

黄河源唐乃亥水文站水沙序列重建与变化规律研究

刘晶¹, 吉立¹, 李志威^{1,2}, 余国安³, 田世民⁴

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 101004; 4. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要:选用泽库气象站(1959~2011年)的降水量、唐乃亥水文站(1956~2011年)的年径流量、年输沙量分别与相邻位置的 $\delta^{18}\text{O}$ 测定序列构造相关关系,建立以10a为滑动期的降水量变化曲线、以5a和10a为滑动期的年径流量/年输沙量变化曲线(公元192~2003年),研究千年尺度的降水量和水沙变化规律。结果表明:除了以5a为滑动期的唐乃亥年输沙量率定方程外,其它拟合方程的 R^2 均大于0.6,相关性较高。黄河源的年径流量总体呈减小的趋势,但年输沙量变化趋势大致相同,其变化主要与降水量有关。以唐乃亥水文站为代表,1800a尺度上黄河源的年径流量/年输沙量的趋势变化可分为9个阶段,且5次呈增大趋势,4次呈减少趋势,表明水沙序列的长期变化呈多阶段性特征。

关键词:黄河源;径流量;输沙量;水沙重建;气候变化;相关分析

中图分类号:TV141

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)05-0034-08

河川地表径流是一种重要的水资源,径流量的变化直接影响水资源的开发与利用,而且对生态环境状况和社会经济发展产生一定的影响^[1]。黄河源多年年均径流量 $204.6 \times 10^8 \text{m}^3$,其地表水资源量是黄河全流域的34.4%,是黄河流域的主要产水区,其水资源状况和变化对我国西部地区和其中下游地区的生态环境具有重要影响^[2-3],比如如何合理开发和高效综合利用黄河中下游的水资源就需要考虑其源区径流量的变化历史与现状,且黄河上游梯级水库的使用寿命与其输沙量息息相关^[4]。

黄河源地处青藏高原东北部,近几十年人类活动加剧,区域蒸散发量加大,径流量明显减少^[5],引起了黄河源的一些问题^[6],如水资源短缺、水土流失严重、水旱灾害频发、生态环境恶化等。目前黄河源区生态环境呈整体恶化态势,水源涵养能力迅速下降,这对黄河流域的社会经济发展产生长期影响^[7]。黄河源区径流量变化对未来气候变化的响应十分明显,根据统计降

尺度(SDS)情景模拟表明未来黄河源区的径流量呈现显著减少的趋势^[8]。选取黄河源区的达日-玛曲段,对其近50年径流量数据进行分析可知,径流量年际发生变化的主要原因是气候发生了变化,人类活动对其影响较小^[9]。Chang^[10]以黄河源为研究区,根据1955~2005年的水文资料分析,得出温度的急剧升高导致蒸发量增加,其影响大于冰雪融化。全球气温的上升可能对海拔越高的地区的生态环境产生更显著影响,目前青藏高原区域受其影响环境发生变化,而这种变化会影响到河流系统,故研究黄河源径流量的变化趋势具有较重要意义^[15]。

黄河源径流和泥沙变化一直是黄河源区研究的热点问题,如赵仁荣等^[12]分析了黄河源区1960年代以来径流变化规律,指出径流变化主要受到黄河源降水量的变化影响,这个观点也为周德刚等^[13]所认同,同时植被退化和冻土消融也会对径流造成影响。多数学者都认为降水量的减少从根本上导致源区径流量的减

收稿日期:2017-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(91547112,91647118);湖南省教育厅优秀青年项目(16B010);水利部黄河泥沙重点实验室开放课题

基金项目(2017005);黄河水利科学研究院院长基金项目(HKY-JBYW-2016-03)

作者简介:刘晶(1992-),男,湖南邵东人,硕士研究生,主要从事河流动力学研究。E-mail:ljl10130@163.com

通讯作者:李志威(1984-),男,湖北云梦人,博士,副研究员,主要从事青藏高原河流动力学研究。E-mail:lzhiwei2009@163.com

少^[4],而气候变化又会影响降水。黄河源区径流量与气候变化存在密不可分的关系。

黄河源区作为全球气候变化的“放大镜”,区域内人类活动强度较低,水文气象要素相对真实地保持了自然状态,其侵蚀产沙过程和水文过程对全球气候的变化非常敏感。该地区的径流和输沙观测开始于1955年,基于实测资料无法研究百年、千年尺度上的水沙变化特征,故通过代用资料进行古径流量和古输沙量的重建,进而对黄河源长序列水沙变化特征进行研究既具有可行性,又具有参考价值。洞穴石笋沉积物的同位素是一种很好的代用资料,对气候因子(如降雨量)十分敏感,可进行1年尺度的高分辨率定,已被广泛应用于季风气候和季风降水的研究^[14],特别是近年Xu^[15-16]采用公元192~2003年万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,重建嘉陵江和江汉流域的降雨与径流量,并分析径流量变化规律。本研究基于张平等^[17]发表的公元192~2003年万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和泽库气象站的年降水量资料、唐乃亥水文站的实测水文资料,进行了年降水量、年径流量/年输沙量重建,建立了过去1800年黄河源区泽库气象站的年降水量序列,唐乃亥水文站的水沙序列,并分析其变化趋势与统计特征规律。重建近1800年来黄河源区水沙序列有助于认识黄河源区历史时期的水沙变化,为研究当前黄河水沙变化趋势提供参照,并为分析黄河河流地貌的历史演变提供水沙基础数据。

1 研究区域和资料

黄河源区位于青藏高原的东北部,是指唐乃亥水文站以上流域,面积12.2 km²,介于95°50′~103°30′E,32°32′~36°10′N。黄河发源于雅拉达泽山东坡的约古宗列曲,环绕阿尼玛卿山流向西北,到达唐乃亥^[18]。研究区水系河网密布,水量主要受降水量影响,冰川融水和地下水也对其产生一定的影响^[4]。

黄河源区干流从上游至下游,依次有玛多、吉迈、玛曲和唐乃亥4个控制性水文站(见图1)。玛曲和唐乃亥水文资料分别为1959~2003年、1956~2011年。降水资料来自黄河源10个代表性气象站(见图1)采集数据,分别为玛多(1953~2011年)、达日(1956~2011年)、久治(1959~2011年)、红原(1961~2011年)、若尔盖(1957~2011年)、玛曲(1967~2011年)、河南(1960~2011年)、泽库(1959~2011年)、同德(1955~2011年)和兴海(1960~2011年)。考虑地理空间距离和对于黄

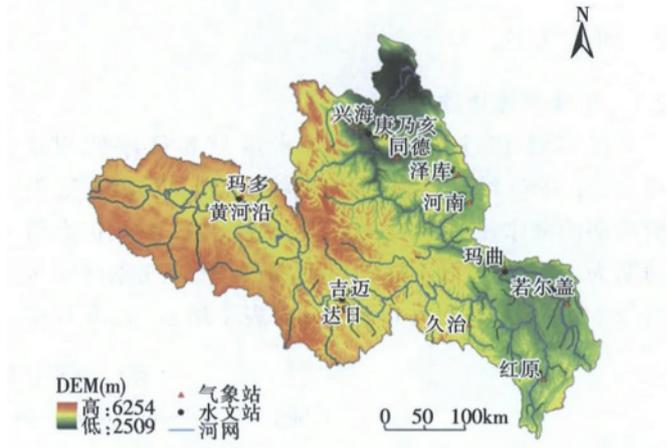


图1 黄河源气象及水文站点

Fig.1 The meteorology and hydrology stations in the Yellow River source area

河源的重要性,本研究选择唐乃亥水文站和泽库气象站。

作为目前较好的研究过去气候变化的历史档案,洞穴石笋具有丰富的气候代用指标、能准确确定年份、稳定的生长环境以及生长后后生变化微小甚至没有等优点^[19],并已成功使用在对亚洲季风变迁的历史、幅度、驱动因素等冰期/间冰期以及千年尺度上的研究^[20]。本次分析选用位于北方季风边缘区的甘肃武都万象洞的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列作为主要研究对象,研究区位于33°19′N,105°00′E,海拔1200m,处于典型季风系统交互作用的青藏高原东北部边缘,对季风的变化非常敏感^[21-22]。张平等2003年收集了一条从公元190年开始生长的118 mm长的石笋,发现记录的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的平均分辨率为2.5年,通过历史数据验证得到降水与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列密切相关^[17],其受人为活动等因素干扰很小。

黄河源区距离万象洞200~500 km,相距不远,且黄河源区和万象洞同处青藏高原东北部,接近亚洲季风边缘区,是典型季风系统交互作用的地带,对亚洲季风系统的进退消长十分敏感^[23],石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列反映了季风的变化,故 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在一定程度上可反映此地区的降水情况,虽存在误差,但可以反映整体变化情况。因此本文尝试采用 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行黄河源区长时间降水量序列和水沙序列重建,从而建立过去1800年泽库气象站的年降水量和唐乃亥水文站的年径流量/年输沙量。 $\delta^{18}\text{O}$ 序列数据来源于张平等^[17]发表的公元192~2003年万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录数据。

2 研究方法

2.1 年降水量重建方法

将实测 10 个气象站的降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 序列相联系,通过 SPSS 统计软件进行相关性分析,发现以 5a 为滑动期的降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关指标不高,因此扩大滑动期为 10a,得到以 10a 为滑动期的 10 个气象站降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的相关指标 R^2 ,如表 1 所示,选取其中

相关指标 R^2 最高的泽库气象站。通过 SPSS 对泽库气象站的降水数据和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行曲线分析,得到降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 序列之间的函数关系为指数关系: $T_{10m,ZK}=0.225\exp(-0.929\delta^{18}\text{O}_{10m})$,以此重建泽库气象站公元 192~2003 年的年降水量。图 2(a)为泽库气象站以 10 年滑动期的年降水量和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化,拟和线为 10a 滑动期,图 2(b)为年降水量和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图,同时添加并延长趋势线,为指数函数。

表1 降水量与 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关指标

Table1 The relevant coefficients between the precipitation and $\delta^{18}\text{O}$

气象站	玛多	达日	久治	红原	若尔盖	玛曲	河南	泽库	同德	兴海
R^2 (降水量)	0.150	0.204	0.736	0.375	0.371	0.508	0.349	0.803	0.471	0.095

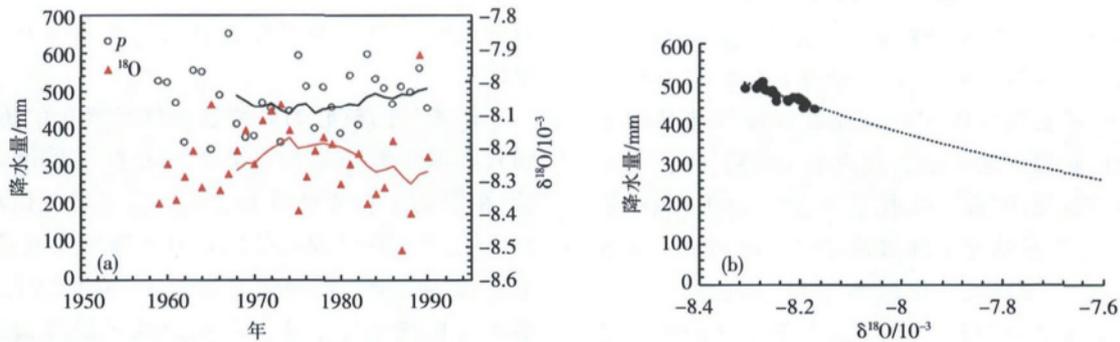


图2 泽库站年降水量及其与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系(10年滑动期)

Fig.2 The relationship between the annual precipitation and $\delta^{18}\text{O}$ load at Zeku meteorology station with 10-year moving average

2.2 年径流量/年输沙量重建方法

以 1959~2003 年定为率定期,将唐乃亥水文站实测的年径流量、年输沙量分别与 $\delta^{18}\text{O}$ 序列相联系,并以 5a、10a 为滑动期进行回归分析,找出两者相关性最高的函数关系。通过 SPSS 进行曲线分析,得出年径流量、年输沙量与 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的之间相关性最高的函数关系为指数关系,建立率定方程(见表 2)。编号 1、2 分别为以 5a 为滑动期的唐乃亥年径流量、年输沙量,编号 3 和 4 分别为以 10a 为滑动期的唐乃亥年径流量、年输沙量。以 5a 为滑动期的方程中, $Q_{s,5m,TNH}$ 的 R^2 较低为 0.352, $Q_{u,5m,TNH}$ 的 R^2 为 0.620,大于 0.6,相关程度较高,符合重建相关性要求。以 10a 为滑动期的方程中, R^2 均大于 0.6,其中 $Q_{u,10m,TNH}$ 大于 0.8,相关程度高。值得一提的是,将以 5a 为滑动期和以 10a 为滑动期的重建曲线进行比较,变化趋势基本相同,故以 5a 为滑动期的重建曲线具有较好的代表性,能够反映过去 1800 年黄河源区水沙变化特征。

表2 水沙率定方程

Table2 The flow and sediment calibration equations

编号	率定方程	R^2
1	$Q_{u,5m,TNH}=0.005992\exp(-1.2732 \delta^{18}\text{O}_{5m})$	0.620
2	$Q_{s,5m,TNH}=0.000286\exp(-1.8723 \delta^{18}\text{O}_{5m})$	0.352
3	$Q_{u,10m,TNH}=0.00068\exp(-1.5390 \delta^{18}\text{O}_{10m})$	0.839
4	$Q_{s,10m,TNH}=1.193\times 10^{-6}\exp(-2.5413 \delta^{18}\text{O}_{10m})$	0.619

2.3 降水量误差分析

以 10a 为滑动期,泽库气象站的原始年降水量与重建年降水量关系如图 3 所示,误差线为 $\pm 15\%$ 。由图 3 可得,泽库气象站的原始年降水量和重建年降水量基本吻合,除极个别年份外,绝大多数年份的相对误差小于 15%。泽库气象站的年降水量的相对误差绝对值的平均值为 8.31%,最大值为 29.73%,此属于极端情况,整体误差小,可以达到分析的要求。年降水量的误差主要是因为泽库气象站与万象洞虽地理位置接近,但仍存在一定距离,相距约 380 km。

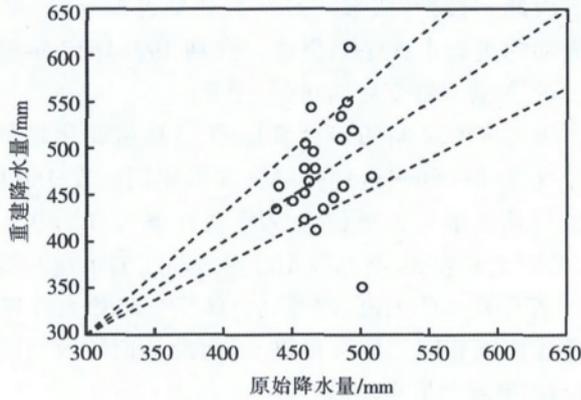


图3 泽库站原始年降水量与重建年降水量关系(10年滑动期)

Fig.3 The relationship between the original and reconstructed annual precipitation at the Zeku meteorology station with 10-year moving average

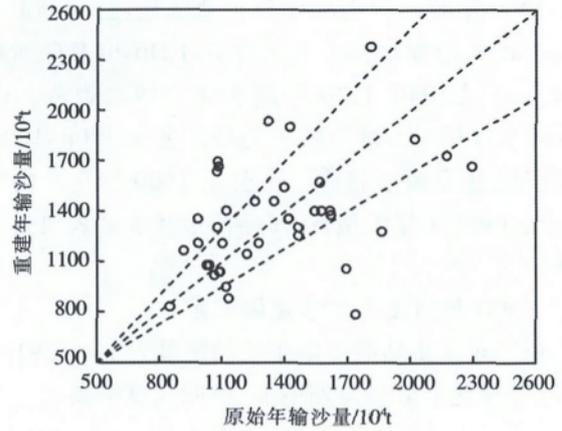


图5 唐乃亥站原始年输沙量与重建年输沙量关系(5年滑动期)

Fig.5 The relationship between the original and reconstructed annual sediment load at the Tangnaihai hydrometry station with 5-year moving average

2.4 年径流量/年输沙量误差分析

本文以 5a 为滑动期的重建曲线为代表进行分析,以 10a 为滑动期的重建曲线为对照曲线,故对以 5a 为滑动期的唐乃亥水文站年径流量、年输沙量进行误差分析。唐乃亥水文站原始年径流量/输沙量与重建年径流量/输沙量关系如图 4~5 所示,误差线均为±25%。

由图 4 可得,原始年径流量和重建年径流量大致吻合,绝大多数年份的相对误差小于 25%,但仍有较大值,属于极端情况。唐乃亥年径流量相对误差绝对值的平均值为 11.91%,1989 年相对误差最大为 33.86%。由图 5 可得,原始年输沙量和重建年输沙量较为吻合,但较年径流量整体比较散乱,大部分年份的相对误差小于 25%,存在一些年份超出 25%,但这些年份偏离不多,除极端情况外,大多年份与误差线较为接近。

唐乃亥年输沙量相对误差绝对值的平均值为 19.73%,其中有 6 年相对误差超过了 40%,此属于极端情况。

年径流量/年输沙量的误差主要是因为 $\delta^{18}O$ 记录来自于武都万象洞,与唐乃亥水文站相距 480km,地理位置上不重叠,此外岸滩演变、自然环境的改变和大坝修建等人为因素也会对年输沙量重建的准确性造成一定干扰,但误差总体是可以接受的。

3 公元 192~2003 年水沙变化

3.1 1800 年时段内降水量变化规律

西南季风带来的降水量效应对万象洞石笋 $\delta^{18}O$ 值的变化起主要影响,温度对其影响较弱^[20],故以 10a 为滑动期对黄河源降水量序列进行重建,以期获得黄河源 1800 年以来降水量的变化趋势。泽库气象站的降水量重建曲线如图 6 所示。

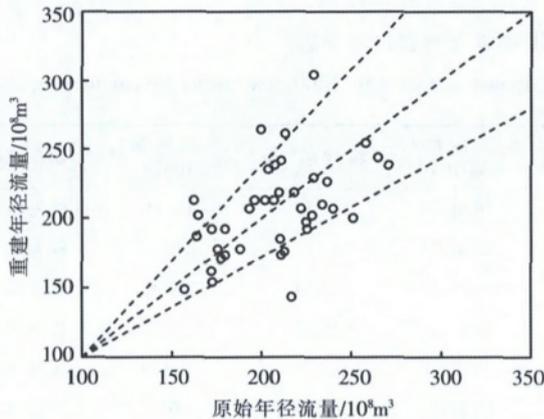


图4 唐乃亥站原始年径流量与重建年径流量关系(5年滑动期)

Fig.4 The relationship between the original and reconstructed annual runoff at the Tangnaihai hydrometry station with 5-year moving average

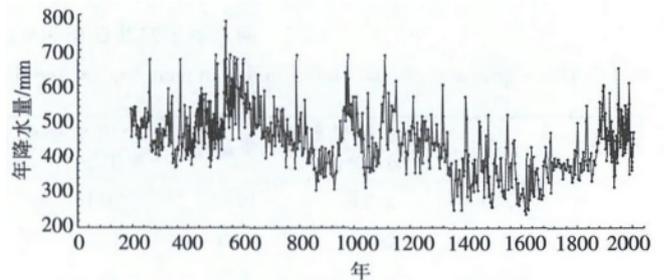


图6 泽库气象站的降水量重建曲线(10年滑动期)

Fig.6 The reconstructed curve of the precipitation at the Zeku meteorology station with 10-year moving average

泽库气象站公元 192~600 年的年降水量为增加的趋势,于公元 520 年左右年降水量达到最大值。公元 600~900 年的年降水量出现大幅度下降,于公元

900~1200 年间出现大幅度的波动变化:公元 900~980 年间表现为增加趋势,公元 980~1040 年表现为减小趋势,公元 1040~1120 年间表现为增加趋势,公元 1120~1200 年间表现为减小趋势。公元 1200~1600 年的年径流量为减小趋势,在公元 1600 年左右的年降水量为 1800 多年中最低。此后,年降水量表现为缓慢增大。

3.2 1800 年时段内水沙变化规律

唐乃亥水文站的多年年均径流量为 $199.42 \times 10^8 \text{m}^3$, 近 50 年变化趋势不特别明显,时间尺度需要进一步扩

大。因此,对唐乃亥水文站水文数据进行分析,以 5a 为滑动期进行水沙序列重建,得到 192~1958 年的年径流量/年输沙量变化曲线(见图 7)。

唐乃亥水文站的年径流量/年输沙量变化趋势与泽库气象站的降水量变化趋势大致相同,在 1800 年尺度唐乃亥水文站年径流量/年输沙量可分为 9 个阶段,见图 7 和表 3。虽然以 10a 为滑动期的重建曲线较 5a 而言存在一些大值,但是其总体变化趋势大致与 5a 的重建曲线相同,故分析以 5a 为滑动期的唐乃亥年径流量/年输沙量重建曲线。

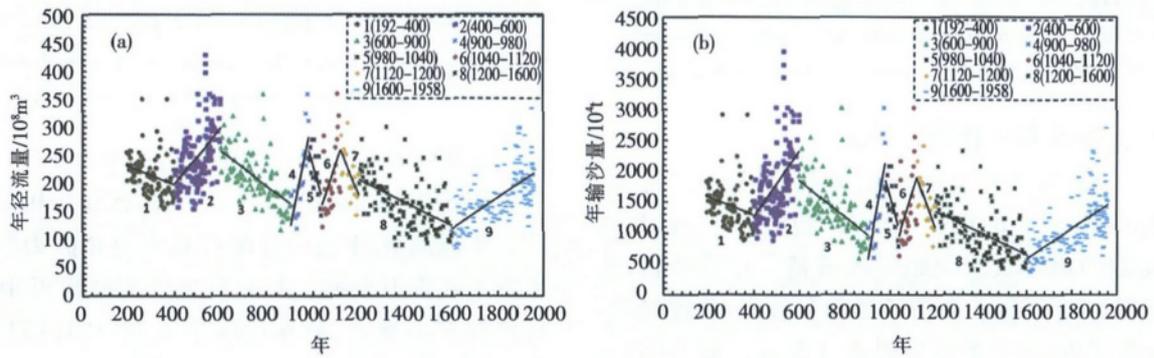


图 7 唐乃亥水文站年径流量与年输沙量重建及变化(5 年滑动期)

Fig.7 The reconstruction and changes of the annual runoff and sediment load at the Tangnaihai hydrometry station with 5-year moving average

此 9 个阶段的年径流量/年输沙量的均值、方差以及变化率见表 3,阶段 1 至阶段 7(192~1200)唐乃亥年径流量均值为 $225.54 \times 10^8 \text{m}^3$, 其中每一阶段均大于 $200 \times 10^8 \text{m}^3$, 而阶段 8 和阶段 9 (1200~1958)年径流量均值分别为 $166.90 \times 10^8 \text{m}^3$ 和 $177.75 \times 10^8 \text{m}^3$, 与前 1000 年相比,分别下降 26.00%、21.19%,年径流出现了大幅度下降,这可能与全球变暖、气候上

升、工业发展迅速有关。阶段 1 至阶段 7(192~1200)唐乃亥年输沙量均值为 $1556.57 \times 10^4 \text{t}$, 其中每一阶段均大于 $1400 \times 10^4 \text{t}$, 而阶段 8 和阶段 9(1200~1958)年输沙量分别为 $1008 \times 10^4 \text{t}$ 、 $1104.76 \times 10^4 \text{t}$, 与前 1000 年相比,分别下降 35.25%、29.03%,年输沙量减少的主要原因是径流量下降,其次还与自然条件的改变有关。

表3 唐乃亥水文站在1800年的分段年径流量/年输沙量(5年滑动)

Table3 The segmented annual runoff and sediment load at the Tangnaihai hydrometry station in 1800 years with 5-year moving average

阶段	年份	年径流量均值/ 10^8m^3	年径流量方差	年径流量变化率/ $10^8 \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	年径流量趋势	年输沙量均值/ 10^4t	年输沙量方差	年输沙量变化率/ $10^4 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	年输沙量趋势
1	192~400	215.68	35.42	-0.162	缓慢减小	1450.21	361.12	-1.460	缓慢减小
2	400~600	248.42	52.20	0.502	较大增大	1786.87	568.11	5.396	较大增大
3	600~900	211.49	44.78	-0.312	缓慢减小	1414.50	444.14	-2.966	缓慢减小
4	900~980	210.56	62.40	2.055	快速增大	1425.25	629.86	20.470	快速增大
5	980~1140	222.75	36.58	-1.395	快速减小	1517.84	355.66	-13.340	快速减小
6	1040~1120	208.96	59.68	1.216	快速增大	1406.14	603.86	12.040	快速增大
7	1120~1200	218.72	38.83	-1.043	快速减小	1479.65	386.98	-10.331	快速减小
8	1200~1600	166.90	45.01	-0.201	缓慢减小	1008.00	399.22	-1.748	缓慢减小
9	1600~1958	177.75	47.06	0.276	缓慢增大	1104.76	432.68	2.439	缓慢增大

3.3 唐乃亥 1959~2011 水沙数据分析

将唐乃亥 1959~2011 年水沙资料(实测数据)作为阶段 10 分析(见图 8),唐乃亥水文站的年径流量/年输沙量表现出减小的趋势,其中年径流量减小 $0.678 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。近 50 年,唐乃亥 1959~1990 年的多年年均径流量为 $216.70 \times 10^8 \text{ m}^3$,而 1991~2011 年的多年平均值为 $178.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,近 20 年较多年平均减少了 17.73%,说明唐乃亥近 20 年的径流量正出现较大

幅度减少,这很可能与全球气候变暖及相应的降水量减少有关。同时,径流量的减少也会导致输沙量的减少。唐乃亥 1959~2011 年输沙量减小的趋势为 $6.3154 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。1959~1990 年的多年年均输沙量为 $1409.60 \times 10^4 \text{ t}$,而 1991~2011 年的数据为 $962.59 \times 10^4 \text{ t}$,比多年平均值减少了 31.71%。因此,黄河源唐乃亥站径流量和输沙量均呈减少趋势,下一步需要从流域尺度深入分析减水减沙的根本原因和驱动力。

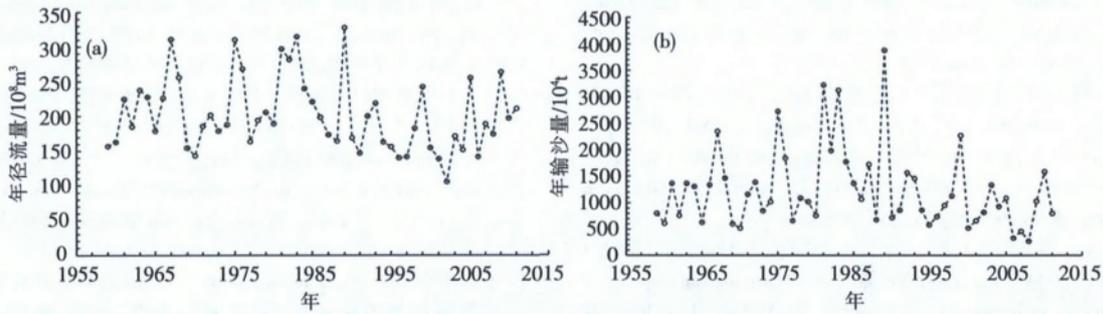


图 8 1959~2011 年唐乃亥径流量与输沙量变化

Fig.8 The changes of the annual runoff and sediment load at the Tangnaihai hydrometry station during 1959–2011

4 结论

唐乃亥水文站公元 192~1958 年年径流量/年输沙量可分为 9 个趋势阶段:阶段 3 至阶段 7 变化较明显。阶段 3(公元 600~900 年)年径流量、年输沙量呈现 300 年的减小趋势,减小趋势分别为 $0.312 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $2.966 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。阶段 4 至阶段 7(公元 900~1200 年)对应于北宋和南宋,年径流量/年输沙量在较短时间内呈现快速增加、快速减少,然后又快速增加,最后快速减小,这可能受气候变化的影响。

近 20 年,国内学者对黄河源径流量减少展开了不少的研究,对于径流量减少的原因有不少观点,如气温变暖引起蒸发加剧^[24]、降水变少^[25]、生态环境进一步整体恶化^[26]、人类活动加剧和地表植被衰退^[27],但降水量减少是引起源区径流量减少的根本原因这一观点得到了多数学者的认可与支持。根据年降水量和水沙重建曲线,在过去 1800 年,本区域人类文明发展程度不高,黄河源生态环境未遭到严重破坏,故黄河源的年径流量变化主要与降水量有关。黄河源年径流量呈减小趋势,除降水因素影响外,还可能与生态环境遭到破坏和全球气候变暖等因素有关,具体原因仍需进一步研究。

本研究中黄河源年径流量/年输沙量的长序列历史重建仍具有不确定性:(1) $\delta^{18}\text{O}$ 序列数据来源于甘肃

武都万象洞,其位置处于青藏高原边缘,及与黄土高原之间的过渡带,虽然与黄河源地理位置接近,但仍有一定的空间距离。(2)对 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和唐乃亥水文站的年径流量/年输沙量,采用 SPSS 统计软件进行相关性分析,同时进行非线性拟合,得出的相关系数较高,但没有其它实测数据加以佐证,故具有一定的局限性。(3)过去 1800 年内存在突发事件或极端气候,这些因素可能影响黄河源年径流量/年输沙量重建曲线的准确性。

参考文献:

- [1] 李二辉,穆兴民,赵广举. 1919~2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014,25(2):155–163. (LI Erhui, MU Xingmin, ZHAO Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919 to 2010[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2):155–163.(in Chinese))
- [2] 刘希胜,李其江,段水强,等. 黄河源径流演变特征及其对降水的响应[J]. 中国沙漠, 2016,(6):1721–1730. (LIU Xisheng, LI Qijiang, DUAN Shuiqiang, et al. Runoff change and responses to precipitation in the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Desert Research, 2016,(6):1721–1730. (in Chinese))
- [3] 苏中海,陈伟忠. 1956~2012 年黄河源区径流变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2016,(22):178–180. (SU Zhonghai, CHEN Weizhong. Analysis on runoff variation characteristics of Yellow River source region from 1956 to 2012[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016,(22):178–180. (in Chinese))
- [4] 李志威,王兆印,田世民,等. 黄河源水沙变化及与气温变化的关系[J]. 泥沙研究, 2014,(3):28–35. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, TIAN Shimin, et al. Variation of streamflow and sediment discharge rate

- and relationship with temperature change in Yellow River source area[J]. *Journal of Sediment Research*, 2014,(3):28–35. (in Chinese)
- [5] 郝振纯,王加虎,李丽,等. 气候变化对黄河源区水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2006,28(1):1–7. (HAO Zhenchun, WANG Jiahu, LI li, et al. Impact of climate change on runoff in source region of Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006,28(1):1–7. (in Chinese))
- [6] 蓝永超,沈永平,李州英,等. 气候变化对黄河源区水资源系统的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006,20(6):57–62. (LAN Yongchao, SHEN Yongping, LI Zhouying, et al. Influences of global-warming on water resources system in the riverhead area of the Yellow River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006,20(6):57–62. (in Chinese))
- [7] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报, 2008,39(1):52–58. (JIA Yangwen, GAO Hui, NIU Cunwen, et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008,39(1):52–58. (in Chinese))
- [8] 赵芳芳,徐宗学. 黄河源区未来气候变化的水文响应[J]. 资源科学, 2009,31(5):722–730. (ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Hydrological response to climate change in headwater catchment of the Yellow River basin[J]. *Resources Science*, 2009,31(5):722–730. (in Chinese))
- [9] 姜世中. 黄河源区达日至玛曲段近 50 年径流量变化趋势分析[J]. 地理研究, 2008,27(1):221–228. (JIANG Shizhong. Analysis on variety trend of runoff between Dari and Maqu in the headwater region of Yellow River in the past 50 years[J]. *Geographical Research*, 2008,27(1):221–228. (in Chinese))
- [10] Chang G, Li L, Zhu X, et al. Influencing factors of water resources in the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007,17(2):131–140.
- [11] Lu X X, Zhang S, Xu J. Climate change and sediment flux from the roof of the world[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010,35(6):732–735.
- [12] 赵仁荣,陈海潮,朱松立,等. 黄河源区径流变化及原因分析[J]. 人民黄河, 2007,29(4):15–16. (ZHAO Renrong, CHEN Haichao, ZHU Songli, et al. The runoff change and reasons analysis in catchment area of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2007,29(4):15–16. (in Chinese))
- [13] 周德刚,黄荣辉. 黄河源区径流减少的原因探讨[J]. 气候与环境研究, 2006,11(3):302–309. (ZHOU Degang, HUANG Ronghui. Exploration of reason of runoff decrease in the source regions of the Yellow River[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006,11(3):302–309. (in Chinese))
- [14] 王建明, 王建力, 李廷勇. 洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 气候意义研究[J]. 热带地理, 2008,28(5):395–399. (WANG Jianming, WANG Jianli, LI Tingyong. The paleoclimatic significance of carbon and oxygen stable isotopes in speleothems[J]. *Tropical Geography*, 2008,28(5):395–399. (in Chinese))
- [15] Xu J X. River flow reconstruction using stalagmite oxygen isotope[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,529:559–569.
- [16] Xu J X. Paleo-hydrologic reconstruction based on stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and reassessment of river flow above the Danjiangkou dam[J]. *Climatic Change*, 2015,130:619–634.
- [17] Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record[J]. *Science*, 2008,322(5903):940–2.
- [18] 程志刚,刘晓东,范广洲,等. 21 世纪长江黄河源区径流量变化情势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2010,19(11):1333–1339. (CHENG Zhigang, LIU Xiaodong, FAN Guangzhou, et al. Trends in runoff of the source region of the Yangtze River and the Yellow River for 21st century[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010,19(11):1333–1339. (in Chinese))
- [19] 张德忠,张平中,桑文翠,等. 石笋密度蕴含的过去气候变化信息:以末次冰消期黄土高原西部武都万象洞石笋为例[J]. 科学通报, 2010,55(31):3040–3047. (ZHANG Dezhong, ZHANG Pingzhong, SANG Wencui, et al. Implications of stalagmite density for past climate change: an example from stalagmite growth during the last deglaciation from Wanxiang cave, western loess plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010,55(31):3040–3047. (in Chinese))
- [20] 杨勋林,张平中,陈发虎,等. 近 50 a 来青藏高原东部高海拔洞穴现代石笋氧同位素组成及其含义[J]. 科学通报, 2007,52(6):698–706. (YANG Xunlin, ZHANG Pingzhong, CHEN Fahu, et al. Modern stalagmite oxygen isotopic composition and its implication from a high-elevation cave in the eastern Qinghai-Tibetan plateau over the past 50 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007,52(6):698–706. (in Chinese))
- [21] 张平中,陈一萌, Johnson K R,等. 甘肃武都万象洞滴水与现代石笋同位素的环境意义[J]. 科学通报, 2004,49(15):1529–1531. (ZHANG Pingzhong, CHEN Yimeng, Johnson K R, et al. Environmental significance Wudu Wanxiang cave dripping with modern stalagmite isotope[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004,49(15):1529–1531. (in Chinese))
- [22] 张平中. 中国青藏高原东部石笋氧同位素记录的气候变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007. (ZHANG Pingzhong. *Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Record of Climate Change on Eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese))
- [23] 刘敬华. 近 500 年来黄土高原西部降水变化的高分辨率石笋记录及其与历史文献记载的对比研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. (LIU Jinghua. *A Comprehensive Research of Asian Monsoon Precipitation Variation by High Resolution Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ Record and Historical Documents in the Western Loess Plateau over the Past 500 Years*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese))
- [24] 刘猛,夏自强,李俊芬,等. 全球气候变暖背景下黄河源区蒸发变化研究[J]. 人民黄河, 2008,30(9):30–31. (LIU Meng, XIA Ziqiang, LI Junfen, et al. Study on evaporation variation of headwater region of the Yellow River under the conditions of global climate warm up[J]. *Yellow River*, 2008,30(9):30–31. (in Chinese))
- [25] Guo W. Q., Yang T. B., Dai J. G., et al. Vegetation cover changes and their relationship to climate variation in the source region of the Yellow River, China, 1990–2000[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008,29(7):2085–2103.
- [26] 孙卫国,程炳岩,李荣. 黄河源区径流量与区域气候变化的多时间尺度相关[J]. 地理学报, 2009,64(1):117–127. (SUN Weiguo, CHENG Bingyan, LI Rong. Multitime scale correlations between runoff and regional climate variations in the source region of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(1):117–127. (in Chinese))
- [27] 张永勇,张士锋,翟晓燕,等. 三江源径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2012,67(1):71–82. (ZHANG Yongyong, ZHANG Shifeng, ZHAI Xiaoyan, et al. Runoff variation in the three rivers source region and its response to climate change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(1):71–82. (in Chinese))

Reconstruction of Runoff-sediment Sequences and Its Change Law at Tangnaihai Hydrometry Station in Yellow River Source Area

LIU Jing¹, JI Li¹, LI Zhiwei^{1,2}, YU Guoan³, TIAN Shimin⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100104, China;

4. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The precipitation data from the Zeku Meteorology Station during 1959–2011, annual runoff and sediment discharge data from the Tangnaihai Hydrometry Station during 1956–2011 were taken to established correlation with $\delta^{18}\text{O}$ determination sequences of the adjacent position (Wanxiang Cave in Gansu Province). This paper studied the changes of precipitation and runoff-sediment sequence in the millennium scale which based on the establishment of the variation curves of precipitation with 10-year moving average, and the annual runoff and sediment discharge with 5-year moving average and 10-year moving average. The results show that R^2 values of the fitting equations are all greater than 0.6 except the calibration equation of annual sediment discharge at the Tangnaihai Hydrometry Station with 5-year moving average, and the correlation is relatively high. The annual runoff of the Yellow River source is decreasing while the trend of annual sediment discharge is approximately the same, and its changes are mainly related to precipitation. At the Tangnaihai Hydrometry Station, the changes of annual runoff and sediment discharge in the 1800a scale can be divided into 9 stages, of which 5 stages show an increasing trend and the other 4 stages show a decreasing trend.

Key words: Yellow River source; runoff; sediment discharge; flow-sediment reconstruction; climate change; correlation analysis

收稿日期:2017-07-10;修回日期:2017-09-15;录用日期:2017-10-10;责任编辑:王金星

(上接第 74 页)

[5] 杨建青,王金星,章树安,等. 土壤水分监测仪器野外测试分析研究[J]. 水文,2012,32(5):57-61.(YANG Jianqing, WANG Jinxing,ZHANG Shu'an,et al. Comparison on performance of soil moisture monitoring sensors through field monitoring study [J],Journal of China Hydrology,2012,32(5):57-61. (in Chinese))

[6] 智永明,韩继伟,邓超,等. 基于原状土柱土壤水分传感器率定方法的研究[J].水文,2016,36(4):48-52.(ZHI Yongming, HAN Jiwei, DENG Chao, et al,Soil moisture sensor calibration method based on undisturbed soil column[J]. Journal of China Hydrology,2016,36(4):48-52. (in Chinese))

[7] 章树安,林祚顶. 土壤墒情监测与分析预测应用技术[M].长春:吉林大学出版社,2017.(ZHANG Shuan,LIN Zuoding. Application of Soil Moisture Monitoring and Analysis Forecasting[M].Changchun: Jilin University Press,2017. (in Chinese))

[8] NY/T 1782-2009,农田土壤墒情监测技术规范[S].(NY/T 1782-2009, The Technical Rules for Soil Moisture Monitoring in Farmland[S]. (in Chinese))

[9] 邹文安,徐立萍,徐加林. 便携式土壤水分采集仪标定的探讨[J].水文,2013,33(3):43-46.(ZOU Wenan,XU Liping,XU Jialin. Portable soil moisture collecting instrument calibration research [J].Journal of China Hydrology,2013,33(3):43-46. (in Chinese))

Dielectric Type Soil Moisture Sensor Formula Calibration Based on Ring Knife Weighing Method

ZOU Wenan¹,LV Shougui²,JIN Fuyi³

(1. Hydrology and Water Resources Bureau of Jilin Province, Changchun 130022,China;

2. Tonghua Hydrology Water Resources and Survey Bureau of Jilin Province,Tonghua 134000,China;

3. Hydrological Bureau of Liaoning Province,Shenyang 110003,China)

Abstract:The sensor is an important part of the automatic monitoring equipment of soil moisture, which is the core device that determines the accuracy of moisture monitoring data. It is very important to scientifically and rationally calibrate the sensor accuracy. Based on the actual production, according to the relevant technical specifications and literature results, this paper systematically described the dielectric type soil moisture sensor formula calibration based on ring knife weighing method, according to the principle that the measured medium apparent sensor output signal will change with the soil moisture changing, so as to provide reference for further standardizing the process and technical requirements of the laboratory soil moisture sensor, and provide technical support for study on the soil physical characteristics, soil moisture experiment, and moisture monitoring and evaluation.

Key words: dielectric class; soil moisture sensor; backwater weighing; calibration formula