

文章编号:1000-0240(2001)01-0028-06

# 气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响

王建, 沈永平, 鲁安新, 王丽红, 史正涛

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘 要:** 选择祁连山黑河流域作为中国西北地区山区积雪流域的典型代表, 分析了1956—1995年40 a以来气候、积雪变化的状况和特点以及春季融雪径流的波动趋势。利用融雪径流模型(Snowmelt Run-off Model-SRM)和卫星遥感数据模拟气温上升框架下的融雪径流变化情势。结果表明: 中国西北地区山区的气候变化主要表现在年平均气温的缓慢上升而降水基本平稳, 年内气温的上升幅度以1~2月份比较强烈, 而3~6月融雪期的气温并没有大的变化, 导致融雪期在时间尺度上的扩大, 融雪径流呈慢增加趋势且受径流周期变化控制, 融雪径流峰值在时间上前移。

**关键词:** 气候变化; 融雪径流; 径流变化情势

**中图分类号:** P467 **文献标识码:** A

## 1 引言

冰川积雪作为气候变化的指示器之一, 对全球变暖具有明显的反馈响应, 同时, 气候变化又将会促使冰川运动与积雪分布相应的波动。寒区和干旱区水文的研究和冰川积雪的研究是相互促进发展的<sup>[1]</sup>。目前大量的科学研究结果证实了气温的升高已经影响北半球、高亚洲乃至中纬度流域尺度山区积雪的重新分布以及趋势变化。李培基的研究结果表明: 青藏高原积雪变化绝非偶然性过程, 它具有确定的长期增长的趋势, 36 a来高亚洲地区、西藏地区和青海地区年累积积雪深度分别增加1.9%、2.9%和1.0%<sup>[2]</sup>; 王世杰利用 NOAA/AVHRR 遥感资料对天山积雪量的估算方法进行了研究<sup>[3]</sup>; 徐俊荣等通过对天山地区30 a冬季降雪波动研究后证实: 1961—1990年的30 a中, 天山广大地区冬季降雪有增加的趋势<sup>[4]</sup>; 柯长青等通过10 a的SMMR微波候积雪深度以及55个基本气象台站的资料分析认为: 从20世纪60年代到80年代积雪年际波动振幅在明显增加, 这可能是全球变暖对青藏高原积雪影响的一个突出表现<sup>[5]</sup>。对于以流域为尺度的中国西北地区中纬度山区积雪对气温升高的

响应, 尤其是积雪变化所引起的融雪径流水资源年际与年内分配变化<sup>[6, 7]</sup>, 将直接影响到区域水资源的重新分配和新的用水管理模式与策略<sup>[8, 9]</sup>。可以说在中国西北地区, 研究流域尺度气候变化对山区融雪径流水资源趋势的影响更具有实用性和针对性。

## 2 流域的选择

选择河西走廊中部的黑河流域(莺落峡以上山区范围)作为实验流域。其水资源补给在春季主要是以融雪径流方式为主, 因此, 融雪水资源将直接影响下游地区的农业、工业以及人畜用水。同时, 黑河流域在一定程度上代表了西北地区典型流域的地理和气候环境特点, 也可反映气候变化对中国西北地区山区融雪径流趋势的影响。

黑河流域位于河西走廊中部, 流域面积10 009 km<sup>2</sup>, 分东西两支在青海省祁连县境内黄藏寺交汇后进入峡谷, 至莺落峡出山。水源来自祁连山高山冰雪融水和降水补给。流域内主要河流有黑河、白舌口河、大野口河等, 代表台站的多年气温降水分布特点如表1所示。流域内降雨一般集中在6~9月, 占全年降水总量的61%~81%。而农业生产用

收稿日期: 2000-04-27; 修订日期: 2000-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(49871021); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新项目(CACX210018); 中国科学院重大项目(KZ951-B1-212)资助

作者简介: 王建(1963—), 男, 江苏沙洲人, 副研究员, 1989年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获理学硕士学位, 现主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: wjian@ns.lzb.ac.cn

水量最为迫切的3~6月降水量只占全年降水总量的19%<sup>[10]</sup>。黑河流域以海拔3 600 m为高山冰雪冻土带和山区植被带的分界线。高山冰雪冻土带下垫面主要由冰川、积雪、多年冻土和高山草垫等组成,而山区植被带下垫面主要由草丛、灌木和水源涵养林等组成<sup>[11]</sup>。按照积雪分布特征,可分为三个垂直高度带(表2)。

表1 流域代表台站基本特性一览表

Table 1 Basic factors of typical stations in the Heihe Basin

| 地名  | 经度       | 纬度      | 年平均气温<br>/℃ | 年降水量<br>/mm | 海拔<br>/m |
|-----|----------|---------|-------------|-------------|----------|
| 冰沟  | 100°13'E | 38°04'N | -2.7        | 491.7       | 3 500    |
| 祁连  | 100°14'E | 38°12'N | 0.7         | 394.7       | 2 787    |
| 祁连山 | 100°12'E | 38°46'N | 5.6         | 364.0       | 2 236    |
| 高台  | 99°45'E  | 39°23'N | 8.2         | 106.4       | 1 355    |
| 鼎新  | 99°45'E  | 40°20'N | 7.9         | 31.0        | 1 240    |

表2 黑河流域垂直高度分带

Table 2 Three zones of the Heihe Basin

| 高度带 | 海拔/m        | 积雪特征(春季) | 代表台站 |
|-----|-------------|----------|------|
| A   | <2 700      | 瞬时积雪     | 高台   |
| B   | 2 700~3 400 | 斑状积雪     | 祁连   |
| C   | >3 400      | 连续性积雪    | 冰沟   |

### 3 气候变化事实

#### 3.1 资料来源

本文应用的资料来源于流域内所有的气象站、水文站及流域外接近流域边缘的气象和水文台站共46个,资料期间为1956—1995年,但其中有部分台站从20世纪60年代才开始有数据记录。

#### 3.2 气温和降水变化

黑河流域的气温和降水变化及其趋势如图1~图4所示(黑粗线为平滑趋势线)。从40 a的统计结果中可以总结其气温和降水变化的一般情势:

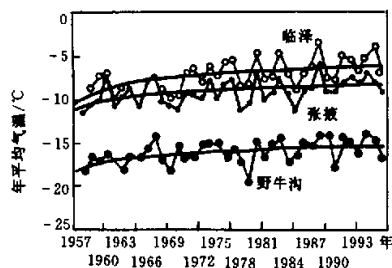
图1 黑河流域1956—1995年  
年平均气温曲线及其趋势

Fig. 1 Annual mean air temperature from 1956 to 1995 in the Heihe Basin with its changing trend

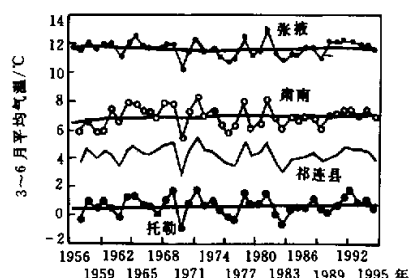
图2 黑河流域1956—1995年3~6月  
平均气温曲线及其趋势

Fig. 2 March~June mean air temperature variation in the Heihe Basin with its changing trend

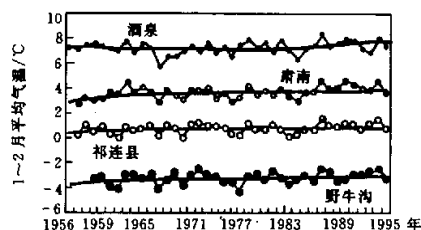
图3 黑河流域1956—1995年1~2月  
平均气温曲线及其趋势

Fig. 3 January and February mean air temperature variation in the Heihe Basin with its changing trend

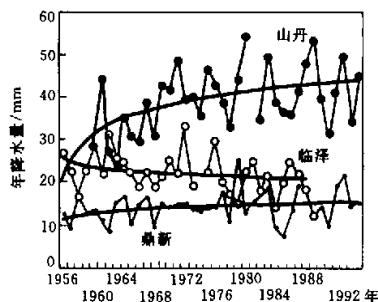
图4 黑河流域1956—1995年  
年降水曲线及其趋势

Fig. 4 Annual precipitation from 1956 to 1995 in the Heihe Basin with its changing trend

(1) 近40 a的年平均气温呈上升趋势,升高幅度约0.7~1.2℃左右,而3~6月融雪期间的月平均气温基本上没有变化;

(2) 冬季1~2月气温上升幅度较大,平均升高1.5~3.7℃左右;

(3) 降水变化基本平稳。

### 3.3 积雪分布变化

本研究试图利用卫星遥感图像分析积雪的整体分布,但由于资料来源贫乏、时段短、不连续和云覆盖等因素的限制,使得卫星遥感数据无法表现流域雪盖面积的整体状况以及积雪量和积雪深度的年际变化。因此,在研究中,地面气象、水文台站的降雪量仍被作为对流域积雪分布分析的基础数据,从气候统计学的角度来探讨黑河流域积雪变化趋势及其波动特征。为了避免液态降水和固态降水混淆,根据野外考察,采用冬季10月底至来年4月底以前的资料,期间降水均为固态。

#### 3.3.1 降雪趋势分析

黑河流域各台站的年降雪量变化可以通过年降雪量曲线和相应的趋势线来表达和反映,如图5~图7给出的三个不同高度带典型台站1956—1995年的年降雪量曲线。粗线表示部分台站对原始数据进行二次移动平滑处理后的相应值。图8是所有台站平均年降雪量曲线及相应的滑动曲线。从中可以发现年降雪量的分布表现为周期性的波动,20世纪70年代到80年代中期处于低值区变化,而80年代至今年降雪量呈上升。

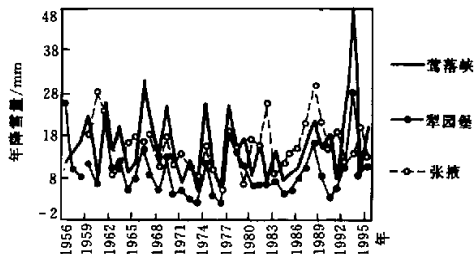


图5 海拔1700 m以下年降雪量曲线和相应的趋势线  
Fig. 5 Annual cumulated snowfall below 1700 m a. s. l. with its changing trend

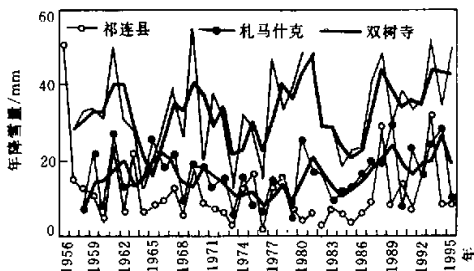


图6 海拔2500 m左右年降雪量曲线和相应的趋势线  
Fig. 6 Annual cumulated snowfall at about 2500 m a. s. l. with its changing trend

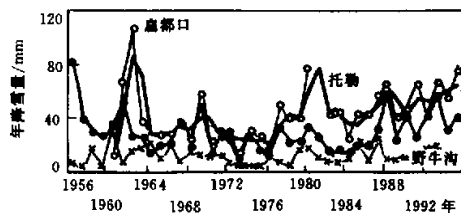


图7 海拔3200 m以上年降雪量曲线和相应的趋势线  
Fig. 7 Annual cumulated snowfall over 3200 m a. s. l. with its changing trend

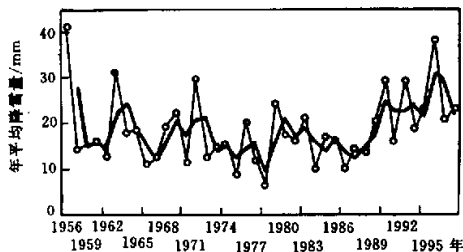


图8 1956—1995年平均降雪量曲线和相应的趋势线  
Fig. 8 Annual mean cumulated snowfall from 1956 to 1995, together with its changing trend

#### 3.3.2 气温上升对降雪量的影响

流域的气温上升并没有带来降水的强烈波动,40 a来年平均降水量的变化趋势依然平稳。但是,降雪量的周期变化目前正处在一个高值区波动(如图8所示),而黑河流域台站40 a来1~2月的年平均气温波动也相应处在一个高值区变化(如图9所示)。可以认为:当气温变化主要集中在冬季的气温上升时,降雪量将相应地增加,其增加的趋势和周期与冬季1~2月的平均气温变化相关。通过统计,气温上升引起的降雪量增加达7%~10%。

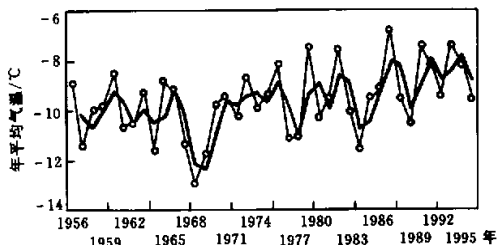


图9 黑河流域40年1~2月平均气温和移动平滑处理趋势曲线  
Fig. 9 Mean air temperature of Jan.—Feb. over 40 years in the Heihe Basin with its moving trend curve

4 气温上升下的融雪径流情势

在黑河流域及西北地区的其他内陆河流域,季节性融雪径流是春汛期间河流的主要补给源。积雪消融对农牧业生产、土壤墒情、水库运行调度具有指导意义。河西地区流域是以冰雪融水补给为主,尤其在春季消融季节,降水稀少,来水量的 75% 左右来源于积雪消融。而农业用水也集中在 3~6 月,形成了春季农业生产的“卡脖子旱”,因此,分析气候变化下的融雪径流情势可为决策部门提供新的水资源管理模式。

4.1 融雪径流时空变化

通过对流域出口莺落峡水文站 1956—1995 年的月平均流量作变差系数分析(如图 10 所示),结果表明 40 a 来径流的月平均流量变化主要集中在 4 月中旬到 10 月中旬,而冬季基本处于稳定状态。很明显,春季融雪径流和夏季降水是这一时段径流趋势波动的主要影响因素。通过分析发现,40 a 来年平均流量空间变化有所增加但是不显著,包括峰值流量都基本平稳。一个值得注意的变化是峰值流量区域在时间上变宽,即积雪消融时间提前并使得整个融雪径流季节拉长,其原因是降雪时间及相应的融雪时间的提前。图 11 显示了从 80 年代中期开

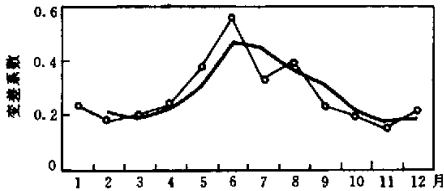


图 10 莺落峡水文站月平均流量变差系数曲线及相应的滑动平均曲线(粗线)

Fig. 10 Curve of different coefficient of monthly mean runoff in the Yinluoxiao Station over 40 years

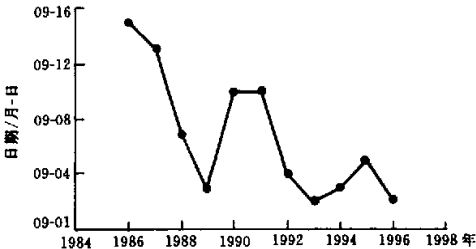


图 11 祁连山冰沟站 1985—1995 年年内第一次降雪日期曲线  
Fig. 11 First day of snowfall in Binggou Section, Qilian Mountains, since 1984

始,祁连山冰沟站(原中国科学院兰州冰川冻土研究所自设站)观测的年内第一次降雪日期的变化,其趋势是逐步前移至 9 月初。提前的降雪使得土壤湿度和饱和度达到产流条件,同时由于冬季气温的上升,也导致了季节性积雪消融在时间上相应的提前。据考察和统计融雪径流的开始时间已从传统的 4 月中旬前移 10 d 左右。

4.2 利用 SRM 模型模拟气温上升+4℃的融雪径流情势

SRM(Snowmelt Runoff Model)模型被认为是目前最为成功的模拟融雪径流过程的模型,遥感技术的使用是此模型在精度上较传统水文模型有很大提高的主要原因,其基本原理是利用度一日因子作为控制积雪消融的条件,用流域积雪覆盖率变化控制产流的过程<sup>[12, 13]</sup>。世界气象组织将其作为推荐模型应用于全球大部分高山雪盖地区,并普遍获得成功。其基本形式如下:

$$Q_{n+1} = [Q_n a_n (T_n + DT_n) S_n + c R_n P_n] (A / 10\,000 / 86\,400) (1 - K_n + 1) + Q_n K_n + 1$$

式中:  $Q$  为流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $c$  为径流系数;  $a$  为度一日因子 ( $\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $T$  为温度日数 ( $^\circ\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $DT$  为气温递减率 ( $^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ );  $S$  为雪盖面积百分比(%);  $P$  为降水 (mm);  $A$  为流域或带的面积 ( $\text{km}^2$ );  $K$  为衰退系数;  $N$  为日期。

为便于理解,将模型简化为  $Q \cong f(S, T, P)$ , 即流量是雪盖面积、气温和降水的函数,其中雪盖面积可以通过卫星遥感数据获得。1998 年 SRM 增加了气候变化对融雪径流影响模拟的模块,可以提供气温上升框架下的融雪径流模拟。本文给出一个在气温上升+4℃的框架下模拟的 1986 年融雪径流情势,结果如图 12 所示。很明显,气温上升带来融雪径流变化情势将在时间上造成前移以及消融前期流量的增加和后期流量的减少。

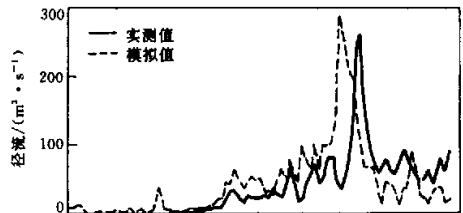


图 12 利用 SRM 模型模拟黑河流域 1986 年气温上升+4℃框架下的春季融雪径流情势

Fig. 12 Simulated discharge curve under temperature increase of +4℃ in 1986 in the Heihe Basin by the SRM-model

## 5 结论

全球变暖对中国西北中纬度山区的影响程度虽然不及其它地区明显和剧烈,但是年平均气温的缓慢增加以及冬季较大的升温,已经对流域的径流分布产生作用并直接影响流域内的经济活动,尤其是会改变农业生产的用水时间表。最为显著的径流过程波动是融雪径流及其峰值在时间上的提前,而流量也相应地有所增加。

## 参考文献(References):

- [1] Kang Ersi. Review and prospect of hydrological studies in cold and arid regions in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2), 178—151.
- [2] Li Peiji. Monitoring on snowcover for High Asia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl.): 105—114. [李培基. 高亚洲积雪监测[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 105—114.]
- [3] Wang Shijie. Exploring the estimation of snowpack volume with NOAA/AVHRR satellite data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20: 68—73. [王世杰. 利用 NOAA/AVHRR 影像资料估算积雪量的方法探讨[J]. 冰川冻土, 1998, 20: 68—73.]
- [4] Xu Junrong, Qiu Jiaqi. Study of winter snowfall influence in Tianshan area since 1960's [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl.): 123—138. [徐俊荣, 仇家琪. 天山地区 30 年来冬季降雪波动研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 123—138.]
- [5] Ke Changqing, Li Peiji. Research on the characteristics of distribution and variation of snow cover on the Tibetan Plateau by using EOF analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 64—67. [柯长青, 李培基. 用 EOF 方法研究青藏高原积雪深度分布与变化[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 64—67.]
- [6] Lan Yongchao, Kang Ersi. Changing trend and features of the runoff from mountain areas of some main rivers in the Hexi inland region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 147—152. [蓝永超, 康尔泗. 河西内陆干旱区主要河流出山径流特征及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 147—152.]
- [7] Ding Yongjian, Ye Baisheng, Liu Shiyang. Impact of climate change on the alpine streamflow during the past 40 a in the middle part of the Qilian Mountains, Northwestern China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(3): 193—199. [丁永建, 叶佰生, 刘时银. 祁连山中部分地区 40 a 来气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 193—199.]
- [8] Wang Jian, Li Wenjun. Establishing simulated model of snowmelt runoff for large scale basin in Western China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(3): 264—268. [王建, 李文君. 中国西部大尺度流域建立分带式融雪径流模拟模型[J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 264—268.]
- [9] Feng Xuezhi, Chen Xianzhang. Carving out a way and gratifying achievements [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(3): 245—248. [冯学智, 陈贤章. 雪冰遥感 20 年的进展与成果[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 245—248.]
- [10] Wang Jian. Snow cover distribution in the Heihe River of Qilian Mt. [A]. *Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, No. 6* [C]. Beijing: Science Press, 1988. 55—63. [王建. 祁连山黑河流域卫星雪盖分布分析[A]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 6 号 [C]. 北京: 科学出版社, 1988. 55—63.]
- [11] Kang Ersi. A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of northwest China to climate changes [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29 (Suppl.): 47—54. [康尔泗. 西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型[J]. 中国科学 (D 辑), 1999, 29 (增刊): 47—54.]
- [12] Cazorzi F, Fontana G D. Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 181: 169—187.
- [13] Rango A, Martinec J. Revisiting the degree-day method for snowmelt computations [J]. *Water Resources Bulletin*, 1995, 31(4): 657—669.

## Impact of Climate Change on Snowmelt Runoff in the Mountainous Regions of Northwest China

WANG Jian, SHEN Yong-ping, LU An-xin, WANG Li-hong, SHI Zheng-tao

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** Snow cover is an indicator for global warming. Climate change influences the distribution of glaciers and snow. Thus, air temperature rising results in changing of distribution of seasonal snow cover and regime of snowmelt runoff in Northwest China. Heihe Basin is a typical snow cover region with an area of 10 009 km<sup>2</sup> in Northwest China, where snowmelt runoff is the main supply for water resources. It is found that an impact of climate change on snowmelt runoff in mountainous regions is clear in the basin. So in this paper, the Heihe Basin was sampled to analysis the impact in mountainous regions of Northwest China. The impact of snowmelt runoff was simulated by using Snowmelt Runoff Model—SRM and satellite remote sensing data under air temperature rising. By analyzing the climatic and hydrological data sets derived from 46 observation stations for 40 years(1956—1995), an air temperature rising trend since 1956 is seen,

together with a stable precipitation. The annual mean air temperature has increased about 0.7~1.4 °C. Temperature mainly rises in January and February, but less rises in the spring. Meanwhile, in the test area, variation in rainfall and snowfall has a small effect. When air temperature increasing in winter is the main variation of climate change, snowfall will increase correspondingly. Based on statistics, snowfall increasing due to air temperature rising reaches 7%~10%. Snowmelt runoff regime changes with climate changing temporally and spatially. The curves of different coefficient of discharge show a change of monthly mean discharge contribution from the middle ten-days of April to the middle ten-days of October. The snowmelt period stretches with the shifted advance 10 days. While the discharge increases, the peak of runoff also advances to May.

**Key words:** snowmelt runoff; climate change; air temperature rising; runoff variation