

白岩洞地下河开发的环境效应研究*

Study on Environmental Effects on Exploiting Baiyandong Buried River

谢运球 裴建国 张美良 林玉石 张顺志** 曾志飙** 石明轩**

Xie Yunqiu Pei Jianguo Zhang Meiliang Lin Yushi Zhang Shunzhi Zeng Zhibiao Shi Mingxuan

(中国地质科学院岩溶地质研究所 桂林 541004)

(Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, 541004, China)

摘要 湖南省保靖县设计以引水方式开发白岩洞地下河为城镇生活供水水源。该地下河的补给有大气降水和地表水,几个主要地表水入口多为岩溶洼地,洼地中分布着农田和人口密集的村庄,地下河系统森林覆盖率较低。地下河出现一些环境问题,如地下河水中出现农药和化肥的残留成分、泥沙含量在雨季剧增、地下河水细菌总数和大肠杆菌群超过国家饮用水标准规定的量等。同时,开发地下河也会对引水工程沿线地区的自然、社会和生态环境造成有益的和不利的影响,如挖掘隧洞可增加引水工程水量、高位自流供水可降低成本,白岩洞地下河淤积、部分村庄缺水、生态不良反映等。应抓住开发白岩洞地下河的机遇重新整理地下河流域土地资源,调整用地结构,增加林业用地面积和投资,建立水源卫生防护带,控制农药化肥用量和类型。

关键词 白岩洞地下河 引水工程 环境效应 土地重新整理

中图法分类号 P 642.253

Abstract Baiyandong buried river, 7 km away from Baojing county Hunan province, southern China, not being exploited before, will be used by channeling as drinking water for the county and its towns. The river is recharged by rainfall and surface water, the latter of which is mainly from several depressions where there are some rice fields and villages with thick population. Because of those effects and low forest cover rate, the buried river zone has appeared some environmental problems such as residues of pesticide and fertilizer, and growth of mud and sand in the river water in the rain season, total number of bacteria and coliform group bacteria more than the national standard of drinking water. Also, exploiting the river may bring about various influences on natural, social and ecological surroundings around the area of the project, for example, addition of water amount of diversion works, water cost reduction by high water supplying, and in the other hand, river silting up, water shortage in some villages and bad ecological impact etc. To resolve those problems said above, we should use the opportunity of exploitation of Baiyandong buried river to regularize land resources in the area, such as anew regulation revision of used land texture, increase of forestry land and its invest, establishment of protective hygienical zones of water resources, control of amount and types of used pesticide.

Key words Baiyandong buried river, diversion works, environmental effects, anew land regulation

1 白岩洞地下河特征及其开发方案

白岩洞地下河是位于湖南省保靖县城东南 7 km 的一个复杂的现代地下河型洞穴系统,由主流和吉库、两岔河、三岔河和铁匠洞等 4 条主要支流构成,分布在梅花、朝阳、复兴和水银 4 个乡镇(图 1),主流分为白岩洞入口—三岔河、三岔河—金塘湾洞

冒水处和金塘湾洞冒水处—金塘湾洞三段,长约 5 151 m,高差 104 m,坡降 2‰。

白岩洞入口—三岔河包括吉库、两岔河和三岔河 3 条主要支流,结构相对复杂。经过近 1 年的长期观测,三岔河处的最枯流量为 13.3 L/s (1999-04-12),高程 397.58 m。三岔河—金塘湾洞冒水处为人无法进入的主流段,洞道结构及其复杂程度无从确知。金塘湾洞冒水处—金塘湾段只有一条支流,洞道结构相对简单。金塘湾洞堰板处高程 363 m,实测最枯流量 27 L/s (1999-02-29)。

对白岩洞地下河 1 年的调查研究,测量和长期观

2000-06-19 收稿,2000-07-28 修回。

* 国土资源部新一轮地质大调查项目“西南岩溶石山地区岩溶水水资源潜力及生态环境地质综合评价”及原地矿部定向研究项目“湖南省保靖县白岩洞地下河合理开发利用研究”的部分成果。

** 湖南省保靖县水利局,保靖,416500 (Baojing Bureau of Water Conservancy, Baojing County, Hunan, 416500)。

测, 作者认为, 金塘湾洞冒水处 - 金塘湾段具有洞道结构较简单和流量较大的特点, 而且其高程能够满足与目前最高的灌溉渠道 (350 m 高程) 联网要求。因此, 建议在金塘湾洞引水, 设计隧洞长度 3 300 m, 取水高程 363 m, 出口高程 352 m^[1]。

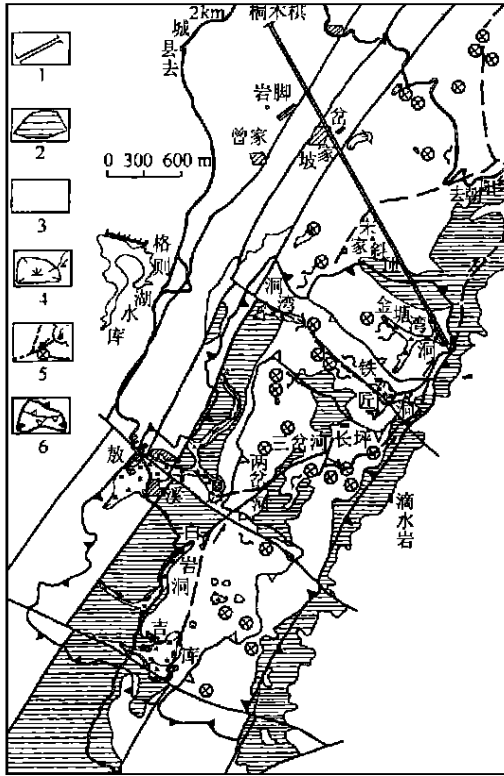


图 1 白岩洞地下河系统环境背景

Fig. 1 Environmental background of Baiyandong buried river system

1. 桐木棋 - 金塘湾引水隧洞; 2. 非岩溶环境; 3. 岩溶环境; 4. 洼地、水田、地表水流向; 5. 地下河及其流向、落水洞; 6. 白岩洞地下河边界与内部系统。1. Diversion tunnel of Tongmuqi-Jintang bay; 2. Non-karst environment; 3. Karst environment; 4. Depression, paddy field, surface water flow; 5. Buried river and its flow direction, doline; 6. Boundary and inner system of buried river of Baiyandong.

2 白岩洞地下河的环境特点及其对地下河的影响

2.1 人居环境

表 1 白岩洞地下河及其地表入口水中 P 和 N 含量

Table 1 The contents of P and N in the water from Baiyandong buried river system

| | 总磷 TP (mg/L) | 有机磷 Organic P (mg/L) | | NH ₄ (mg/L) | | | NO ₂ (mg/L) | | | NO ₃ (mg/L) | | |
|----------------|--------------|----------------------|---------|------------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|
| | | 1999-07 | 1999-07 | 1999-11 | 1999-07 | 1998-12 | 1999-04 | 1999-07 | 1998-12 | 1999-04 | 1999-07 | 1998-12 |
| 盐盆河 Yanchahe | 0.037 | 0.037 | 0.000 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | 0.016 | < 0.002 | < 0.002 | 1.00 | 0.14 | |
| 吉库 Jiku | 0.037 | 0.007 | | < 0.02 | 0.02 | | 0.002 | | | 1.20 | 0.10 | |
| 敖溪 Aoxi | 0.039 | 0.032 | | < 0.02 | 0.02 | | 0.004 | | | 1.80 | 0.10 | |
| 白岩洞 Baiyandong | 0.091 | 0.074 | | < 0.02 | < 0.02 | | 0.006 | | | 0.30 | 0.10 | |
| 洞湾 Dongwan | 0.027 | 0.019 | | < 0.02 | < 0.02 | | 0.025 | | | 1.80 | 0.10 | |
| 三岔河 Sanchahe | 0.037 | 0.017 | | < 0.02 | < 0.02 | | 0.005 | | | 0.70 | 1.80 | 0.80 |
| 金塘湾 Jintangwan | 0.020 | 0.011 | | < 0.02 | < 0.02 | | 0.002 | | | 2.50 | 1.20 | 1.00 |

白岩洞地下河的 2 个主要地表入口 - 吉库洼地和敖溪洼地是 2 个人口密集的村庄。据《湖南省保靖县立体农业区划报告集》(1983 年 12 月), 人口密度最大为 165 人/千米², 高于全县平均值 128 人/千米²。实地调查, 生活污水、牲畜粪便等通过位于 2 个洼地中的庙坡落水洞和岩山脚落水洞直接灌入该地下河中。此外, 在滴水岩、长坪和铁匠洞等地散居着少量人口, 生活污水和人畜的排泄物渗入地下或汇入溪沟后经落水洞注入地下河。

2.2 地表水的环境质量及其变化

白岩洞地下河有 5 个大型地表水入口 (洼地中落水洞), 对其中 4 个入口的地表水分别在 1998 年 12 月和 1999 年 7 月进行取样, 分析水中的 N 和 P 采样方法依据 GB12997-91 “水质采样方案设计技术规定”, 氨氮 (NH₄)、亚硝酸盐、硝酸盐、磷测试分别采用纳氏试剂比色法、α-萘胺比色法、酚二磺酸比色法和磷钼钼蓝比色法。分析结果见表 1 从表 1 可见地表水中 NH₄ ≤ 0.02 mg/L, NO₂ 为 0.002 mg/L~0.025 mg/L, NO₃ 为 0.1 mg/L~2.5 mg/L。除 NH₄ 外, NO₂ 和 NO₃ 有一个共同的特征: 农灌季节的含量普遍高于非农灌季节。地表水中 P 含量为 0.027 mg/L~0.091 mg/L, 其中有机 P 含量 0.007 mg/L~0.074 mg/L, 占总 P 的 18.9%~82.1%。

2.3 水土流失状况与特点

白岩洞地下河系统属该县低山丘陵油粮养殖区。据《湖南省保靖县立体农业区划报告集》(1983 年 12 月), 该区总国土面积 597.8 km², 其中农业用地 89.1 km², 占 14.9%; 林牧用地 416.3 km², 占 69.6%; 难利用地 54.4 km², 占 9.1%。森林覆盖率为 42.23%, 低于全县平均值 47.35%。在农业用地中, 水田 49.1 km², 占 55.1%; 旱地 40.0 km², 占 44.9%。从全县 1952 年查田定产时旱地面积来看, 旱地面积 (包括开荒地) 是增加的。

以土壤侵蚀程度为主要指标进行水土保持分区, 本区被划分为重点监督区, 以山地鳞片状侵蚀为主, 包括白岩洞地下河系统在内的梅花、复兴、阳朝和水银等4个乡镇土壤侵蚀。80年代以前, 轻度侵蚀面积为60.5 km², 占国土面积的23.4%, 占侵蚀面积的60.6%; 轻度侵蚀主要发生在林地上, 占侵蚀面积的52.1%。中度侵蚀面积为35.9 km², 占国土面积的13.9%, 占侵蚀面积的36.0%; 中度侵蚀主要发生在草地、荒地上, 占侵蚀面积的12.7%。强度侵蚀面积为3.3 km², 占国土面积的1.3%, 占侵蚀面积的3.3%; 强度侵蚀主要发生在草地、荒地和旱地上, 分别占侵蚀面积的2.0%和1.1%。梅花乡水土流失面积最大, 阳朝乡最小, 分别占国土面积的70.4%和3.2%。总之, 白岩洞地下河系统水土流失面积约占38.6%, 侵蚀模数1650 t/km²·a。而据《长江流域水土保持重点防止工程保靖县总体规划》(1998年5月), 白岩洞地下河系统及其周边环境水土流失面积31.2 km², 流失程度为11%~13.1%, 以中度侵蚀为主, 侵蚀模数在1400 t/km²·a以下(表2)。其中中度侵蚀占52.6%, 轻度侵蚀占35.81%, 强度侵蚀占11.6%。对比结果, 1980年以后上述4个乡镇水土流失面积和流失程度已大大减轻, 但侵蚀程度出现了新的变化, 即中、强度侵蚀大大加剧, 这可能说明在全面治理水土流失时, 局部地区土壤侵蚀没有得到遏制。土壤侵蚀量35400 t/a, 基本上与侵蚀面积成正比。但复兴镇侵蚀面积居第二, 而土壤侵蚀量却最小。是实际情况如此, 或是部分侵蚀面积已完全石漠化而无土壤可蚀, 有待进一步调查。

表2 1998年前白岩洞地下河系统及其周边环境土壤侵蚀程度及面积

Table 2 Erosive extent and area of soil in Baiyandong buried river system and its adjacent surroundings before 1998

| 乡镇 Village and town | 轻度 Light degree (km ²) | 中度 Middle degree (km ²) | 强度 High degree (km ²) | 小计 Sum (km ²) | 总面积 Total area (km ²) | 土壤侵蚀量 Soil erosion (t/a) |
|------------------------------|---|--|--|---------------------------------|--|-----------------------------------|
| 梅花 Meihua | 3.04 | 4.89 | 0.97 | 8.89 | 73.2 | 12400 |
| 阳朝 Yangchao | 2.65 | 4.6 | 0.75 | 8.0 | 61.26 | 10900 |
| 复兴 Fuxing | 3.38 | 3.6 | 1.26 | 8.24 | 68.8 | 3900 |
| 水银 Shuiying | 2.10 | 3.3 | 0.65 | 6.05 | 55.06 | 8200 |
| 小计 Sum | 11.17 | 16.39 | 3.62 | 31.18 | 258.32 | 35400 |

2.4 人居环境 地表水 水土流失对白岩洞地下河的影响

根据1998和1999年枯季水质监测分析(由保靖县卫生防疫站采集与测试), 三岔河细菌总数达12000

个/毫升, 大肠菌群为30个/升; 金塘湾细菌总数150个/毫升~1000个/毫升, 大肠菌群为7个/升~120个/升。《生活饮用水卫生标准 GB5749-85》^[2]规定, 1 ml水中细菌总数不超过100个, 1 L水中大肠杆菌不超过3个。说明白岩洞地下河已遭人畜粪便污染, 细菌总数和大肠菌群均超标。

1999年7月中上旬对白岩洞地下河系统进行一次全面取样, 分析水中磷含量(采样与分析方法同前)。水中总磷浓度0.020 mg/L~0.037 mg/L。为防止流动水体中植物的有害生长, 理想的总磷浓度为100 μg/L(Mackenthun, 1973)。多数水体未受污染的湖区中, 其表层水体的总磷浓度为10 μg/L~30 μg/L(Hutchinson, 1957)。白岩洞地下河总磷含量目前多低于上述总磷浓度, 但已接近此值或出现“超标”现象。白岩洞地下河系统中有机磷普遍检出, 含量0.011 mg/L~0.017 mg/L, 低于注入地下河中的地表水有机磷含量(0.007 mg/L~0.074 mg/L)。水中有机磷一般来源于含磷污水和有机磷农药^[3]。白岩洞地下河系统无含磷污水排入, 其有机磷主要为有机磷农药如甲胺磷、杀虫双、敌敌畏等的残留成分。《生活饮用水卫生标准 GB5749-85》对饮用水中有机磷浓度未作规定, 世界上只有美国、日本等少数国家有限定。美国海水慢性毒性评价标准(1986年5月1日)认定磷含量0.01 μg/L为影响人体健康的最低值, 而日本生活饮用水水质标准更严, 要求有机磷含量为零。因此, 对水中有机磷浓度要求是越低越好或未检出更好。1999年1月5日对白岩洞地下河水进行非农灌季节取样, 水中有机磷含量为0.000 mg/L, 表明水中有机磷确实是农灌季节含农药农田水污染所致, 其污染途径是通过洼地消水洞直接排入地下河。

化肥的使用往往是地下水中NO₃⁻-N增高的主要来源^[2,3]。白岩洞地下河水中NO₃⁻浓度0.70 mg/L~2.5 mg/L(表1), 远低于《生活饮用水卫生标准 GB5749-85》20 mg/L, 说明源于化肥对地下水的污染程度较轻。但有一个明显的趋势, 农灌季节(1999年7月)比非农灌季节(1998年12月)高, 即含化肥水对地下水有污染。非农灌季节时, 洞湾、白岩洞入口、敖溪、吉库等地表水入口处稻田水中NO₃⁻浓度只有0.1 mg/L, 表明化肥水的污染是瞬时的或者是季节性的。

1999年7月8-1日和11月5日, 对白岩洞地下河入口、三岔河和金塘湾进行取样分析水土流失对白岩洞地下河水中泥沙含量的影响, 分析方法采用GB1901-89重量法。结果表明, 地下河泥沙含量平均为0.024 g/L。洪水期间, 仅白岩洞入口泥沙含量达

0.561 g/L,是地下水非洪水期间的2倍。若以1日测得的地下河流量387 L/s(非洪峰流量)为基准来计算日输入泥沙量,白岩洞地下河日输入泥沙0.8 t,洪水期间达18.8 t,表明水土流失带来的影响是严重的,还使金塘湾地下河水的浑浊度达到8度(1999年7月1日检测),超过《生活饮用水卫生标准 GB5749-85》规定的5度。

3 白岩洞地下河开发可能引起的环境影响

3.1 对自然环境的影响

3.1.1 增加引水工程的水量

引水隧洞长约3300 m,穿越溶洞,地下河强烈发育的寒武系下统清虚洞组和中上统娄山关群富水性丰富的含水岩组以及多条导水断层,汇集沿途包气带中的渗入水和地下水。据计算,入渗补给量约为2000 m³/d,实际可增加的水量视工程截取包气带水和揭露地下河管道情况而定。

3.1.2 减少包气带部分泉水、地下河流量

引水隧洞虽然可增加水量,但必然会减少区域含水层的补给量。在盐厂以南,引水隧洞沿途经过的村庄不多,出露的泉水也不多,对该地区影响不大。但在盐厂以北,包气带中分布有岩溶泉、地下河,该工程可能会造成盆家坡泉、地下河流量减少,甚至断流,引起工程两侧一定范围内包气带中的岩溶泉水量减少或干涸。在垂直方向上,影响范围最大达314 m。

3.1.3 引起白岩洞地下河淤积

在白岩洞地下河调查过程中,发现若干处深潭中有厚度超过1 m的沙堆;在水流变缓的河段,河床上有沙层。特别是70年代在铁匠洞支流与主流交汇处筑坝后,在坝体的上游沉积了厚度大于1 m的淤泥。1998年在白岩洞三岔河和金塘湾修建了流量观测堰后,近年来,在堰的上游河床上各沉积了一层沙,厚约80 cm。引水工程建成后,必将改变原地下水水力特征,使地下河道的水力坡度变缓,在取水口上游会沉积大量泥沙,造成地下河道变浅变窄。而且,引水隧洞底坡设计为1‰,大大低于地下河的平均自然水力坡度(20‰),也低于金塘湾洞冒水处至金塘湾洞这一段的水力坡度(10.3‰)。

3.2 对社会环境的影响

3.2.1 简单处理后可提供符合《生活饮用水卫生标准 GB5749-85》的生活用水

如前所述,经过多次检测,白岩洞地下水除细菌总数和大肠杆菌群超标外,符合《生活饮用水卫生标准 GB5749-85》。以1998~1999年实际观测和分析资料为依据,白岩洞地下河可提供的最枯水量为

2333 t/d,对水稍加处理后可解决3800余人的生活用水。因此,白岩洞地下河引水工程的实施,保靖县城镇生活、生产用水可以停止使用受人畜排泄物污染,原水净化后嗅味不能完全去除而需采取微污染水的深度净化处理的格则湖水库作为饮用水源,将改善保靖县的饮水卫生条件,有利于人们身体健康水平的提高;而且使县城远期供水得到可靠保障,消除遇干旱年份灌溉用水与城镇供水无法同时保证的矛盾。

3.2.2 低成本高位供水适合于保靖县的社会经济现状,有利于城镇的远期规划发展

自流供水,有利于降低水价和高位供水。保靖县城座落在两级台地上,老城区及龙溪生产区高程210 m~270 m,为低压供水区;新城区及位于城东南的老城区高程260 m~360 m,为高压供水区。泥心碛水厂高程216 m,因此,县城大部分区域必须实行加压供水。采用白岩洞地下河引水工程自流供水,可降低能耗和管线的承压力(对高压供水区尤其如此),因而可延长设备的使用年限,降低单位成本水价,使居民直接受益。而且,白岩洞地下河引水工程出水口离位于梅花乡附近的新城区直线距离1.2 km,离县城3 km,具有距离短、投资省、见效快的特点,可早日收到良好的社会效益。

3.2.3 提供灌溉用水

停止使用格则湖水库作为饮用水源,将其完全改为灌溉水源。白岩洞地下河在农灌季节还可以根据作物的需水要求供给不同的水量,可增加灌溉面积和粮食产量。

3.2.4 少数村庄饮水、灌溉困难

由于少数村庄位于350 m高程以上,村庄附近包气带中的部分岩溶泉、地下河可能出现流量减少甚至断流,可能带来这些村庄饮水、灌溉困难。

3.3 对生态环境的影响

如上所述,引水工程可能会减少工程沿线及其两侧一定范围内包气带中的地下水(泉、地下河等)。地下水量减少后,工程沿途及其两侧的植被、树木因缺水可能出现生长不良甚至枯死等情形,引起生态环境不良反应。

4 白岩洞地下河开发的环境治理

4.1 行政上统筹规划和管理

白岩洞地下河系统横跨梅花、阳朝、复兴和水银4个乡镇,牵涉面广。尤其是地下河的几个污染源在4个乡镇都有分布,如水银乡吉库村和复兴镇白岩洞入口与敖溪的生活污水、农药、化肥污染,梅花乡洞湾与阳朝乡长坪、铁匠洞的农药、化肥污染,因此,必

须对该系统进行统一规划、统一管理^[4]。

4.2 土地重新整理

根据耕地和林地国土资源中实际占 12%~14% 和 56%~67%，调整用地结构以及资金、劳力的投向，提高林地资源的使用率和产值。将占国土面积 1.4%~2% 的坡度 25° 以上的坡耕地退耕还林、还草。充分利用占国土面积 7.8%~14% 的荒山荒坡，辟为宜林、宜草地，增加森林、植被覆盖率。

系统内成土母质为石灰岩、白云岩及少量砂页岩，土壤多为红壤、黄壤及红色石灰土。按照当地水热条件与土地的高程分布以及多年来植树造林的成功经验并借鉴南方石山地区生态环境治理的成果，选择树种、草被、灌丛、经济林、竹林等。马尾松林在砂页岩发育的土壤上生长量最大，是很好的水土保持树种或用材树种；杉木根叶浓密，根系在固持表土方面作用很好，经济价值亦高，是低中山、低山丘陵区的主要造林树种；榕树、毛麻楝林等生境阴湿，土壤为红色石灰土，对石灰岩沟谷带的水土保持和岩溶景观保护有特别重要的作用；青檀林特产于石灰岩山，萌发力强，对石灰岩水土保持具有重要作用。麻栎对生境适应性强，萌生性好，是薪炭林的好树种和水土保持的好材料。竹林对土壤要求不严，是堤岸边的水保材料。钙质土植被如许多蕨类，对石灰岩山地的水土保持和环境绿化具有十分重要的意义。龙须藤、樟叶荚迷灌丛生境干燥、土少石多，对防止石漠化有重要作用；金花小檗、平枝枸子灌丛对石灰岩山的水源涵养和恢复原生植被如硬叶常绿栎林有重要作用。

高程 600 m~800 m 是杉木生长最适宜区，马尾松、茶叶适宜区；400 m~600 m 是马尾松、柏木最适宜区，杉木较适宜区；700 m 以下是油茶最适宜区，油桐适宜区；600 m 以下是梨及其它小水果适宜区。

白岩洞地下河被用作保靖县城镇生活饮用水源，因此对白岩洞地下河系统的土地利用提出了高于一般水土保持意义上的要求。将散居人口搬迁到该地下河系统外集中，把人口搬迁后和其它无人居住的地区辟为自然保护小区，建造阻挡雨水及其超渗产流、滞留泥沙的小型工程。在人口集中的吉库、敖溪-岩山脚洼地，短期内对其生活、生产所利用的土地进行全面的、严格的整理，目标是降低不当的土地利用所造成的对地表水、地下水的感官性状、水化学、毒理学和细菌学污染。远期目标是在几个主要地表水入口开展生态农业，使水中的有机磷实现未检出，毒理学和细菌学指标完全符合《生活饮用水卫生标准 GB5749-85》。土地整理包括对宅基地进行卫生保障处理；对

洞湾、白岩洞、长坪-铁匠洞等面积较小的洼地中的稻田实行休耕，减少水中氮、磷、泥沙来源，政府对休耕者适当补贴；对敖溪、吉库等面积大的洼地中成片的暂时无法退耕的稻田逐步实行生态型耕作，降低水中磷、氮含量，消除细菌学污染，改变耕地的粗放耕作模式，根据系统内水田和旱地的特点，改种经济效益和水保效益双高的农作物，减轻耕地的压力。政府对耕作者进行科技引导、扶持。对洼地汇水范围内的山坡地特别是坡度 25° 以上的坡地休耕、休牧，逐步恢复森林植被。

白岩洞地下河系统是一个面积 7.35 km² 的独立单元流域，应围绕改善其水资源质量这个前提，从土地重新整理和扩大森林植被覆盖率出发，采取以下措施，促进单元流域生态改善：保护好现有林，有计划、分步骤地合理规划、调整林业用地；大力营造水源林、水土保持林、用材林；积极绿化荒山荒坡，提高森林植被覆盖率；在人口稠密的吉库、敖溪等地，充分安排薪炭林、经济林，严禁砍伐水源林、水土保持林。

4.3 引水工程负面影响的防治

为了掌握白岩洞地下河开发对包气带泉和地下河流量减少的影响，在施工过程中及完工后，宜对距工程一定范围内的岩溶泉、地下河进行水量观测和动态变化调查，以便确定工程的影响范围和治理措施。

由于白岩洞地下河泥沙含量较高，近期不可能彻底治理，所以在设计水厂慢滤池等设施时，必须充分考虑因水力梯度剧降带来的泥沙沉淀量及其影响，如泥沙充填滤料间空隙造成滤料堵塞等。

4.4 设立水源卫生防护带

在吉库洼地、白岩洞洼地、敖溪-岩山脚洼地、长坪洼地、洞湾洼地和铁匠洞洼地设立卫生防护带^[2]，在此带内不得施用有持久药性、残留量高的和剧毒的农药。在吉库、敖溪-岩山脚洼地不得或者控制排放生活污水和通过污水沟渠，对渗水厕所、渗水坑、垃圾堆放点、动物排泄物和家畜饲养场进行污水防渗处理。此外，还应在上述诸洼地消水处定期取水样、土样化验和进行水质监测，了解污染的动态变化。

参考文献

- 1 谢运球等. 白岩洞地下河洞穴系统及其开发方案的优选. 中国岩溶, 2000, 2.
- 2 地质矿产部水文地质工程地质技术方法研究队主编. 水文地质手册, 北京: 地质出版社, 1978.
- 3 沈照理主编. 水文地质学. 北京: 科学出版社, 1985.
- 4 袁道先等. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 1988.

(责任编辑: 邓大玉)