

文章编号: 1008 - 2786 - (2014)6 - 685 - 06

基于雷达监测河川径流的测量及算法

牛 赟^{1,3}, 刘贤德^{1,3}, 王 强²

(1. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院 甘肃省森林生态与冻土水文水资源重点实验室, 甘肃 张掖 734000;
2. 甘州区水务局, 甘肃 张掖 734000; 3. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 70070)

摘 要: 祁连山大野口流域由于水流急、河面宽, 修筑量水堰有一定的难度, 准确监测河川径流成了流域水量平衡和涵养水源功能机理研究的障碍。通过大野口流域雷达测流处水面比降、河川横断面面积、水力半径、流速仪实测流量、糙率和谢才系数等一系列测量和计算, 可得出雷达监测水位与相应的河川径流量的函数关系式, 并绘制出水位流量图。结果表明: 雷达测流处水面平均比降为 0.028; 河川最大洪水断面宽 13.4 m, 高 1.32 m; 河川横断面糙率的平均值为 0.059; 雷达监测水位与相应的河川径流量的函数关系式为 $Q = 0.0018H^2 - 0.0206H$ ($R^2 = 0.9994$), 该关系式可有效解决修筑量水堰较难而利用雷达监测河川径流的难题。通过研究, 可为中等流域尺度上进一步揭示水源涵养功能机理及其流域产流机制提供参考和科学依据, 是实现未来水资源可持续开发利用的基础工作, 其对认知特定区域水文过程的演变规律, 保障内陆河流域水资源合理开发, 维持河西地区农业可持续发展具有重要意义。

关键词: 雷达; 河川径流; 祁连山大野口流域

中图分类号: P343

文献标志码: A

关于山地森林生态系统涵养降水过程和机理的研究中, 人们更加注重河川径流及其河川径流对人居生态系统的影响^[1-2]。从研究流域尺度上看, 有许多学者在长江^[3]、开都河^[4]、黄河万家寨水库^[5]、纳木错河^[6]、新疆精河^[7]、金沟河^[8]、叶尔羌河^[9]、喀什噶尔河^[10]、甘肃渭河^[11]等不同流域进行了研究。祁连山地处青藏、蒙新、黄土三大高原的交汇地带, 是河西走廊内陆唯一水源区和黄河流域重要的水源补充区, 是西北乃至全国生态安全屏障, 在全国森林水文生态学研究中的地理位置十分重要。因此, 在该区域内开展水文研究显得十分必要。早期

(1973—1993 年) 在祁连山寺大隆流域开展相关研究, 在 1980 年代选择 12.8 km² 的天涝池河流域修建了量水堰, 较准确地观测了河川径流量, 但 109.7 km² 的寺大隆河流域由于工程太大, 无法修建量水堰来较准确地观测河川径流量。近期 (1994 至今) 在祁连山排露沟流域开展相关研究, 在 2.73 km² 的祁连山排露沟流域修建了量水堰, 取得较准确的排露沟流域河川径流量数据。但是 80 km² 的祁连山大野口流域河流湍急, 修筑量水堰有一定的难度, 因此, 准确监测该流域河川径流量一直是流域研究的难点, 导致在多尺度上研究水源涵养功能受到阻碍。

收稿日期 (Received date): 2013 - 11 - 25; **修回日期** (Accepted): 2013 - 12 - 31。

基金项目 (Foundation item): 由国家科技支撑计划项目子课题《祁连山区水源涵养功能监测与增贮潜力评估》(2012BAC08B01)、甘肃省自然科学基金研究基金计划项目《祁连山气候梯度变化与植被垂直分布的响应关系》(1107RJZG268)、国家自然科学基金重大项目《祁连山区亚高山灌丛特征与生态水文过程的关系研究》(91125012) 联合资助。[United fund by Gansu Province Natural Science Fund Project "Response relationship between climatic gradient variation and vertical distribution of vegetation in Qilian Mountains" (1107RJZG268), and National Technology Support Program "Water conservation function monitoring and increasing storage evaluation in Qilian mountains" (2012BAC08B01), and National Natural Science Fund Project "Study on relationship between subalpine shrub characteristics and ecological hydrologic process in Qilian mountain" (91125012).]

作者简介 (Biography): 牛赟 (1974 -), 男, 甘肃通渭人, 高级工程师, 博士生, 主要从事森林生态水文学方面的研究。[Niu Yun (1974 -), male, Gansu Tongwei person, senior engineer, doctor student, mainly engaged in research on forest ecological hydrology.] E-mail: niuyun2028@163.com, Tel: 13649361345

本文利用雷达监测水位和人工利用测流仪测定流速,通过一系列测量和算法,最后得出了雷达水位监测与河川径流量的关系,这样可掌握祁连山大野口流域河川径流的动态变化规律,解决了长期以来中等尺度流域监测河川径流量的难题,为多尺度研究流域水源涵养功能及其机理过程提供参考和科学依据。

1 研究区概况

祁连山($36^{\circ}30' \sim 39^{\circ}30'N$, $93^{\circ}30' \sim 103^{\circ}E$)是我国西北地区著名的高大山系之一,属典型大陆性气候区。一般山前低山属荒漠气候,年均温 $0.6^{\circ}C$ 左右,年降水量约 150 mm ;中山下部属半干旱草原气候,年均温 $2 \sim 5^{\circ}C$,年降水量 $250 \sim 300\text{ mm}$;中山上部为半湿润森林草原气候,年均温 $0 \sim 1^{\circ}C$,年降水量 $400 \sim 500\text{ mm}$;高山属寒冷湿润气候,年均温 $-5^{\circ}C$ 左右,年降水量约 800 mm 。山地东部气候较湿润,西部较干燥。

试验区位于祁连山大野口流域($38^{\circ}16' \sim 38^{\circ}33'N$, $100^{\circ}13' \sim 100^{\circ}16'E$)。大野口流域东至马鬃梁、西至西沟梁、北邻正南沟、南接排露沟,发源于肃南县境内的野牛山,主要由东岔、西岔、头滩沟、西沟梁沟、观台沟和深沟 6 条较大支流汇集而成。大野口水库以上河流长 18 km ,控制了流域 98% 的集水区,面积约 80 km^2 。流域内健群种为青海云杉林,多为中龄和近成熟林,郁闭度为 0.6 左右;有少量的祁连圆柏林,多为中龄林,郁闭度为 $0.2 \sim 0.4$ 。

2 研究方法

2.1 雷达监测水位处水面比降测量及算法

以雷达测水位处的河流断面为中心部位,在距离断面两边分别取 3 m 、 5 m 、 10 m 、 20 m 、 30 m 、 40 m 的测量点,用水准仪测得河道相对高程。水面比降 $I = \Delta H/L_r$,式中 ΔH 为河流方向的高程差, L_r 为雷达测点两边河流长度。水面比降测量统计结果如表 1。

2.2 雷达监测水位处河川横断面测量及算法

在雷达监测水位处河川横断面上方从南岸到北岸水平拉 50 m 的皮尺,从南岸开始,间隔距离 $s = 0.2\text{ m}$ 的皮尺测点处从河床底直立水准尺,用水准仪依次读取水准尺刻度,一直测量到北岸,得到的一

列读数记为 H_w ,测量雷达探测器正下方皮尺至水面的距离记 H_a ,以及该处的水准仪读数记 H_s ,将雷达测点处河床位置调整为 0 ,计算河川横断面相对水位 $H_0 = H_s + H_a - H_w$ 。雷达监测到的水位为 H_r ,计算河道水深 $h = H_r - H_0$ (其中当 $H_r - H_0 < 0$ 时,计 $h = 0$,当 $H_r - H_0 > 0$ 时, $h = H_r - H_0$)。河川横断面测量及计算结果如图 1。

河川横断面可看作由 n 个以相邻两水位为上底和下底组成的梯形,计算河川横断面面积 $A = \sum_{n=1} ((h_n + h_{n+1}) \times s \times 0.5)$,式中 h_n, h_{n+1} 分别为相邻两测点河道水深, s 为测点之间的距离。

2.3 雷达监测水位处河道水力半径算法

雷达监测水位处河道湿周

$$L = \sum_{n=1} \sqrt{(h_{n+1} - h_n)^2 + s^2}$$

式中 h_n, h_{n+1} 分别为相邻两测点河道水深, s 为测点之间的距离。

河道水力半径 $R = A/L$,式中 A 为河川横断面面积, L 为河道湿周。

2.4 雷达监测水位处流速仪实测流量及算法

在雷达监测水位处,在河川横断面上方从南岸到北岸水平拉 50 m 的皮尺,以一定的间隔距离 $s = 0.2\text{ m}$ ($2013-06-28$ 测流间隔距离)或 0.3 m ($2013-07-20$ 测流间隔距离)的皮尺测点处用流速测定仪(南京水利水文自动化研究所制造, XZ-3 型通用智能流速仪计数器)测量该处的河川径流速度 V_n ,流速仪实测流量 $Q_f = \sum_{n=1} (A_n V_n)$,其中 A_n 为第 n 个测点处的河川横断面面积, V_n 为第 n 个测点处的河川径流速度。本文于 $2013-06-28$ (雷达测得水位为 0.25 m) 和 $2013-07-20$ (雷达测得水位为 0.34 m) 2 次测定河川径流量分别为 0.553 m^3 和 1.726 m^3 (表 2)。

2.5 雷达监测水位处河川横断面糙率和谢才系数算法

谢才系数 $C = Q_f / (A \sqrt{RI})$,式中 Q_f 为流速仪实测流量, A 为河川横断面面积, R 为水力半径, I 为水面比降。

河道糙率 $N = R^{1/6} / C$, R 为水力半径, C 为谢才系数。将多次计算所得的河川糙率加权平均后,可引入河川径流量的计算参数,结果见表 2。

2.6 雷达监测水位处河川径流量算法

雷达监测水位处河川径流量 $Q = AC \sqrt{RI}$,式中 A 为河川横断面面积、 C 为谢才系数、 R 为水力半

径、 I 为水面比降。根据雷达监测水位与相应的河川径流绘制水位流量图(图2)

3 结果与分析

3.1 水面比降

水面比降,亦称坡降、坡度,指沿水流方向单位水平距离河床高程差,与河川径流密切相关,是计算河川径流量的重要参数。祁连山大野口流域雷达测流处距上游和下游3 m测点处,其高程差为-0.06 m,5 m测点处高程差为-0.07 m,这两个测点属于倒坡,应该舍去(见表1)。10 m、20 m、30 m、40 m测点处平均高程差分别为0.44 m、1.14 m、1.85 m、2.40 m,根据水面比降算法,雷达测流处上下游测点相距20 m、40 m、60 m、80 m的水面比降分别为0.022、0.028、0.031、0.030,雷达测流处水面平均比

降为0.028。

3.2 河川横断面相对水位

河川断面测量包括纵断面测量和横断面测量。纵断测量的主要参数是水面比降,而横断面陆上部分应测至最高洪水位以上1 m处。大野口流域雷达测流处横断面洪水位高程如图1。从图1可见,河川最大洪水断面宽13.4 m,高1.32 m。在河川横断面一定的情况下,雷达测得水位与河川径流量一一对应,也有函数关系可循。

3.3 河川横断面各测点流量

根据流速仪实测流量及算法可绘制图2,从该图可以看出,雷达监测水位不同,其流量大小不同,但在固定的河川横断面上,各测点流量的总体变化趋势十分相似。

3.4 河川横断面和流量特征参数统计

由表2可以推算出大野口流域雷达测水位处河

表1 祁连山大野口流域雷达测流处水面比降计算表

Table 1 The water surface slope at radar monitoring in Dayekou basin of Qilian Mountains

测点距雷达断面长度/m	3	5	10	20	30	40
实测下游水准尺读数/cm	228.00	233.10	238.30	259.20	298.00	330.00
	239.70	238.50	237.70	259.50	293.00	344.90
	229.70	229.70	231.50	255.00	299.50	336.10
实测上游水准尺读数/cm	222.20	237.10	184.50	133.50	108.90	114.00
	244.20	247.50	204.00	139.50	104.50	83.50
	249.10	236.80	185.60	160.10	123.40	92.50

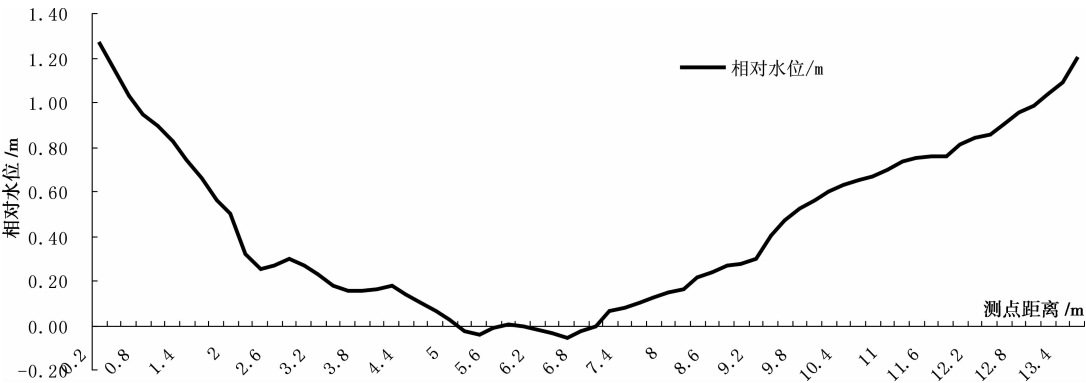


图1 祁连山大野口流域雷达监测水位处河川横断面和相对水位图

Fig.1 Cross section area and water level at radar monitoring in Dayekou basin of Qilian Mountains

表2 祁连山大野口流域雷达测水位处河川横断面和流量特征参数统计表

Table 1 The characteristic parameter of cross section area and volume of runoff at radar monitoring in Dayekou basin of Qilian Mountains

雷达水深读数/cm	实测断面/m ²	湿周/m	水力半径/m	实测流量/(m ³ /s)	河道比降	谢才系数	糙率	信度
25	0.940	5.865	0.160	0.553	0.022	9.860	0.075	0.3
34	1.537	7.490	0.205	1.726	0.028	14.712	0.052	0.7

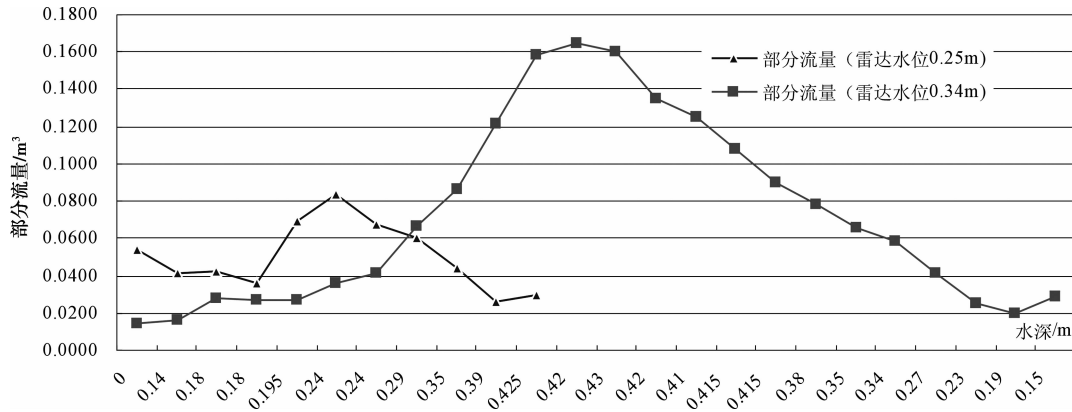


图2 祁连山大野口流域雷达测水位处河川横断面水深与流量

Fig.2 The depth of water and volume of runoff at radar monitoring in Dayekou basin of Qilian Mountains

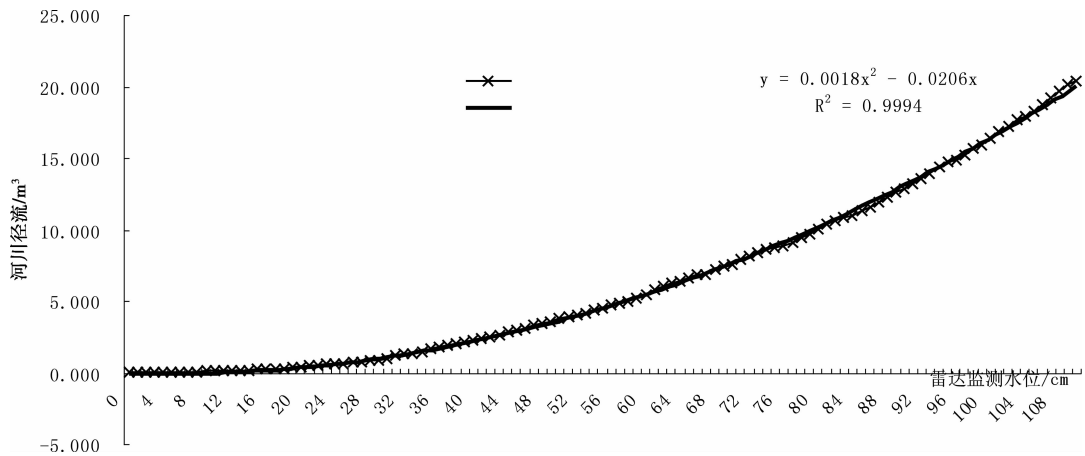


图3 祁连山大野口流域雷达水位与河川径流关系

Fig.3 The stage-discharge at radar monitoring in Dayekou basin of Qilian Mountains

川横断面糙率的平均值为0.059 0。

3.5 雷达监测水位与河川径流量关系

根据河川径流量算法,可推导出大野口流域雷达测流水位与该处河川径流量的函数关系式为 $Q = 0.0018H^2 - 0.0206H$ ($R^2 = 0.9994$), 式中 Q 为河川径流量(m^3), H 为雷达监测水位(cm)。

4 结论与讨论

4.1 讨论

河西绿洲是以祁连山孕育的内陆河为主要水源,河川径流对绿洲生态系统的健康可持续发展显得更加重要,全球变暖和区域性气候变化对该地区水资源系统将产生显著影响。测量和计算河川径流量,利用雷达技术对其实时监测,是实现未来水资源可持续开发利用的基础工作,其对认知特定区域水文过程的演变规律,保障内陆河流域水资源合理开

发,维持河西地区农业可持续发展具有重要意义。

4.1.1 流域河川径流的尺度问题

王顺利^[12]等利用祁连山排露沟流域($100^{\circ}17' \sim 100^{\circ}18'E$ 、 $38^{\circ}32' \sim 38^{\circ}33'N$)采用三角量水堰对流域河川径流长期定位监测数据(2000—2005年)分析结果表明:试验流域多年河川径流深为118.2 mm。与本研究相比,排露沟流域面积2.74 km^2 ,属于小尺度流域,河川横断面较窄,易于修筑量水堰,已实现了流域河川径流的实时监测。大野口流域面积80 km^2 ,河川横断面较宽,难于修筑量水堰,在不规则的河川断面监测流量一直是我们研究流域汇集水量的障碍。通过本文利用雷达监测到水位实时变化,根据多次实测率定,测量和推导出雷达监测水位与流量的关系式。这样就实现了流域来水量变化的实时监测,为研究不同尺度流域水量平衡和森林生态水文以及水源涵养机理提供参考资料。

4.1.2 水库水位与雷达水位监测相结合测算流

域河川径流的可行性问题

大野口水库水源主要靠降雨及融雪汇流而成,水库控制着整个流域的来水量,且由于水库底层深入基岩层,无潜流。根据水库建库勘察资料(张掖市甘州区大野口水库库容与水位关系曲线表),通过水位值可查得水库蓄水量,利用水位变化可求出流域来水量。另外,大野口水库是以灌溉为主,水库的去水量由排水孔和排水时间来计算,且排水时间有详细的记录。因此,通过水库水位变化测算流域河川径流是可行性的,而且有较长时间序列的监测数据(1983年至今),但是由于人工监测而无法实现实时监测,因此结合雷达实时监测技术可实现流域河川径流的实时监测和上推前30 a流域来水量的变化规律。

在研究流域水源涵养功能过程中,中等尺度的流域河川径流量的测定工作比较困难。其原因是中等尺度的流域的河川径流一般水流湍急,修建规则的过水断面工程较难实施,由于没有规则的过水断面,较难利用水位值求出河川径流的流速和流量(目前监测河川水位较容易)。在解决这个问题中,我们在水库上方布置了雷达监测水位设施,通过本研究,可监测流域河川径流量的动态变化,期望今后在中等尺度流域的河川径流测定过程中有所新突破。

4.2 结论

中等尺度流域集水区一般水流湍急,河面较宽,修建量水堰有一定的难度,用传统的方法难以测算河川径流量。科技的发展,雷达可进行实时监测河川水位,本文的研究目的就是利用雷达监测到的水位,推算该处的河川径流量。为此,通过雷达测流处水面比降、河川横断面面积、水力半径、流速仪实测流量、糙率和谢才系数等一系列测量和计算,得出了祁连山大野口流域雷达监测水位与相应的河川径流量的函数关系式 $Q = 0.0018H^2 - 0.0206H$ ($R^2 = 0.9994$),并绘制出水位流量图。本研究解决了在流域集水区难以修建量水堰而利用雷达监测河川径流量的难题,为进一步揭示水源涵养功能机理及其流域产流机制提供参考和科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Cernak V, Safanda J, Kresl M, et al. Recent climate warming: surface air temperature series and geothermal evidence[J]. *Studia Geophysica and Geodaetica*, 2000, 44: 430 - 441
- [2] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Long-term trends of annual tem-

- perature and precipitation time series in Japan[J]. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 2002, 20(2): 11 - 26
- [3] Jiang Tong, Sue Buda, Wang Yanjun, et al. The variation trend of temperature, precipitation and runoff in Yangtze basin in 40 years [J]. *Research Progress on Climate Change*, 2005, 1(2): 65 - 68 [姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(2): 65 - 68]
- [4] Wang Weixia, Wang Xiujun, Jiang Fengqing, et al. Temperature and precipitation along the Kaidu River over the past 50 years[J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(5): 746 - 753 [王维霞, 王秀君, 姜逢清, 等. 开都河流域上下游过去50a气温降水变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(5): 746 - 753]
- [5] Shi Lan, Xu Lina, Feng Zhen, et al. Distributed simulation and calibration of runoff in Wanjiazhai Reservoir watershed[J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(5): 722 - 730 [石岚, 徐丽娜, 冯震, 等. 黄河万家寨水库流域降雨径流的分布式模拟及率定[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(5): 717 - 723]
- [6] Zhou Shiqiao, Kang Shichang, Gao Tanguang, et al. The response of glacial runoff of Zhadang for the change of temperature and precipitation morphology in Namtso valley [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1781 - 1788 [周石桥, 康世昌, 高坛光, 等. 纳木错流域扎当冰川径流对气温和降水形态变化的响应[J]. *科学通报*, 2010, 55(18): 1781 - 1788]
- [7] Li Jiaqiang, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Variation features of precipitation and runoff of the middle-small rivers of northern piedmont of Tianshan Mountains a case of Jinghe River[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 622 - 628 [李加强, 陈亚宁, 李卫红, 等. 天山北坡中小河川降水与径流变化特征——以精河为例[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 622 - 628]
- [8] Dong Kui. The variation trend of air temperature, precipitation and runoff in Jinggou river basin[J]. *Water Science and Technology and Economy*, 2010, 16(5): 490 - 492, 497 [董奎. 金沟河流域气温、降水及径流的变化趋势[J]. *水利科技与经济*, 2010, 16(5): 490 - 492, 497]
- [9] Sun Benguo, Mao Huiyi, Feng Yanru, et al. The variation characteristics analysis of temperature, precipitation and runoff in Yarkant river basin, [J]. *Research in Arid Areas*, 2006, 23(2): 203 - 209 [孙本国, 毛伟峰, 冯燕茹, 等. 吐尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(2): 203 - 209]
- [10] Mao Weiwei, Sun Benguo, Wang Tie, et al. The change trend of air temperature, precipitation and runoff in recent 50 years in Kashgar River basin[J]. *Research in Arid Areas*, 2006, 23(4): 531 - 538 [毛伟峰, 孙本国, 王铁, 等. 近50年来喀什噶尔河流域气温、降水及径流的变化趋势[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(4): 531 - 538]
- [11] Niu zuirong, Zhao Wenzhi, Liu junqi, et al. The change features and trend of air temperature, precipitation and runoff of Weihe river basin in Gansu[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 32(2): 78 - 83, 87 [牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. *水文*, 2012, 32(2): 78 - 83, 87]
- [12] Wang Shunli, Liu Xiande, Jin Ming, et al. The study of climate change and characteristic of basin runoff in Qilian mountains[J].

Journal of Arid Zone Resources and Environment, 2011, 25 (1):
162 – 165 [王顺利, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山区气候变化与流

域径流特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25 (1): 162 –
165]

Measurement and Arithmetic of River Runoff Based on Radar Monitoring

NIU Yun^{1,3}, LIU Xiande^{1,3}, WANG Qiang²

(1. Academy of Water Resource Conservation Forests of Qilian Mountains in Gansu Province Gansu Province Key Laboratory
of Forest Ecology and Frozen-soil Hydrology and Water Resources, Zhangye 734000, Gansu, China;

2. Ganzhou Water-affair Authority, Zhangye 734000, Gansu, China;

3. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: There was difficult in constructing measuring weir in Dayekou basin of Qilian Mountains, Gansu, China because river was very big, and difficult in observation rivers runoff, which obstructed the development of research on function of water conservation in multi-scale basin. In this article, through measuring and calculating water surface slope, cross section area, hydraulic radius, current meter measurement flow, roughness and chezy coefficient at radar monitoring in Dayekou basin of Qilian Mountains, and concluded that corresponding function relation between radar monitoring water level and volume of runoff, and mapped out of stage-discharge. The results showed that average water surface slope was 0.028. The largest section of rivers flood was 13.4 m wide and 1.32 m high. The roughness of rivers cross was 0.059 of average. The function relation between the level of radar monitoring water and the corresponding river runoff was that Q was $0.0018 H^2 - 0.0206 H$ ($R^2 = 0.9994$), and this formula could effectively solve the problem of river runoff by using of radar for monitoring that there was more difficult in construction measuring weir. The paper had provided the reference and the scientific basis for accurately monitoring and researching basin river runoff, and revealing the mechanism of the function of water conservation and watershed runoff mechanism. This research would be basic work for sustainable exploiting and utilizing water resources in future, and great significance on perceiving evolving law of hydrological processes in a particular area, and ensuring water resources rational development in the continental river basin, maintaining agricultural sustainable development in Hexi region.

Key words: radar; river runoff; Dayekou basin of Qilian Mountains