较为复杂, 开都河与伊犁喀什河地下水水化学类型为 HCO_3^- - Na^+ - Ca^{2+} ; 乌鲁木齐河和与疏勒河地下水为 HCO_3^- - Na^+ 型; 博尔塔拉河与黑河地下水水化学类型为 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca^{2+} 型; 石羊河地下水为 SO_4^{2-} - Na^+ - Ca^{2+} 型。

Gibbs图是确定天然水中主要化学成分来源的重要方法, 可揭示降水控制、岩石风化和蒸发浓度对水化过程的影响^[20, 33]。如图5所示, 研究区的各种水体大部分处于 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- +$



注：图中蓝色和红色圆圈代表研究流域的EOF空间模式，蓝色代表趋势与整体趋势一致，红色代表趋势相反，圆圈直径越大代表趋势越明显。

图3 研究区TDS、离子以及氢氧同位素的空间分布模式(EOF)及其对应的时间序列(PC)

Fig. 3 Spatial distribution patterns (EOF) and their corresponding time series (PC) of TDS, ions, and hydrogen and oxygen isotopes in the inland river basins of Northwest China

HCO₃⁻)的低值区域，而TDS值分布在100~1100 mg/L之间，表明研究区域大多数水体的水化学成分主要由岩石风化控制。值得注意的是，伊犁喀什河、开都河以及石羊河的地下水样本落在3个典型的控制区之外，在Gibbs中，这些点的Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)的比值大于0.5，这种现象是由于人类活动的干扰引起的^[16, 21]。有研究指出，西北地区的山区是重要的矿产资源蕴藏区，由于矿产的开发导致地面塌陷及裂缝等相应引起地表渗透条件变化、含水层破坏，易造成地下水中SO₄²⁻浓度剧增，Ca²⁺、HCO₃⁻浓度降低^[30]；此外，西北

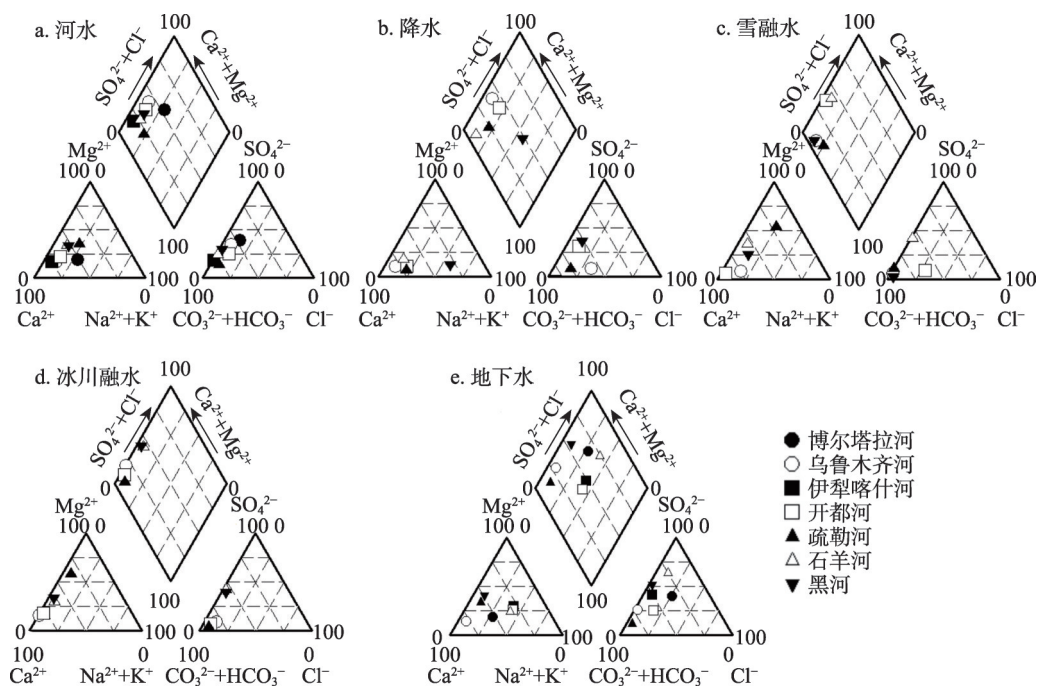


图4 研究区内陆河流域不同水体piper图

Fig. 4 Piper diagrams of different water bodies in the inland river basins of Northwest China

内陆河流域是中国重要的绿洲灌溉农业分布区，其对灌溉水源的依赖性导致灌溉水频繁淋洗地表盐分，进而导致区域水体中 Na^+ 以及 Cl^- 的浓度异常变化^[17, 22]。

4.2 水体稳定同位素变化特征

4.2.1 整体特征 研究区降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 -14.83‰ ~ -2.35‰ ， δD 值范围为 -88.25‰ ~ -44.29‰ ，整体上看祁连山地区降水稳定同位素值较天山地区高（表3）。而天山地区的乌鲁木齐河、开都河以及阿克苏河与区域其他流域不同，其降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值都大于 -10‰ ，同样的现象还出现在昆仑山地区的提孜那甫河流域。研究区冰川水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 -13.50‰ ~ -7.40‰ ， δD 值范围为 -89.50‰ ~ -42.81‰ ，且呈现昆仑山地区>祁连山地区>天山地区的大小顺序。而雪融水 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围为 -21.17‰ ~ -9.08‰ ， δD 值范围为 -160.21‰ ~ -51.12‰ ，呈现祁连山地区>天山地区>昆仑山地区的顺序。研究区河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -13.76‰ ~ -8.04‰ 之间， δD 值范围为 -88.25‰ ~ -44.29‰ ，祁连山区河水稳定同位素变化范围值较其他区域更大一些。研究区地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -13.21‰ ~ -7.84‰ 之间， δD 值范围为 -87.30‰ ~ -41.06‰ ，对比来看，祁连山地区的地下水氢氧同位素值较大，尤其是黑河和石羊河，其次为提孜那甫河。河水与地下水相同的稳定同位素值表明，研究区的河水与地下水存在较为密切的联系^[23]。

4.2.2 河水稳定同位素时空特征 图3q为2018年阿克苏河、伊犁喀什河、开都河、乌鲁木齐河、呼图壁河、阿克苏河、黑河、石羊河月平均河水 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布模态（EOF）及其对应的时间序列（PC）。其中， $\delta^{18}\text{O}$ 的空间模态（EOF $_{\delta^{18}\text{O}}$ ）可以解释 $\delta^{18}\text{O}$ 的45.62%的方差变化，是该区域河水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化最主要的模态，其对应的时间序列PC存在明显的季节变化特征。

将EOF与PC进行综合分析，可以看出阿克苏河、伊犁喀什河、开都河、乌鲁木齐河以及黑河河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化趋势具有一致性，全年呈现出夏秋低冬春高的季节变化特

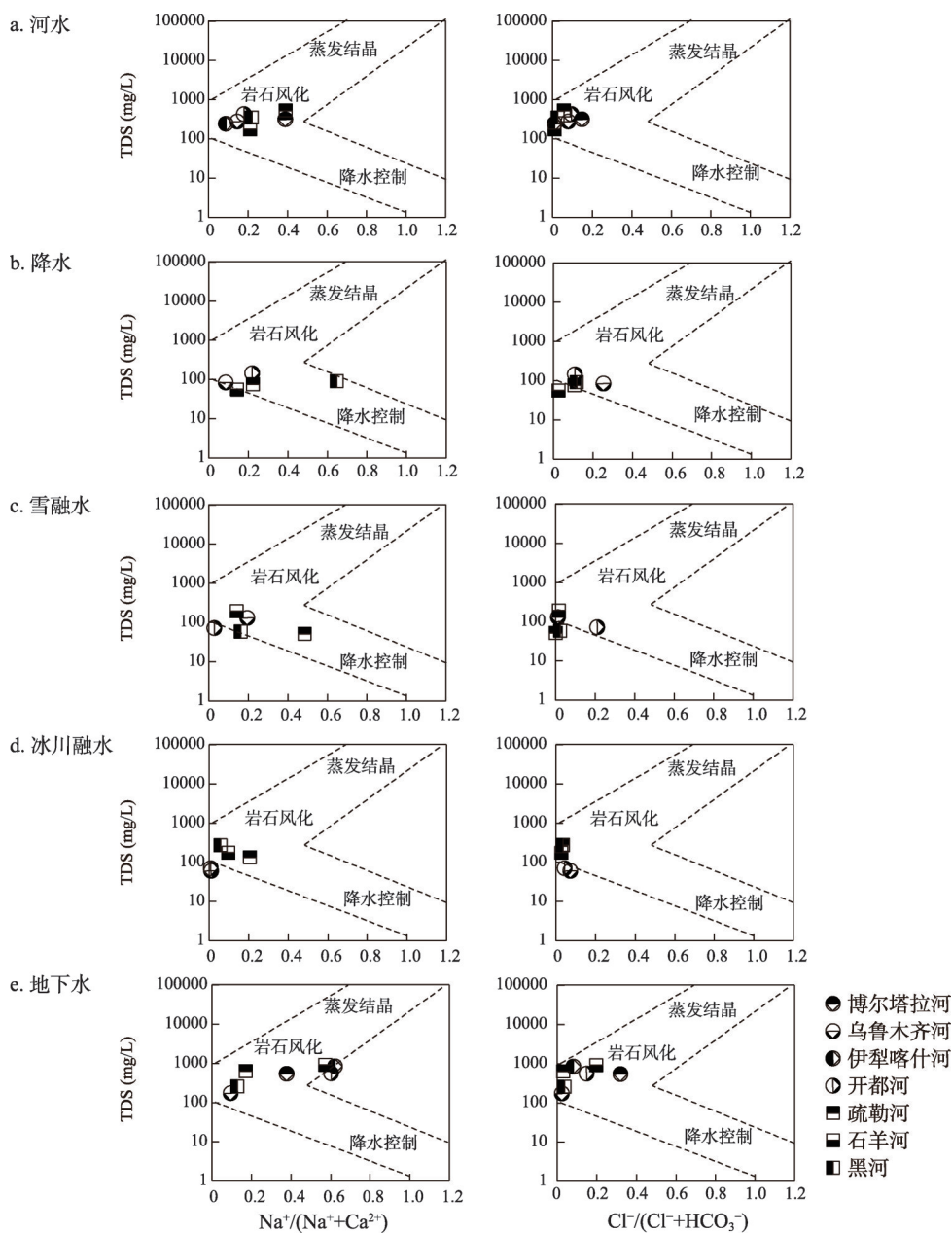


图5 研究区内陆河流域不同水体Gibbs图

Fig. 5 Gibbs plots of different water bodies in the inland river basins of Northwest China

征,其中以阿克苏河水的季节变化最为显著,这可能与该区域春季气候干旱、降水稀少、蒸发旺盛,导致河水稳定同位素富集有关;而夏季降水较多,大量冰雪融水(同位素较低)补给河水稀释了河水稳定同位素^[23, 33]。而呼图壁河和石羊河的河水 $\delta^{18}\text{O}$ 值则表现出相反的变化特征,全年呈现出夏秋高冬春低的季节变化特征,这可能与夏季地表水、地下水交互作用频繁,高同位素值的地下水补给河水有关^[22, 36]。 δD 的空间模态(EOF δD)可以解释 δD 71.78%的方差变化(图3s),与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化趋势具有一致性。

表3 研究区不同水体稳定同位素特征

Tab. 3 Stable isotope characteristics of different water bodies in the study area

研究区	δD(‰)					δ ¹⁸ O(‰)				
	河水	降水	雪融水	冰川融水	地下水	河水	降水	雪融水	冰川融水	地下水
天山山区 博尔塔拉河	-77.50	-93.70			-75.61	-11.20	-11.19			-11.02
乌鲁木齐河	-58.00	-33.23	-57.29	-65.17	-58.93	-8.87	-8.84	-12.21	-12.67	-9.15
伊犁喀什河	-88.25	-94.80	-107.14	-76.68	-87.30	-13.76	-14.83	-15.27	-11.64	-13.21
开都河	-70.39	-19.45	-79.70	-63.11	-67.29	-10.70	-2.93	-10.93	-10.04	-10.19
阿克苏河	-81.08	-12.61				-12.07	-2.35			
呼图壁河	-66.66	-86.25	-150.79		-69.82	-9.94	-12.42	-19.42		-10.23
祁连山区 疏勒河	-64.53	-49.56	-95.40	-89.50	-64.84	-10.01	-6.99	-14.10	-13.50	-10.27
黑河	-53.37	-54.63	-51.70		-52.42	-8.62	-8.39	-9.40		-8.80
石羊河	-47.56	-39.45	-51.12	-54.40	-48.80	-8.47	-7.20	-9.08	-9.40	-7.80
昆仑山区 叶尔羌河	-82.00					-11.10				
提孜那甫河	-44.29	-27.27	-160.21	-42.81	-41.06	-8.04	-3.83	-21.17	-7.40	-8.07
和田河	-60.00					-9.30				

4.3 径流组分特征

基于同位素径流分割模型，研究区域不同河流的径流组分特征被详细解析（表4）。整体上，西北内陆河流域地下水、融水以及降水对河川径流的补给率分别为42.6%，23.0%和34.4%，融水和降水在区域径流过程中占据重要的地位。对比不同区域，祁连山地区、天山地区以及昆仑山地区河流径流组分特征具有显著的空间差异性，其中祁连山地区的径流中降水补给（46.5%）>地下水补给（32.6%）>融水补给（20.9%）。而天山地区的河川径流有49.9%来自于地下水补给，24.8%来自融水补给以及25.3%来自降水补给，融水与降水补给比重相近。在昆仑山地区，地下水补给仍占有重要地位，补给率高达46.8%，且降水对径流的补给率（30.0%）要高于融水对径流的补给率（23.2%）。

根据径流分割的结果，研究区内陆河被分为降水主导型，融水主导型以及地下水主导型3种，其中祁连山地区的河流主要为降水主导性河流，尤其是疏勒河和石羊河的径

表4 研究区内陆河径流组分特征

Tab. 4 Characteristics of runoff components in the inland rivers of Northwest China

研究区	补给率(%)			研究流域	补给率(%)		
	地下水	融水	降水		地下水	融水	降水
全区域	42.6	23.0	34.4				
天山山区	49.9	24.8	25.3	乌鲁木齐河	58.2	20.7	21.1
				开都河	52.3	25.6	22.1
				阿克苏河	39.2	28.2	32.6
祁连山区	32.6	20.9	46.5	疏勒河	31.4	4.8	63.8
				黑河	35.3	47.3	17.4
				石羊河	31.1	10.5	58.4
昆仑山区	46.8	23.2	30.0	提孜那甫河	45.5	7.1	47.4
				和田河	48.1	39.4	12.5

流组分基本一致,其降水对径流的贡献高达50%以上,并且融水的补给比较微弱,但黑河融水补给仍占有较大的部分。而天山地区的河流以地下水主导性为主,除阿克苏河降水对径流的补给高达32.6%外,乌鲁木齐河与开都河的径流组分特征相似,降水与融水对径流的补给率相当。而昆仑山地区两条河流径流组分差异显著,提孜那甫河是以降水为主要补给,补给比例高达47.7%,与祁连山地区的石羊河和疏勒河类似。而和田河与天山地区河流的径流组分特征更相似,以地下水位主导,但同时融水也占有重要地位,补给率接近40%。

5 讨论

5.1 径流组分特征控制因素

西北内陆河流域以冰雪融水为基础的水资源系统非常脆弱,是对全球气候变化最敏感的地区之一^[1]。1990年以来研究区中的气温、降水量等区域气候因素呈现出显著的波动趋势,导致区域地表植被、冰川储量和积雪面积存在明显变化^[37-38],进而对内陆河流域径流过程有显著影响。地形、植被覆盖和区域气候格局的空间异质性导致了研究区中不同内陆河河流径流组成的空间差异。

根据本文结果,该地区内陆河流域径流主要来源于地下水、冰川/雪融水和降水。在区域变暖的背景下,冰川/雪覆盖面积的减少进一步扩大,导致冰川/雪融水对部分内陆河流的区域河流流量的贡献发生变化^[39]。此外,研究区内陆河流的径流过程对山区降水波动和区域植被覆盖密切敏感(与地下水储量密切相关)。为了进一步探讨不同地区径流组成与这些因素的关系。图6显示了1990—2020年研究区主要环境因素的变化,其中研究大部分地区的年平均气温呈上升趋势,尤以东天山地区更为明显,但天山中部和昆仑山东部却呈现温度下降趋势。除天山东部外,大部分地区的降水在呈上升趋势,其中天山西部和昆仑山中西部较为明显。整个研究区冰川面积分布存在明显的空间不一致性,祁

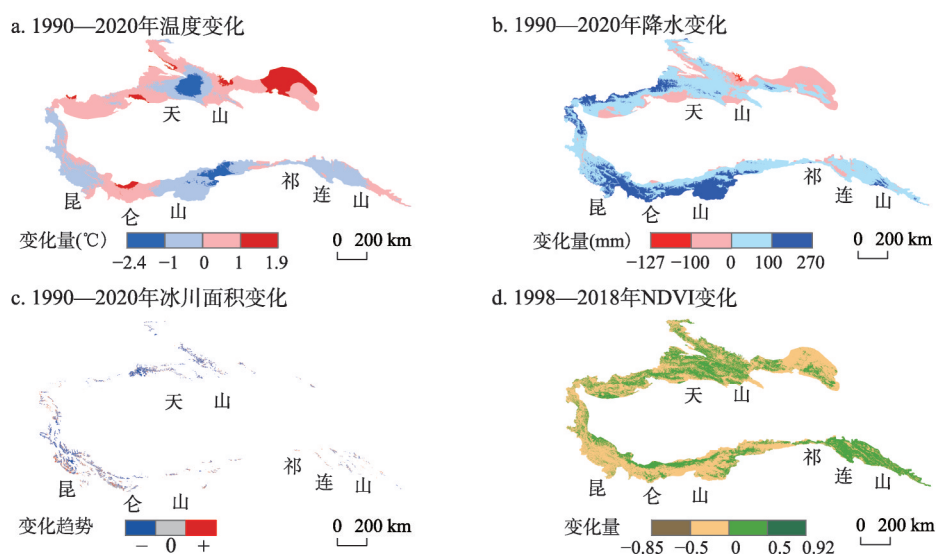


图6 1990—2020年西北内陆河流域自然因素变化

Fig. 6 Natural factors change in the inland river basins of Northwest China during 1990-2020

连山冰川面积小于其他地区。值得注意的是，位于研究区西部的一些冰川呈上升趋势，尤其是在昆仑山的西部（图6c）。在地表植被覆盖方面，祁连山的NDVI值有显著的上升趋势，1998—2018年天山的植被覆盖也有一致的变化趋势。但昆仑山大部分地区的植被覆盖度呈明显下降趋势，与天山东部地区相似（图6d）。

根据径流分割的结果，祁连山区多为降水主导型河流，以疏勒河、石羊河为典型代表，降水对径流的贡献率占绝大多数，融水补给较小，1990年以来的气象数据也表明该区域降水呈现增多的趋势^[40]。并从图6c中可以发现祁连山地区冰川分布相对较少，且仅在黑河源头冰川面积有微弱增加，这与石羊河和疏勒河融水补给占比极小，而黑河融水补给为主有密切关联^[41]。天山地区多为地下水补给型河流，地下水对径流的贡献最高，其次降水和融水也占一定的比重，这与天山地区较高的地表植被覆盖度有密切关系，高山植被对于降雨径流和融冰雪径流的拦蓄作用是区域地表水补给占比较大的重要原因^[42]。位于西风上风向的天山西部和昆仑山西南部降水相较于其他区域较为丰沛^[8, 17, 40]，这导致该区域降水补给河川径流的比重较高^[43]（图6b）。而和田河位于提孜那甫河东侧，降水相对较少，并且上游有大面积的冰雪覆盖区，导致和田河的融水补给比重较大^[44]。

5.2 径流风险评估

5.2.1 水质风险 根据生活饮用水卫生标准（GB5749-2022），生活饮用水pH值不小于6.5且不大于8.5，研究区内陆河流域河水的pH值在7.52~8.10之间，基本达标，但博尔塔拉河（8.10）和和田河河水（8.07）的pH值有超出标准的风险，应引起注意（表5）。根据生活饮用水卫生标准（GB5749-2022），TDS值不能超过1000 mg/L，研究区内陆河河水TDS值在171.38~789.67 mg/L，基本达标，但和田河河水TDS值接近1000 mg/L，具有潜在的水质安全风险。另外快速变暖不仅会消融季节性冰川，还会导致西北内陆河流域山区冰川和永冻层消融加速，直接影响内陆河水体的水化学特征，带来水环境的风险^[44]。前人研究表明，快速变暖导致亚洲水塔冰川消融加速，大量封存的污染物或重金属被释放，这对于内陆河水环境具有显著影响^[31, 33, 36]。

引入SAR（纳吸附比）、Na%（钠含量）和RSC（残余碳酸钠）作为评价指标^[44]（表4），对研究区河水进行灌溉适宜性分析。结果表明研究区河水大部分灌溉适宜性较好，但和田河的Na%超出灌溉水适宜性标准（表6）40%，具有一定的风险；因为高钠浓度会使土壤变硬，降低土壤的渗透性，盐分累积会通过限制水分的吸收对植物生长产生有害影响^[45-46]。

表5 研究区不同内陆河流域河水水质特征
Tab. 5 Water quality of different inland rivers in Northwest China

	TDS(mg/L)	pH	SAR	Na%	RSC
博尔塔拉河	310.70	8.10	1.08	30.26	-1.13
乌鲁木齐河	275.49	7.68	0.29	11.80	-1.45
伊犁喀什河	239.38	8.00	0.15	8.32	-0.45
开都河	426.60	8.00	0.43	13.47	-1.36
阿克苏	323.25	7.86	1.48	35.02	-2.07
疏勒河	526.87	7.52	1.04	23.70	0.35
石羊河	171.38	8.01	0.31	12.95	-0.34
黑河	348.87	7.83	0.42	13.87	-0.96
叶尔羌河	429.24	7.97	1.70	37.07	-2.34
提孜那甫河	378.14	7.93	1.23	25.21	-4.49
和田河	789.67	8.07	2.40	44.26	-2.87

5.2.2 水量风险 内陆河径流的水量可以反映区域气候变化的一些信息,对温度波动、降水变化、冰川减少、积雪覆盖和植被覆盖变化较为敏感^[13]。在过去的半个世纪里,研究区的大部分内河径流量表现出显著的增长趋势^[22]。尤其是天山阿克苏河和开都河,夏季河流径流呈现明显的波动趋势,这也增加了洪水风险。乌鲁木齐河、疏勒河等相对较小的河流没有表现出剧烈的径流波动,比较稳定^[4, 15]。石羊河表现出水量减少的趋势,在未来可能会有干涸的风险^[3, 17]。

5.2.3 气候变化风险 气候变化的背景下,温度波动和冰川/雪覆盖变化对研究区内陆河流有重大影响,这对区域内陆河径流模拟和估算带来了新的挑战^[1, 4, 6]。揭示不同内陆河流的风险已经引起了越来越多关注^[17, 20]。

冰川/雪融水与区域气温和降水变异性密切相关^[4]。总体而言,区域气温上升导致区域冰川融化速度加快,冰川/雪融水径流也显著增加,对以冰川/雪融水为主要补给的内陆河构成潜在风险^[35-36],这种风险可能出现在天山西部、昆仑山中部和祁连山东部的一些内陆河流中,特别是在阿克苏河、和田河和石羊河中。此外,区域降水的波动对以降水为主要补给的内陆河流也构成了潜在的风险^[39, 43]。根据本文结果,提孜那甫流域和疏勒河流域可能存在径流风险。

植被是土壤与大气之间水交换的关键驱动因素,通过降雨和土壤水分消耗间接影响地下水补给^[47]。相对较高的植被覆盖可增加区域冰川/雪融水和降水的入渗^[47],增加土壤介质流量和地下径流,减少径流变化范围,保持旱季河流径流的稳定^[48-49]。本文以地下水为主的内陆河流集中在天山和昆仑山,而区域植被覆盖面积的减少则集中在昆仑山和天山东部。在昆仑山的内陆河流中,如提孜那甫河、和田河等,可能会出现植被覆盖变化造成的径流风险。

6 结论

本文选取祁连山、天山、昆仑山地区典型的内陆河流域,基于长期野外径流监测,以及降水、融水、河水、地下水样品的搜集与测试,得出以下结论:

(1) 西北内陆河流域大部分河流年均径流量呈现上升趋势,石羊河呈现下降趋势,天山中部的乌鲁木齐河流量较为稳定。

(2) 研究区水体多呈碱性,而天山地区的降水和冰川融水偏酸性;区域水体TDS值范围为64.70~794.50 mg/L, HCO_3^- 和 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主导阴阳离子。河水TDS具有较为一致的季节变化趋势(夏秋低冬春高),而河水的各阳离子和阴离子季节差异显著。区域水体多为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型,主要受控于岩石风化。

(3) 除呼图壁河与石羊河外,区域河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 均呈现出夏秋低冬春高的季节变化特征,其中以阿克苏河水的季节变化最为显著。

(4) 区域内陆河径流组分特征存在显著的空间异质性,地下水、降水和冰川/雪融水对区域内河径流的年平均贡献分别为42.6%、34.4%和23.0%。

(5) 区域环境要素的波动给区域内河径流的模拟和估算带来了新的挑战。气温的变化会对阿克苏河、和田河和石羊河等河流的径流稳定带来风险,区域降水的波动会对提

表6 河水灌溉适宜性指标标准

Tab. 6 River water irrigation suitability index standard

参数	范围	等级
SAR	≤ 10	优秀
	10~18	良好
	18~26	一般
	> 26	不适宜
Na%	≤ 20	优秀
	20~40	良好
	40~60	一般
	60~80	不确定
	> 80	不适宜

孜那甫河流域和疏勒河流域的径流稳定构成潜在的风险。除和田河外, 西北内陆河流域水质风险相对较低。乌鲁木齐河流域的水量稳定性风险相对较低。

参考文献(References)

- [1] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26. [陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [2] Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(2): 111-119. [陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析. *地球科学进展*, 2022, 37(2): 111-119.]
- [3] Chen Yaning. Impacts of climate change on the water cycle mechanism and water resources security in the arid region of Northwest China. *China Basic Science*, 2015, 17(2): 15-21, 2. [陈亚宁. 气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究. *中国基础科学*, 2015, 17(2): 15-21, 2.]
- [4] Chen Y N, Li B F, Fan Y T, et al. Hydrological and water cycle processes of inland river basins in the arid region of Northwest China. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(2): 161-179.
- [5] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [6] Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview. *Climate Change Research*, 2017, 13(5): 483-493. [王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述. *气候变化研究进展*, 2017, 13(5): 483-493.]
- [7] Li Zhi, Li Yupeng, Li Hongwei, et al. Analysis of drought change and its impact in Central Asia. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(1): 37-50. [李稚, 李玉朋, 李鸿威, 等. 中亚地区干旱变化及其影响分析. *地球科学进展*, 2022, 37(1): 37-50.]
- [8] Wang Jian, Han Haidong, Xu Junli, et al. Chemical characteristics and their influencing factors of precipitation at the end of the Koxkar Glacier, Tianshan Mountains. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2): 347-358. [王建, 韩海东, 许君利, 等. 天山科其喀尔冰川末端降水化学特征及控制因素. *干旱区研究*, 2022, 39(2): 347-358.]
- [9] Zhao Qiudong, Zhao Chancheng, Qin Yan, et al. Response of the hydrological processes to climate change in the Muzati River basin with high glacierization, southern slope of the Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1285-1298. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 天山南坡高冰川覆盖率的水木提河流域水文过程对气候变化的响应. *冰川冻土*, 2020, 42(4): 1285-1298.]
- [10] Li Z X, Feng Q, Liu W, et al. The stable isotope evolution in Shiyi glacier system during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China. *Quaternary International*, 2015, 380: 262-271.
- [11] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, et al. Quantitative evaluation on the influence from cryosphere meltwater on runoff in an inland river basin of China. *Global and Planetary Change*, 2016, 143: 189-195.
- [12] Sun Congjian, Chen Wei, Wang Shiyu. Stream component characteristics of the inland river basin of the Tarim basin under regional climate change. *Arid Zone Research*, 2022, 39(1): 113-122. [孙从建, 陈伟, 王诗语. 气候变化下的塔里木盆地西南部内陆河流域径流组分特征分析. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 113-122.]
- [13] Sun C J, Li X G, Chen Y N, et al. Spatial and temporal characteristics of stable isotopes in the Tarim River Basin. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2016, 52(3): 281-297.
- [14] Sun C J, Chen Y N, Li W H, et al. Isotopic time series partitioning of streamflow components under regional climate change in the Urumqi River, Northwest China. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(8): 1443-1459.
- [15] Sun C J, Yang J, Chen Y N, et al. Comparative study of streamflow components in two inland rivers in the Tianshan Mountains, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 727. DOI: 10.1007/s12665-016-5314-1.
- [16] Wang J, Xu J L, Li Y S, et al. Provenances and controlling factors of solutes in surface runoff in the Tarim River Basin, Northwest China. *Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 821(1): 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/821/1/012016.
- [17] Zhang Z Y, Jia W X, Zhu G F, et al. Hydrochemical characteristics and ion sources of precipitation in the upper reaches of the Shiyang River, China. *Water*, 2020, 12(5): 1442. DOI: 10.3390/w12051442.
- [18] Sun C J, Wang S Y, Chen W. Hydrochemical characteristics and the relationship between surface and groundwater in a

- typical "Mountain-Oasis" ecosystem in Central Asia. *Sustainability*, 2022, 14(12): 7453. DOI: /10.3390/su14127453.
- [19] Sun C J, Zhang X, Wang S Y, et al. Influences of variability of stable isotopes and composition of moisture sources on precipitation at multiple timescales in the Alpine regions of Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2023, 874: 162595. DOI: /10.1016/j.scitotenv.2023.162595.
- [20] Fan Y T, Wu Y, Wang Y, et al. An analysis of surface water-groundwater interactions based on isotopic data from the Kaidu River basin, south Tianshan Mountain. *Water*, 2022, 14(14): 2259. DOI: /10.3390/w14142259.
- [21] Wang Shiyu, Sun Congjian, Chen Wei, et al. Analysis of water chemistry characteristics and hydraulic relationships of different water bodies in typical mountain-oasis systems in the Northwest inland area. *Environmental Science*, 2023, 44 (3): 1416-1428. [王诗语, 孙从建, 陈伟, 等. 典型西北山地—绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析. *环境科学*, 2023, 44(3): 1416-1428.]
- [22] Yang Q C, Li Z J, Xie C, et al. Risk assessment of groundwater hydrochemistry for irrigation suitability in Ordos Basin, China. *Natural Hazards*, 2020, 101: 309-325.
- [23] Sun C J, Shen Y J, Chen Y N, et al. Quantitative evaluation of the rainfall influence on streamflow in an inland mountainous river basin within Central Asia. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(1): 17-30.
- [24] Zhu S D, Zhang F, Zhang Z Y, et al. Hydrogen and oxygen isotope composition and water quality evaluation for different water bodies in the Ebinur Lake watershed, northwestern China. *Water*, 2019, 11(10): 2067. DOI: /10.3390/w11102067.
- [25] Feng X C, Yang Y H. Hydrochemical and stable isotopic spatiotemporal variation characteristics and their environmental significance in the Kashi River Mountain Area of Ili, Xinjiang, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, 44(3): 799-816.
- [26] Yao Junqiang, Liu Zhihui, Guo Xiaoyun, et al. Characteristics of water stable isotopes (^{18}O and ^3H) in the Hutubi River Basin, Northwestern China. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(5): 1443-1450. [姚俊强, 刘志辉, 郭小云, 等. 呼图壁河流域水体氢氧稳定同位素特征及转化关系. *中国沙漠*, 2016, 36(5): 1443-1450.]
- [27] Zhou J X, Ding Y J, Wu J K, et al. Streamflow generation in semi-arid, glacier-covered, montane catchments in the upper Shule River, Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, 2021, 35(8): e14276. DOI: 10.1002/hyp.14276.
- [28] Feng Yawei, Sun Ziyong, Bu Jianwei, et al. The hydrogeochemical characteristics of the river water in the section from Bayi Glacier to Huargzangsi of the Heihe River, Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39 (3): 680-687. [冯亚伟, 孙自永, 补建伟, 等. 祁连山黑河源区八一冰川—黄藏寺段河水水文地球化学特征. *冰川冻土*, 2017, 39(3): 680-687.]
- [29] Zhang Z Y, Jia W X, Zhu G F, et al. Hydrochemical characteristics and ion sources of river water in the upstream of the Shiyang River, China. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(18): 614. DOI: 10.1007/s12665-021-09793-2.
- [30] Zhu G F, Liu Y W, Shi P J, et al. Stable water isotope monitoring network of different water bodies in Shiyang River basin, a typical arid river in China. *Earth System Science Data*, 2022, 14(8): 3773-3789.
- [31] Ma H Y, Zhu G F, Zhang Y, et al. The effects of runoff on hydrochemistry in the Qilian Mountains: A case study of Xiyang River Basin. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 1-10.
- [32] Wang L H, Dong Y H, Xu Z F. A synthesis of hydrochemistry with an integrated conceptual model for groundwater in the Hexi Corridor, northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 146: 20-29.
- [33] Ren Xiaozong, Yang Xiaoping. Hydrochemical compositions of natural waters in Ordos deserts and their influencing factors. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(9): 2224-2239. [任孝宗, 杨小平. 鄂尔多斯沙区天然水体水化学组成及其成因. *地理学报*, 2021, 76(9): 2224-2239.]
- [34] Sun C J, Zhou S J, Jing Z W. Variability of precipitation-stable isotopes and moisture sources of two typical landforms in the eastern Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 46: 101349. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101349.
- [35] Gui J, Li Z X, Feng Q, et al. Contribution of cryosphere to runoff in the transition zone between the Tibetan Plateau and arid region based on environmental isotopes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(1): 97-122.
- [36] Zhang F, Zeng C, Zhang Q G, et al. Securing water quality of the Asian Water Tower. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 611-612.
- [37] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 716-722.
- [38] Li Z X, Gui J, Wang X F, et al. Water resources in inland regions of central Asia: Evidence from stable isotope tracing.

- Journal of Hydrology, 2019, 570: 1-16.
- [39] Cui T, Li Y K, Yang L, et al. Non-monotonic changes in Asian Water Towers' streamflow at increasing warming levels. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1176. DOI: /10.1038/s41467-023-36804-6.
- [40] Li Z X, Feng Q, Yong S, et al. Stable isotope composition of precipitation in the south and north slopes of Wushaoling Mountain, northwestern China. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 87-101.
- [41] Liu W J, Jiang H, Shi C, et al. Chemical and strontium isotopic characteristics of the rivers around the Badain Jaran Desert, northwest China: Implication of river solute origin and chemical weathering. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(15): 1119. DOI: 10.1007/s12665-016-5910-0.
- [42] Shen B B, Wu J L, Zhan S E, et al. Spatial variations and controls on the hydrochemistry of surface waters across the Ili-Balkhash Basin, arid Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126565. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126565.
- [43] Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1309-1323. [邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响. *地理学报*, 2018, 73(7): 1309-1323.]
- [44] Zhong Yinyue, Kang Shichang, Guo Wanqin, et al. The rapidly shrinking cryosphere in the past decade: an interpretation of cryospheric changes from IPCC WGI Sixth Assessment Report. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(3): 946-953. [钟歆玥, 康世昌, 郭万钦, 等. 最近十多年来冰冻圈加速萎缩: IPCC 第六次评估报告之冰冻圈变化解读. *冰川冻土*, 2022, 44(3): 946-953.]
- [45] Li Zeyan, Cao Wengeng, Wang Zhuoran, et al. Hydrochemical characterization and irrigation suitability analysis of shallow groundwater in Hetao irrigation district, Inner Mongolia. *Geoscience*, 2022, 36(2): 418-426. [李泽岩, 曹文庚, 王卓然, 等. 内蒙古河套灌区浅层地下水化学特征和灌溉适宜性分析. *现代地质*, 2022, 36(2): 418-426.]
- [46] Li J, Sun C J, Chen W, et al. Groundwater quality and associated human health risk in a typical basin of the eastern Chinese Loess Plateau. *Water*, 2022, 14(9): 1371. DOI: /10.3390/w14091371.
- [47] Zhou Sijie, Sun Congjian, Chen Wei, et al. Precipitation isotope characteristics and water vapor sources in summer in eastern Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1745-1761. [周思捷, 孙从建, 陈伟, 等. 黄土高原东部夏半年降水稳定同位素特征及水汽来源分析. *地理学报*, 2022, 77(7): 1745-1761.]
- [48] Zheng Li, Jin Xin, Jin Yanxiang, et al. Impacts of the increasing vegetation coverage on groundwater recharge in an alpine and arid endorheic river watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 140-152. [郑丽, 金鑫, 金彦香, 等. 高寒内陆河流域植被覆盖增加对地下水补给的影响. *生态学报*, 2023, 43(1): 140-152.]
- [49] Jin X, Jin Y X, Mao X F, et al. Modelling the impact of vegetation change on hydrological processes in Bayin River basin, Northwest China. *Water*, 2021, 13(19): 2787. DOI: /10.3390/w13192787.

Assessing water resource risks in inland river basins of Northwest China from water chemistry and runoff

WANG Shiyu^{1,2}, SUN Congjian^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}, ZHOU Sijie^{1,2}

(1. School of Geographical Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; 2. Research Center of Ecological environment in the middle reaches of the Yellow River, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: As an important strategic resource in the arid inland region of Northwest China, water resources are related to the sustainable development of the regional economy and society. As important regional water resources, inland river basins are highly sensitive to global climate change. In this study, we studied the typical inland river basins in the Qilian Mountains, Tianshan Mountains, and Kunlun Mountains. The regional runoff composition and its relationships with the main environmental factors were analyzed based on long-term runoff monitoring and water chemical isotope analysis data of precipitation, meltwater, river water, groundwater, and other water bodies. The results showed that: (1) Except for the Shiyang River, the annual runoff of most rivers in the study area showed an upward trend in recent decades; (2) Most of the water bodies in the study area were alkaline, and the dominant anion and cation of each water body were HCO_3^- and Ca^{2+} and Na^+ , respectively. The hydrochemical type was mostly HCO_3^- - Ca^{2+} , which is strongly affected by rock weathering. The TDS of river water showed a similar seasonal trend, being low in summer and autumn, but high in winter and spring. Meanwhile, the seasonal differences of each ion are relatively prominent. (3) Except for the Hutubi River, the variation trend for $\delta^{18}\text{O}$ was relatively consistent, showing the seasonal variation of low in summer and autumn while high in winter and spring throughout the year. (4) The average annual contributions of groundwater, precipitation, and glacier/snow meltwater to regional streamflow in the study area were 42.6%, 34.4%, and 23.0%, respectively, with spatial heterogeneity in regional runoff composition. (5) In the context of climate change, regional temperature variability will increase the risk of runoff changes in the Aksu, Hotan, and Shiyang rivers, whereas fluctuations in precipitation may pose potential risks to runoff processes in the Tizinafu and Shule river basins, and there are potential water quality risks in the Hotan River. The results of this study have strong implications for the sustainable use of regional water resources.

Keywords: inland river basin; hydrochemistry; stable isotope; streamflow components; Northwest China