

宜万铁路岩溶隧道施工地质技术

申志军

(铁道部宜万铁路建设指挥部,湖北恩施 445000)

[摘要] 以宜万铁路岩溶隧道的施工地质技术实践为例,介绍了施工地质作为工程勘察阶段工程地质勘探在施工阶段的延续,用以在施工过程中解决勘察阶段所没有或不能解决的工程地质问题。施工地质以超前地质预测预报为主体,以规避大型施工地质灾害为目的,在施工阶段针对可能发生的隧道围岩变更;可能存在的溶腔、断层构造、地下暗河的预测预报;可能引发的水文环境地质问题;工程竣工以后可能存在的隐伏地质病害等,在隧道施工环境条件下为保证施工进度、保证施工安全、保证工程效益、保证工程质量所进行的综合工程地质工作。施工地质包括综合超前地质预报、水文观测和隧道周边及隧底隐伏岩溶探查。

[关键词] 宜万铁路;岩溶隧道;综合超前地质预报;水文监测

[中图分类号] U45 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)12-0047-06

1 工程概况

宜万铁路位于云贵高原的东北麓,东起宜昌,西至万州,全长 377 km,主要行经在长江与清江的分水岭地带,全线隧道 159 座,总长约 339 km。其中单线隧道 105 座,总长 291.4 km;双线隧道 54 座,总长 47.3 km,隧道占线路长的 60%。

全线 70% 的隧道位于灰岩地区,多座长大隧道通过可溶岩地层,并组成不同类型的储水构造,在地壳运动和特殊的水动力作用下,形成复杂的岩溶深潭、管道及溶隙网络系统。岩溶强烈发育,岩溶、岩溶水极其复杂,是制约工程建设的突出问题。岩溶隧道可能产生的突(涌)水、突泥(块石)等突发性地质灾害将严重危及施工和运营安全。勘察中虽然针对岩溶地质问题采用了超常规、多方法、多手段和多领域的勘察、试验和长期观测的专项地质工作,但由于岩溶发育的不规则性和复杂性以及目前所有勘察手段的局限性,不可能在勘察期间查明所有的岩溶地质问题^[1]。

因此,在岩溶隧道施工期间,必须采取施工地质技术对隧道掌子面前方、隧道底板和周边的地质情况进行及时准确分析和判断,预报可能产生的风险,

采取预防措施、避免灾害的发生或在一定程度上减少灾害造成的损失、保证隧道的施工及运营安全。

2 施工地质技术主要内容

施工地质是工程勘察阶段工程地质勘探在施工阶段的延续,用以在施工过程中解决勘察阶段所没有或不能解决的工程地质问题。

施工地质以超前地质预测预报为主体,以规避大型施工地质灾害为目的,在施工阶段针对可能发生的隧道围岩变更;可能存在的溶腔、断层构造、地下暗河的预测预报;可能引发的水文环境地质问题;工程竣工以后可能存在的隐伏地质病害等,在隧道施工环境条件下为保证施工进度、保证施工安全、保证工程效益、保证工程质量所进行的综合工程地质工作。

施工地质包括综合超前地质预报、水文观测和隧道周边及隧底隐伏岩溶探查。

3 综合超前地质预报技术

宜万铁路采用了地质素描、物探与钻探相结合,长短距离预报相结合以及预报资料与地质分析相结合的综合预报技术。物探技术包括:TSP,HSP、陆地

[收稿日期] 2009-10-29

[作者简介] 申志军(1971-),男,河南开封市人,高级工程师,主要从事铁路隧道建设管理和施工工作;E-mail:wkexsd@126.com

声纳、直流电法、地质雷达、红外探水等;钻探技术包括:中长距离钻探、超长炮孔、炮孔。

预报原则为物探先行,钻探验证,有疑必探,不明不掘。现场钻探时,安全岩盘按照预留3~8 m进行控制。通过多种方法的实践和比选,地质素描和TSP起到了一定的宏观预报作用,但地质雷达和红探水对岩溶水难以起到定量分析作用,而超前钻探预报准确率几乎达到100%。因此,对复杂岩溶隧道采取“地质素描、TSP先行,以钻孔为主”进行岩溶及岩溶水超前预测预报。

3.1 地质素描法

地质素描是对掌子面及周边围岩的地层岩性、地质构造、结构面产状及裂隙出水、夹泥等地质情况进行直接描述的一种方法,主要是通过描述围岩的变化情况分析预测掌子面前方的地质情况,重点是发现是否存在出水、夹泥、掉块等成灾先兆。

3.2 TSP203 物探法

TSP203超前地质预报法采用弹性波反射原理,当人工激发的弹性波在隧道中的岩体内传播,遇到掌子面前方的反射界面(如断层、破碎带、溶洞等)

时,一部分弹性波(反射波)信号会反射回来,反射回的信号被两个三分量高灵敏度检波器接收并通过电缆传输给TSP主机,再通过对接收的弹性波信号进行分析,便可推断断层及破碎带、溶洞等不良地质体的位置、规模、产状及岩石力学参数^[2]。

3.3 钻探法

钻探法包括超前钻探、周边超长炮孔和炮孔。

3.3.1 超前钻探技术

超前钻探是一种机械的直接的超前探测手段,可以直接揭露溶腔或断层破碎带的里程位置,并确定它的富水参数。长距离钻探可以用一定的外插角和仰、俯角,探测隧道围岩一定厚度以外不良地质发育情况,探测时,需有一定厚度的稳定岩盘,保证施工安全。

1) 超前钻孔的设计。钻孔超前探测的目的主要有验证物探异常、控制稳定岩盘厚度,其投入数量根据地质的复杂程度级别确定,一般情况下,对A级风险地段,钻孔数量达到3~6个,不同风险等级的钻孔布置见图1、图2,并以一定的外插角进行钻探,以保证稳定的岩盘厚度。

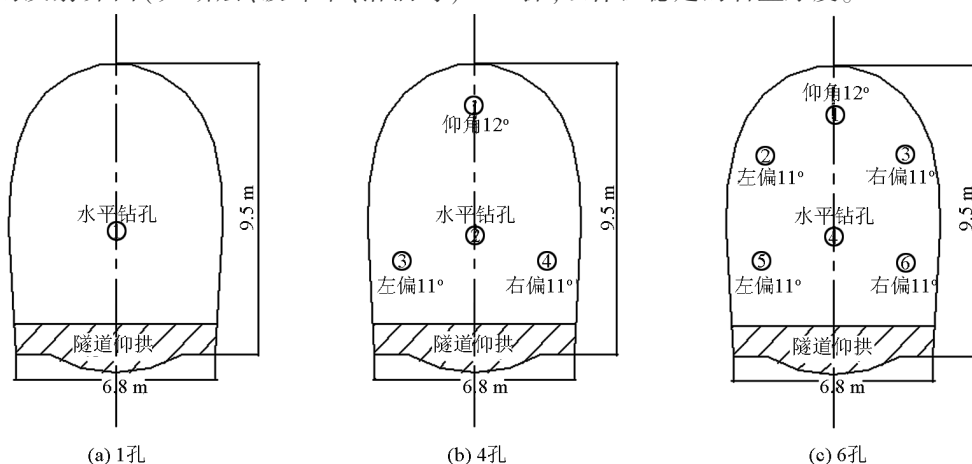


图1 全断面开挖不同风险等级的超前钻孔布置图

Fig.1 Full-face excavation of different risk levels ahead of drilling layout

2) 钻孔设备选型。钻孔机械设备性能是影响超前钻探技术纳入工序管理的最主要原因。从宜万线情况来看,由于受经济能力和对钻机性能的认识等多方面原因影响,由现场实际钻孔能力来看,针对灰岩和白云质灰岩地层,在不取芯条件下, HGY-300D, JD-30, LF-100, MGY-60B, MK-3, MK-5, XY-2, XY-150, XY-2P, XY-2PC, YQ-100, ZD-60共12种钻机钻探能力约为1~3 m/h,

称之为慢速钻机。MKD-5S(煤科院西安分院产)、ZYG-150B(煤科院重庆分院产)钻机钻探能力为5~7 m/h,称之为中速钻机。RDP-150C(日本进口)钻机钻探能力为10~15 m/h,称之为快速钻机。按平导月平均进度180~240 m/月,钻机进出场及施工准备时间按2 h,一次钻孔深度按30 m,开挖25 m,余留5 m岩盘,每次掌子面钻设计1个超前探孔等综合指标考虑,慢、中、快三类钻机对施工的影响

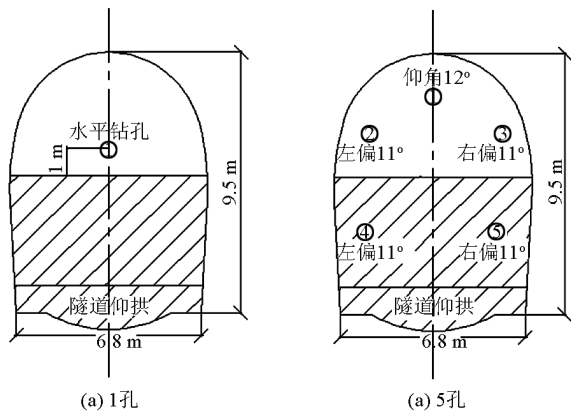


图2 台阶法开挖不同风险等级的超前钻孔布置

Fig. 2 Step method different risk levels ahead of excavation hole layout

主要采用不取芯钻探。

3.3.2 超长炮孔探测技术

超长炮孔探测主要是为了弥补超前钻孔的不足而采取的超前预报措施,就是将正常的施工炮孔延长到5 m左右,确保一个施工循环后,掌子面前方和周边还有3 m左右的稳定岩盘。由于可以在炮眼施工时同时施做,占用掌子面的时间较少,是一种经济有效的短距离探测方法。

超长炮孔一般布置在隧道掌子面的周边,呈 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 外插角,弥补水平钻探对隧道周边探测的盲区,以保证有3 m左右的稳定围岩(见图3),掌子面的正前方一般视雷达异常和超前钻孔数量适量布置。

由于超长炮孔布置和密度可以根据需要确定,主要用来发现其他方法不能发现的小的溶腔和导水通道,据统计宜万线60%以上的溶腔和突水突泥事件,都是超长炮孔提前发现的。

3.3.3 炮孔探测技术

掌子面炮孔,全断面接近100孔,是判断地质的最后一道关,发现钻孔渗水及异常时,不能急于爆破,应谨慎分析后确定下一步措施。要做到这一点,需要有经验的司钻工和严格的管理制度。

3.3.4 实例

云雾山隧道I线全长6.6 km,进口施工3.5 km、出口施工3.0 km进入核心部位,该段埋深800 m。地表EH-4物探异常,洞内TSP探测发现异常。采用钻探进行查找和锁定溶腔,见图4。

响分别为16.6%,7.6%,4.9%,因此,要想将超前钻探纳入施工工序管理,在经济条件允许时,建议优先购置快速钻机,否则,也应购置中速钻机。慢速钻机不适宜于施工地质钻孔要求,对施工影响太大,建议不应采用。

现场使用效果较好的钻机有MKD-5S(煤科院西安分院制造)、ZYG-150B(煤科院重庆分院制造)、RDP-150C(日本进口)地质钻机。

3) 钻探模式。当工程结构需要掌握前方岩性的变化、破碎程度或溶洞充填物的性质时,可采用取芯钻探,当为了提高钻探速度,减少掌子面占用时间,在只需要掌握掌子面前方是否存在不良地质异常时,可采用不取芯钻探,宜万铁路隧道的超前钻探

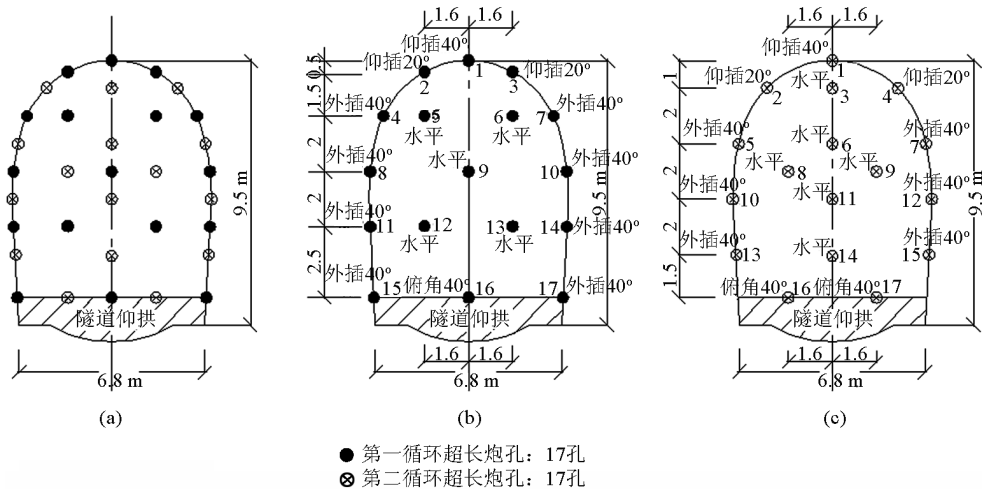


图3 掌子面超长炮孔布置示意图

Fig. 3 Schematic layout of tunnel face long hole

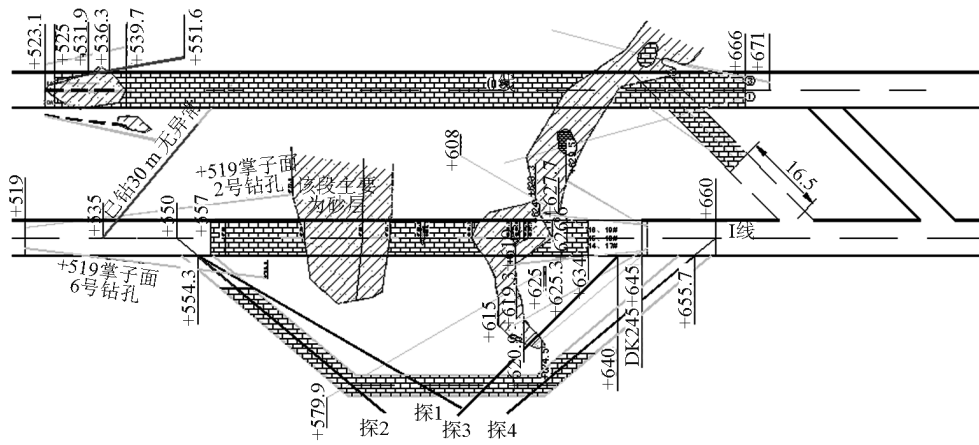


图4 云雾山隧道溶腔探测平面示意图

Fig. 4 Caverns detection plane diagram of Yunwushan Tunnel

钻机采用德国 KLM 和意大利 C6 钻机共 5 台,4 个掌子面各配一台,并备用 1 台。快速钻机作业效率高,故障率低,钻探时选用 $\phi 90$, $\phi 115$, $\phi 145$ 钻头,配足钻杆可一次钻进 30 ~ 150 m,一般凿岩进度 12 ~ 15 m/h,溶腔段 4 ~ 6 m/h。

2008 年 7 月 21 日云雾山隧道出口 I 线掌子面 DK245 + 645 施做超前水平地质钻探,在钻进 17 m 时返水呈黄色,当钻进 26.5 m,钻进速度加快,2 min 后,钻杆突进 1.5 m,钻孔水压陡增,钻机无法钻进。退钻后钻孔发生突水涌泥,孔口喷水距离约 20 m,钻孔最大出水量估算 $800 \text{ m}^3/\text{h}$,最大水压 1.2 MPa。

8 月 25 日隧道出口 I 线掌子面 DK245 + 625 退后 35 m 施工横通道,绕行到 II 线施工,2008 年 9 月 4 日在施工超前水平地质钻,钻至 II 线位置时,遇突泥突砂。说明隧道出口段 I, II 线岩溶不良体相关度密切。9 月 20 日隧道进口 II 线 II DK245 + 498 掌子面进行超前水平地质钻时,钻机钻进 40 m 时遇溶腔,有少量水和泥涌出。10 月 8 日隧道进口 I 线 DK245 + 519 施工超前水平地质钻时,钻进 60 m 突水突砂,孔口出水约 $400 \text{ m}^3/\text{h}$,水压 0.86 MPa,1 h 后钻口被突砂淤塞。

通过上述过程的钻探得出以下结论:a. 溶腔为深埋高压富水充填性溶腔;b. I 线岩溶不良地质段为 DK245 + 577 ~ + 625,长 48 m;c. II 线岩溶不良地质段为 II DK245 + 523 ~ + 654,长 131 m,隧道内两段溶腔长 40 m 和 30 m,中间 61 m 为较完整围岩;d. I 线和 II 线存在水力联系,在隧道上方可能连通。

4 水文观测

岩溶隧道水文地质条件复杂,岩溶及地下水对隧道施工和运营安全构成威胁,特别在施工过程中易发生突水突泥,并且隧道发生突水突泥后还会诱发环境水文地质问题,为避免岩溶地下水对隧道安全造成影响,需系统地对深埋岩溶隧道进行水文地质监测,目的是为防灾预警提供依据、为环境影响评价积累观测资料。

水文监测内容包括降雨量、涌水量、水压力 3 个方面。

4.1 降雨量监测

为了掌握大气降水与隧道涌水的关系,分别在齐岳山、马鹿箐、大支坪、野三关等长大深埋隧道的山顶建立气象观测站,观测记录大气降水的时间、降水量、汛期变化情况,结合勘察阶段的调查资料,对隧道涌水做出预测和预警。马鹿箐隧道降雨量与涌水量关系见图 5。

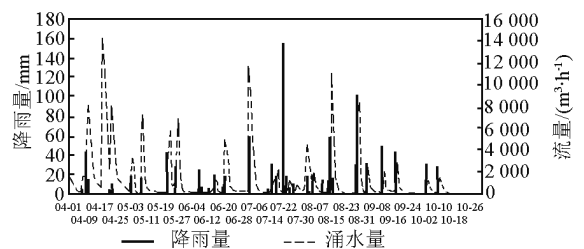


图5 马鹿箐隧道降雨量与涌水量关系图

Fig. 5 Diagram rainfall and water inflow of Maluqing Tunnel

4.2 涌水量监测

超前钻孔、重要出水点、集中汇水点、重要井泉等均需进行水量监测,主要采用人工监测及自动监测相结合的监测方法进行涌水量监测。为了查明隧道中已揭露涌水点与地面水系的连通关系,都进行了连通试验,如马鹿箐隧道 DK255 + 978 突水点与地面水系的连通关系和野三关隧道 DK124 + 602 突水点与地面三号暗河的关系。

4.3 水压力监测

每实施 1 次超前钻孔均需布置不受开挖影响的水压监测孔;每个溶腔至少需布置 1 孔进行水压监测。水压监测孔,需设置孔口管、安装法兰盘、Q 型管、空气室及压力表,孔内需设置软式透水管等。

5 隧底及周边隐伏岩溶探查

隧底及周边隐伏岩溶探分为工前和工后两个阶段。工前的岩溶复查是根据既有勘察资料分析和洞内地质素描及超前地质预报所获得的岩溶发育情况,对疑有岩溶发育的段落,在仰拱和衬砌施工前,由施工单位采用地质雷达、风钻进行探查,对影响稳定的异常部位采用钻孔验证,从而获得隧底和周边隐伏岩溶的位置、大小、顶板厚度,以便在施工阶段做出相应处理。工后隧底及周边岩溶勘察是在隧道完工后,铺碴 3 个月前,由设计单位再采用地质雷达及地震仪对灰岩段隧底和重点地段周边岩溶进行复查,影响稳定的异常段落用钻孔验证,评价隧底稳定性和施工中岩溶处理效果和相应的处理措施,以保证运营安全。

5.1 隧底及周边岩溶复查分级原则

根据施工前的勘察资料和施工地质资料,以及工前岩溶探查结果,按以下原则将灰岩隧道划分为 I, II, III 个等级。

I 级复查地段:隧道位于地下水水位以下,在开挖过程中揭示有充水(泥)溶腔,或出现严重渗、漏水地段,以及重大物探异常体、推测可能发育暗河,存在严重安全隐患和风险的段落。

II 级复查地段:在开挖过程中揭示各类溶腔(充填、半充填或未充填等)、溶槽、溶隙发育或较发育,或在工前岩溶探查中确定岩溶发育或较发育,存在一定安全隐患和风险的段落。

III 级复查地段:在开挖过程中揭示岩溶欠发育或不发育,在工前岩溶探查中确定岩溶欠发育或不发育,安全隐患和风险较低的段落。

在岩溶复查过程中,根据复查的物探成果资料或钻探验证资料,显示存在重大物探异常或发育大型溶腔,应适当提高其复查等级、增加相应的探测工作。

5.2 物探探查原则

采用地质雷达或地震单点反射法与地震面波法等两种或两种以上的方法对隐伏岩溶进行综合探查。

对隧底进行岩溶复查,周边的岩溶复查在隧底复查完成后根据隧底复查结果结合结构加强情况安排,在已做结构加强地段不做周边复查,未进行结构加强地段在隧道的左、右边墙和拱顶各布置一条测线,双线或多线隧道在起拱线部位增加两条测线。当发现有较大异常时适当加密测线。单线隧道隧底布置二条物探测线,双线、多线隧道或特殊条件下,则适当增加测线数量,测线间距不大于 5 m;对隧底进行岩溶复查;在发现重大异常时才对周边进行复查。

5.3 钻探验证原则

对在隧底岩溶复查物探测线中存在较大物探异常区,应安排适当的钻孔进行验证;对小于 200 m 的地段,每段的验证孔的数量不大于 2 孔;对不连续而又相隔距离较短的地段,可以结合一并考虑钻孔验证工作。验证孔深不大于 15 m,不小于 10 m,特殊情况根据需要确定。

5.4 隧底及周边隐伏岩溶探查成果

通过全面系统的岩溶隧道基底隐伏岩溶探查,查明了全线岩溶隧道基底和周边隐伏岩溶的分布、形态、规模及其对运营安全的影响,提前采取注浆、回填砟、盖板及桩基础等工程措施进行处理,消除了安全隐患,为确保运营安全奠定地质基础。

如彭家坡隧道 DK29 + 430 ~ DK29 + 452 段在铺底后仍发现隧底下 3 ~ 15 m 串珠状岩溶发育;长巴隧道铺底仰拱均完成后复查发现某段隧底以下 2.5 m 发育岩溶空洞;王家岭 I 线隧道某段铺底后复查发现 5.2 ~ 8.8 m 串珠状岩溶空洞,同时,经复查还发现了一些存在一定安全隐患的岩溶发育地段,如汪家寨隧道、高坪隧道复查发现的某段隧底以下 8 ~ 16 m 范围内串珠状充填型溶腔发育,高阳寨隧道周边岩溶异常发育等。

6 结语

1) 宜万铁路建设实践证明,只要严格认真地进

行超前预报,是可以较准确地查找到突水突泥风险源。因此,为规避岩溶隧道施工风险,必须将超前预测预报纳入工序管理。

2)超前钻探、周边炮孔是目前发现灾害溶腔的最直接、最主要的手段,掌子面炮孔是最后一道关口。因此,施工单位应加强超前钻探设备的配备。

3)宜万铁路建设实践表明,TSP等物探方法只能对地质情况进行宏观预报,难以达到精确定量分析。

4)施工环境造成的温度不均匀,且灰岩中水体、岩体在红外探测下没有明显的差异,因此,岩溶

隧道采用红外探测方法意义不大。

5)隧底及周边隐伏岩溶探测对施工及运营中回避风险、避免灾害的发生意义重大,应引起足够重视。

参考文献

- [1] 刘招伟,张民庆,王树仁.岩溶隧道灾变预测与处治技术[M].北京:科学出版社,2007
- [2] 何发亮,李苍松,陈成泉.隧道地质超前预报[M].成都:西南交通大学出版社,2006

Construction geology technology of Karst tunnels on Yichang-Wanzhou Railway

Shen Zhijun

(Yichang-Wanzhou Railway Construction Headquarters
of Ministry of Railways, Enshi, Hubei 445000, China)

[Abstract] Taking the construction geology technology practice of karst tunnels on Yichang-Wanzhou Railway as an example, construction geology, which is a continuation of engineering geological exploration in construction stage, can be used to solve the problems which do not exist or cannot be solved in exploration stage. Taking advanced geology predication as its subject, aiming at avoiding large-scale construction geological hazards, construction geology refers to the comprehensive engineering geology work for ensuring construction progress, construction safety, engineering benefit and project quality, such as predicting possible displacement of tunnel surrounding rock; forecasting potential salt cavities, faults and underground rivers; finding out potential hydrogeology problems and concealed geological disasters after project completion, etc. Construction geology includes comprehensive advanced geology predication, hydrogeological observation and concealed karst exploration.

[Key words] Yichang-Wanzhou Railway; comprehensive advanced geology predication; hydrological monitoring