

GPS 空间大地控制网技术在水文行业中的应用

黄 岩

(河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003)

摘 要:探讨了利用卫星导航系统进行水准测量的基本原理和 workflow, 以及 GPS 空间大地控制网技术与普通水准测量之间的差异与特点。两者各有优劣, 且存在着很强的互补性。随着科技的进步和经济的发展, 特别是我国自己的北斗卫星导航系统的投入使用, 利用卫星导航系统进行大地测量将会进入到包括水文行业在内的更多领域。

关键词:GPS; 大地控制网; 水准测量; 操作流程

中图分类号: P228; P345

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)05-0075-06

引言

河南省是农业和人口大省, 同时又是水资源紧缺的省区, 由于广大平原地区地表水资源贫乏, 地下水就成为水资源开发利用的主要对象, 也是城乡生活、工业和农业的主要供水水源。尤其是在地表水短缺的豫北、豫东地区, 地下水具有不可替代的作用, 其开发和利用在国民经济建设中占有重要的地位。

为了开展对地下水位的自动监测, 及时了解和掌握地下水动态变化情况, 为合理利用地下水资源提供信息, 河南省下达了专项资金用于河南省地下水自动监测系统的建设。

在地下水自动监测系统的建设中, 采用了 GPS 空间大地控制网技术, 进行地下水井的高程测量。该技术在水准点测量时与普通测量相比, 工作效率有很大的提高。

1 GPS 介绍及工作原理

1.1 概述

全球定位系统(GPS)是由美国国防部掌控的星基无线电导航系统。该系统为任何装备了 GPS 接收机的近地用户提供全球、全天候、24 小时的定位、测速和定时服务。全球卫星导航系统(GLONASS)是由俄联邦国防部掌控的与 GPS 类似的导航系统。任何时间, 在地球上的任何地点 15° 高度角以上最多可见 10~12 颗

GPS 卫星。如果接收机也能跟踪 GLONASS 卫星, 将有 10~16 颗卫星可见。尽管这两个系统在技术细节上有许多差别, 但它们都有三个基本组成部分: 空间部分、控制部分和用户部分^[1]。

GPS 的用户部分由 GPS 接收机、数据处理软件及相应的用户设备如计算机、气象仪器等组成。它的作用是接收 GPS 卫星所发出的信号, 利用这些信号进行导航定位等工作。

1.2 工作原理

GPS 定位的基本原理是根据高速运动的卫星瞬间位置作为已知的起算数据, 采用空间距离后方交会的方法, 确定待测点的位置。当接收机锁定一颗卫星时, 就开始记录观测信息并接受卫星广播的各种数据信息(星历、历书等)。接收机使用下列公式计算位置:

$$V \times \Delta t = D \quad (1)$$

式中: V 为无线电波的传播速度(光速); Δt 为信号发送时刻和收到时刻的时间差; D 为接收机到卫星的距离。

要计算 3D 绝对位置——经度、纬度、高度, 接收机必须锁定 4 颗以上的卫星, 在 GPS 和 GLONASS 的混合模式下必须锁定 5 颗以上的卫星才能获得一个绝对位置。

当接收机锁定卫星后, 就开始采集星历和历书, 并将这些信息保存到接收机的 NVRAM (非易失性存储器)中。

表1 GPS测量相关规范

Table1 The specification for GPS surveys

名称	编号	批准单位
《全球定位系统(GPS)测量规范》 ^[2]	GB/T18314-2009	国家技术质量监督局
《全球定位系统城市测量技术规程》 ^[3]	CJJ 73-97	建设部

要获得高质量的定位结果,需要具备精度、可用卫星数和完整性三个要素;

如果要从一个或多个已知点向多个测点进行测量时,工作原理就更复杂一些。单个测点只是一个独立的测量单元,要想把多个独立测点组成一个体系,就要给它们建立一个共同的参照系。

按规范要求^[2],测一个测点至少要同时能观测到4颗有效卫星。进行多点测量时,要求同时测量的各点能够同时观测到4颗以上的相同的卫星,这4颗相同的卫星就是它们的参照系。从另一方面讲,就是测控网里能够同时观测到4颗以上的相同卫星的点越多,能够同时测量的点也就越多,也就决定了测控网中同时观测点的数量。

1.3 GPS定位方法

(1)根据定位所采用的观测值不同可分为:伪距定位和载波相位定位;

(2)根据获取定位结果的时间不同可分为:实时定位和非实时定位;

(3)根据定位的模式不同可分为:绝对定位和相对定位;

(4)根据定位时接收机的运动状态不同可分为:动态定位和静态定位。

1.4 技术规范

GPS测量符合下列规范,见表1。

GPS静态测量按照精度和用途划分为A、B、C、D、E级。A级主要用于建立国家一等大地控制网,进行全球性的地球动力学研究、地壳形变测量和精密定轨;B级主要用于建立国家二等大地控制网,区域性的地球动力学研究和地壳形变测量;C级主要用于建立三等大地控制网,以及建立区域、城市及工程测量的基本控制网;D级主要用于建立四等大地控制网;E级主要用于中、小城市、城镇及测图、地籍、土地信息、房产、物探、勘测、建筑施工等的控制测量。

快速静态定位测量仅可用于C、D、E级控制网的布设。布网要求见表2。

GPS测量的基本观测要求见表3。

表2 布网要求

Table2 The requirements of surveying control network

级别	B	C	D	E
闭合环或附合路线的边数/条	6	6	8	10

表3 GPS网观测的基本技术规定

Table3 The basic technical specifications for GPS surveys

项目	级别			
	B	C	D	E
卫星截止高度角/°	10	15	15	15
同时观测有效卫星数	≥4	≥4	≥4	≥4
有效观测卫星总数	≥20	≥6	≥4	≥4
观测时段数	≥3	≥2	≥1.6	≥1.6
时段长度	≥23h	≥4h	≥60min	≥40min
采样间隔/s	30	10~30	5~15	5~15

2 GPS测量的工作流程

(1)测区资料收集。搜集测区范围内已有的国家基本水准点成果资料,了解测区范围内的地形、交通情况。

(2)引据水准点的选取和坐标系统的确定。选取测区内的国家基本水准点,要求水准点位置熟悉且成果可靠;坐标系统、高程系统和时间系统可以使用卫星自身提供的定位系统,也可将其转换成自定的坐标系统、高程系统和时间系统。

(3)绘制联测路线图。GPS空间大地控制网测站和基站的选择应符合技术要求,有利于使用其他测量方法进行联测;点位应便于安置接收设备和操作,视野开阔,卫星截止高度角为15°;点位应远离大功率无线电发射源(如电视台、微波站等)和高压输电线;点位附近不应有强烈干扰接收卫星信号的物体。

按照上述要求,布设GPS空间大地控制网施测站与基站,绘制GPS施测站与基站的位置分布图及施测路线图。GPS空间大地控制网的布设有三种形式:点连、线连和混连。

(4)埋石(设置水准点)。为正确推算地下水监测站的水位值,需要在测点设立水准点。水准点的设计、制

表 4 引据 GPS 测点高程表
Table4 The elevations of referential GPS survey points

引据水准点	位置	等级	高程 / m	东经	北纬	GPS 测点高程 / m
新郑站		三等	106.232	113°42'24.18440"	34°23'54.00237"	106.232
扶沟站		三等	58.084	114°23'37.19527"	34°03'47.48322"	58.084
西黄庄站		三等	66.524	114°09'06.09625"	34°17'46.15439"	66.524
许昌		D 级	66.057	113°51'39.14797"	34°01'26.22996"	66.057

作和埋设要符合国家有关技术标准^[4]。

(5)GPS 接收仪外业测量。选用接收机,对待测水准点和引据水准点组成的 GPS 高程控制网,进行多站同步静态观测,每个观测时段应符合规范要求。

(6)内业计算。对每天的测量数据,进行基线解算。再进行无约束平差计算,调整相关参数值到网平差计算结果符合要求。把已知测点高程分配到测网内,计算出其余水准点的高程,作为水准点的采用高程。

经检验符合要求后,采用 GPS 空间大地控制网平差软件在微机上进行三维无约束平差和二维约束平差,解算出各点的 1954 年北京坐标系成果。

高程控制:用 GPS 空间大地控制网拟合高程,采用 EGM96 大地水准面,但平差网中一定要有分布均匀、足够数量的水准高程作为起算点。

3 应用实例

在系统的建设中,要测量 150 个水准点。我们把测区分成许昌、开封、周口、商丘、漯河、郑州等 6 个分测区,选择许昌分测区进行说明。

3.1 概述

许昌分测区共建有地下水自动观测井 11 眼,需埋设 11 处水准点,和 4 个引据水准点组成 GPS 高程测量网,全部采用静态定位测量,得到被测水准点高程,再从各水准点引测井台和地面高程。

3.2 确定引据水准点

在许昌分测区就近选取扶沟、新郑、西黄庄和许昌 4 个已知水准点,其中扶沟、新郑、西黄庄为水文站设立的三等水准点,许昌为测绘局设立的 D 级 GPS 控制点。见表 4。

3.3 设立基站(监测井水准点)并确定系统坐标和测量仪器、方法

新设水准点标石为倒 T 型砣,不锈钢头,不锈钢头离地面 50cm^[4]。

平面坐标系统:采用 1954 年北京坐标系。

高程系统:采用 85 黄海国家高程基准。

测量精度:D 级

测量仪器、方法:使用拓普康 HIPER GB 型一体化 GPS 接收机,进行多站同步静态观测,测量 10 个同步时段,每个时段观测不少于 60min。

内业计算软件:拓普康公司 pinnacle V1.07 版,引擎采用 083 静态。

3.4 布设测控网

11 个待测点和 4 个引据水准点用线连的形式混合组网。经实地踏勘后,将不符合测量条件的基站剔除,改用人工引测。用符合测量条件的站点组合成新的测控网,见图 1。

3.5 野外测量

首先计划好测量的行进方向和测点顺序。

选用四台 TOPCON Hiper GB 双频、单星接收机按确定的方法进行测量^[5]。

由于接收机架在水准点的上方,其天线相位中心与水准点之间存在有一定距离的高差,这就产生了天线高。接收机直接测得的是天线相位中心的坐标,因而需要量取天线高进行回归计算,才能得到水准点的坐标。

天线高的量取有两种形式:

垂高:测点标志中心到接收机底部固定螺丝基座上天线高参考点(ARP)的距离。

斜高:测点标志中心到接收机前后面板上斜高测量标志(SHMM)处下边沿的距离。

观测时应量取天线高两次,两次读数差不大于 3mm,取平均值作为最后结果并输入 GPS 卫星接受仪中,由随机软件自动处理,见图 2。

要做好观测记录,记录好相关事宜,野外观测数据必须备份,专人管理^[6],见表 5。

3.6 内业计算

用后处理 Pinnacle 软件在微机上进行。以已知的 WGS-84 坐标作为基线解算依据,根据软件包说明^[7]按缺省参数进行解算。

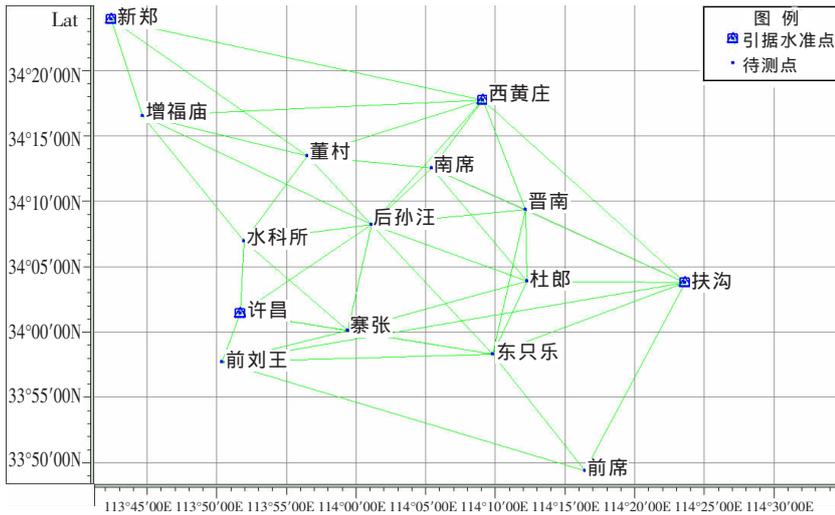


图1 许昌测区自动观测井 GPS 水准点测量组网图

Fig.1 The GPS benchmark points network of the automatic observation well in Xuchang

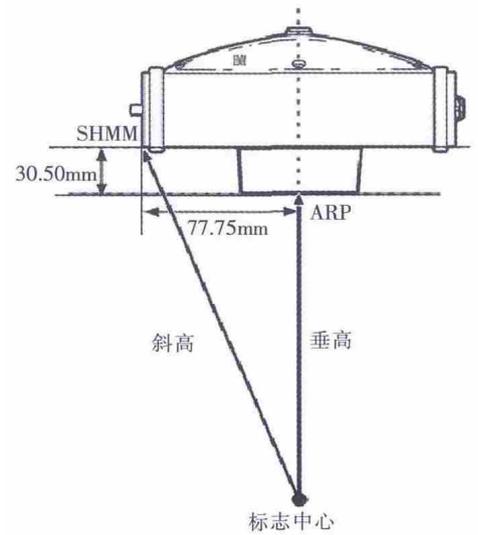


图2 天线高计算示意图

Fig.2 The calculating antenna height

表5 外业观测记录

Table5 The field observation records

观测时段	观测点名	仪器型号	仪器高(1)	仪器高(2)	仪器高中数	开机时间	关机时间	观测日期	观测人员
1	寨张		1728	1728	1728.25	7:53	9:13	10.27	
			1728	1729					
2	东只乐		1919	1918	1918.5	10:43	11:59	10.27	
			1918	1919					
3	东只乐	1542	1982	1983	1982.25	13:24	14:30	10.27	
			1982	1982					
4	南席		2040	2040	2040.5	15:40	16:50	10.27	
			2040	2042					
5	南席		1983	1984	1984.25	18:33	19:40	10.27	
			1985	1985					

①基线解算。对每天测量数据都按静态解算模型进行基线解算，基线解算通过后再进行下一天的测量作业。

②自由网平差计算。对解算过的基线先进行无约束平差计算，调整相关参数直到网平差计算结果符合要求。

③固定控制点网平差计算。把已知 GPS 测量点高程匹配到测网里，推算出未知 GPS 测量点高程。已知 GPS 测量点有扶沟站、新郑站、西黄庄站、许昌 4 个。

第一步：把扶沟站、新郑站、许昌水准点高程匹配到 GPS 高程测量网，用西黄庄站水准点作为校核水准点，西黄庄水准点 GPS 高程测量结果为 66.4985m，原高程 66.5240m，GPS 高程测量误差为 0.0255m，符合 GPS 高程测量要求。计算结果见表 6。

表6 引据水准点校核成果表

Table6 The check results of referential benchmark

序号	点名	GPS 测量 高程 / m	已知点 高程 / m	测量高差 / m	测量高差 / m	备注
1	扶沟	58.084	58.084	0	0	匹配
2	新郑	106.232	106.232	0	0	匹配
3	许昌	66.057	66.057	0	0	匹配
4	西黄庄	66.4985	66.524	0.0255	25.5	校核

第二步：把扶沟站、新郑站、许昌站、西黄庄站原始水准点高程匹配到 GPS 高程测网中，计算出其余自动观测井水准点高程作为观测井水准点采用的实际高程。见表 7。

水准点高程确定后，通过水准仪人工接测出观测

表 7 许昌测区平差坐标成果(bj54)
Table7 The points coordinate (bj54) of balancing in Xuchang

#	点名	坐标		中误差/mm			相关系统/%				
		纬度	经度	椭球高/m	海拔高/m	S(N)	S(N)	S(N)	N-E	N-U	E-U
1	东只乐	33°58'19.56365"N	114°09'49.20364"E	-73.2995	53.1525	3.4	2.9	8.8	-25	20	-4
2	董村	34°13'29.67890"N	113°56'28.41256"E	-51.1620	75.9853	3.5	2.4	7.8	1	22	6
3	杜郎	34°03'53.74156"N	114°12'15.20301"E	-68.0469	58.3224	3.1	2.6	7.4	-22	12	13
4	扶沟	34°03'47.48322"N	114°23'37.19527"E	-67.7019	58.0840	0.0	0.0	0.0	0	0	0
5	后孙汪	34°08'13.23700"N	114°01'06.69533"E	-58.6872	68.2300	3.0	2.3	6.6	-20	20	-4
6	晋南	34°09'22.99916"N	114°12'08.66274"E	-64.1871	62.2353	3.5	2.7	8.0	6	23	22
7	南席	34°12'31.92017"N	114°05'24.29797"E	-59.7024	67.0669	2.6	2.1	6.9	4	31	0
8	前刘王	33°57'42.50945"N	113°50'21.35438"E	-64.4637	62.8739	4.7	3.7	10.8	-43	50	-46
9	前席	33°49'21.59880"N	114°16'27.04543"E	-75.3708	50.6984	10.2	6.2	27.6	-19	68	-25
10	水科所	34°06'57.55277"N	113°51'57.09479"E	-54.6568	72.6219	3.5	2.5	7.2	-33	33	-25
11	西黄庄	34°17'46.15439"N	114°09'06.09625"E	-60.1388	66.5240	0.0	0.0	0.0	0	0	0
12	新郑	34°23'54.00237"N	113°42'24.18440"E	-21.4699	106.2320	0.0	0.0	0.0	0	0	0
13	许昌	34°01'26.22996"N	113°51'39.14797"E	-61.2246	66.0570	0.0	0.0	0.0	0	0	0
14	增福庙	34°16'31.64197"N	113°44'38.27993"E	-24.6213	102.9502	5.7	3.4	10.7	21	11	14
15	寨张	34°00'07.58466"N	113°59'23.13687"E	-65.2728	61.6779	2.7	2.3	6.6	-35	34	-35

井的井台、仪器架和地面高程^[4]。

4 总结

通过 GPS 空间大地控制网技术的运用,认为这项技术具有快速、省时、高效;全球覆盖率(98%)高;可以全天候进行测量;三维定点定速定时精度高;测点间无需通视;应用广泛、功能多;可移动定位;计算速度快等很多的优点。

(1)快速、省时、高效率:在距离长、数量多的水准测量中有非常大的效率优势。例如许昌测区有 11 个待测点,用传统水准测量要逐点引测,至少需要一周时间,GPS 只用了两天时间就完成了全部测量。

(2)全球覆盖率(98%)高:在水平通视条件不好、地形复杂的区域(跨河测量^[8]、距离近且高差大和水平障碍物较多的地区等)进行测量时,GPS 测量也有很大优势。

(3)可移动定位:由于 GPS 具有移动定位功能,特别适合进行地形测量^[9]。

(4)全天候:GPS 还可以全天候测量,不易受天气状况的影响。

(5)计算速度快、精度高:有成熟的计算机后处理软件进行数据处理,大大地提高了内业计算的速度和精度。

但是 GPS 在一些方面也有不可避免的劣势:

(1)对测点周围的电磁环境要求较高,在测站周围不能有强电磁波干扰源,如大功率无线电发射设施、高

压输电线等。也不能有对电磁波信号反射强烈的地形、地物,如高层建筑、成片水域等。为了减少干扰,我们选点时避开有强电磁波干扰源和反射源的地区。如果无法避开,就把该点从控制网中剔除,用其他方法接测。

(2)由于 GPS 单点测量的时间较长(按规范要求:静态测量至少要 60min 以上),在短距离(几百甚至几十米)测量时,其效率不如普通水准测量。对观测井的井台、仪器架和地面高程的测量我们采用普通水准测量。

(3)设备的购置费用以及对操作人员的要求也比较高。针对这个问题,我们采用租赁设备和加强人员培训的办法来解决。

比较 GPS 测量和普通水准测量,虽然它们之间有很多的差异,但仔细分析,却是各擅胜场,有着很强的互补性。GPS 测量适用于野外长距离、大面积和复杂地形(对空通视条件好)的测量。普通水准测量却在城市(高层建筑多)、短距离的测量中具有优势。如果把两者结合起来,以 GPS 做大面积、长距离的控制测量,再用传统测量方式作细部测量和接测,工作效率将会得到很大的提高。

随着科技的进步和经济的发展,特别是我国自己的北斗卫星导航系统已经开始投入使用,用卫星导航系统进行大地测量有了更多的选择。GPS 的测量精度会越来越高,操作会越来越便捷,适应环境的能力会越来越强,使用成本也会越来越低,为 GPS 空间大地控制网技术的普及提供了一个更加广阔的平台。

参考文献:

- [1] 张勤, 李家权. GPS 测量原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. (ZHANG Qin, LI Jiaquan. GPS Measurement Principle and Application[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [2] GB/T 18314-2009, 全球定位系统(GPS)测量规范[S]. (GB/T 18314-2009, Specifications for Global Positioning System (GPS) Surveys[S]. (in Chinese))
- [3] CJJ 73-97, 全球定位系统城市测量技术规程[S]. (CJJ 73-97, Technical Specification for Urban Surveying Using Global Positioning System[S]. (in Chinese))
- [4] GB/T 12898-2009, 国家三、四等水准测量规范[S]. (GB/T 12898-2009, Specifications for the Third and Fourth Order Leveling[S]. (in Chinese))
- [5] 拓普康公司. HiPer 使用手册[Z]. (TOPCON. HiPer User Manual[Z]. (in Chinese))
- [6] 拓普康公司. TopSURV 操作手册[Z]. (TOPCON. TopSURV Operation Manual [Z]. (in Chinese))
- [7] 拓普康公司. Pinnacle 软件用户手册 [Z]. (TOPCON. Pinnacle Software User Manual [Z]. (in Chinese))
- [8] 王永乔, 曹赟昀. GPS 跨河水准测量应用探讨[J]. 地矿测绘, 2011, 27(2): 33-35. (WANG Yongqiao, CAO Yunyun. Discussion of application of GPS river-crossing leveling[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2011, 27(2): 33-35. (in Chinese))
- [9] 李润苗. GPS 在天津市水文测站地形图测量中的应用[A]. 全国水利信息化技术与建设成果交流展示会论文集[C]. 2005. (LI Runmiao. GPS Application of topographic survey of hydrological stations in Tianjin [A]. Proceedings of Water Resources Information Technology and Construction[C]. 2005. (in Chinese))

Application of GPS Space Geodetic Control Network Technology in Hydrology Departments

HUANG Yan

(Hydrology and Water Resource Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In recent years, GPS space geodetic control network technology has been widely used in more and more areas, but rarely in hydrology departments. This paper discussed the basic principle and workflow of using a satellite navigation system for leveling, and the differences between the GPS space geodetic control network technology and the ordinary leveling. In this study, we found both their own advantages, disadvantages and highly complementary. With the technology advancement and economic development, especially the China's own Beidou satellite navigation system, application of the satellite navigation system in geodesy will enter into more areas including the hydrological departments.

Key words: GPS; geodetic control network; leveling; operational process

(上接第 69 页)

- [22] Jing Yang, Peter Reichert, K.C. Abbaspour, et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe basin in China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 1-22.
- [23] 夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气

候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 158-163. (XIA Zhihong, ZHOU Yuehua, XU Hongmei. Water resources responses to climate change in Hanjiang River basin based on SWAT model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(2): 158-163. (in Chinese))

Runoff Variation under Change Scenarios in Songhuaba Water Source Area of Kunming City

WANG Jie¹, HUANG Ying¹, DUAN Qicai¹, LIU Xinyou²

(1. Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming 650228, China;

2. Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650228, China)

Abstract: Combined with the daily meteorological data from the Kunming station, daily precipitation and runoff data from the Songhuaba Water Source Area, and the data of land use, and soil, a SWAT hydrological model was built for the water source area. Calibration and validation of SWAT were performed using the monthly runoff data from the Zhonghe Station in the Muyang Basin and the Baiyi Station in the Lengshui Basin. The calibrated and validated SWAT model was used to predict the runoff variation of the Songhuaba Water Source Area under A1F1, B1 and 15 hypothesis scenarios. The results show that the mean annual flow under A1F1 and B1 scenarios respectively decreased by 9.6% and 5.3% in the Muyang Basin while there was big change of the mean annual flow in the Lengshui Basin. In the Muyang Basin and Lengshui Basin, moreover, the mean annual flow will respectively decrease by 9.6% and 1.53% if the temperature increase by 1 °C, and the mean annual flow will respectively increase by 22.55% and 13.9% when the precipitation increase by 10%.

Key words: change scenarios; runoff variation; Songhuaba water source area