

太行山片麻岩区坡地渗流集蓄技术

曹建生^{1,2}, 刘昌明¹, 张万军¹

(1. 中国科学院石家庄农业现代化研究所, 河北 石家庄, 050021; 2. 中国科学院研究生院, 北京, 100039)

摘 要: 在分析国内外雨水利用历史、现状的基础上, 对太行山片麻岩坡地的水文地质结构及特性进行了分析。结果发现, 坡地的表层被一层双重、非均匀的复杂介质所覆盖, 具体表现为“上覆土壤、下伏岩石”的“岩土二元结构体”; 岩土二元结构坡地的空间变异性, 特别是岩- 土之间存在凹凸不平交界面的水文地质特性, 为坡地侧向渗流的集蓄创造了条件, 该技术创新了雨水集蓄的形式, 在中国北方石质山地具有广泛的推广与应用价值。

关键词: 坡地; 壤中流; 裂隙流; 渗流; 集蓄技术

中图分类号: P641. 2

文献标识码: A

集蓄雨水在国外有着悠久的历史, 根据有关文献记载, 这种技术的起源可以追溯到数千年以前的阿滋泰克 (Aztec) 和玛雅文化时期^[1-3]。在人类漫长的发展历史过程中, 由于生产力水平低下, 没有现代化的工程设备和技术, 不可能修筑大型水利工程来进行水资源的时空调控, 雨水利用一直是农业发展和生活所需的主要措施。在同干旱气候长期的斗争中, 哥伦比亚、厄瓜多尔、墨西哥、秘鲁、希腊人、阿拉伯人、利比亚、埃及、印度、以色列人积累了雨水集蓄利用的丰富经验。只是到了 19 世纪末、20 世纪初, 由于近代科技的发展, 特别是机械动力开发河流和地下水的技术取得了飞速发展, 接着当代水利工程的修建, 又为防止洪涝灾害, 促进社会经济的发展, 特别是农业的持续稳定增长, 发挥了很大的作用, 人们对雨水集蓄利用的兴趣有所下降。但是由于人口、资源、能源、环境等方面问题的出现, 对有限的水资源提出了越来越高的要求, 同时大型水利工程引起越来越多的生态环境问题也迫使人们思考和寻找其他出路, 因此, 在过去的 20 余年里, 这一古老的技术又迅速在世界各地开始复兴和发展。其中, 日本政府十分重视

对雨水的利用, 早在 20 世纪 60 年代, 日本开始收集利用路面雨水, 70 年代修筑集流面收集雨水, 80 年代建设省开始推行雨水贮留渗透计划, 其目的是有效地补充涵养地下水, 复活泉水, 恢复河川基流, 改善生态环境条件^[4]; 其次, 德国也是欧洲开展此项工程最好的国家之一, 目前德国的雨水利用技术已经进入标准化、产业化阶段, 市场上已大量存在收集、过滤、储存、渗透雨水的产品。1982 年, 夏威夷召开第一届国际雨水集流会议, 嗣后成立了国际雨水集流系统协会 (International Rainwater Catchment Systems Association, IRCSA) 之后多次召开雨水集蓄利用学术会议, 截止 2003 年底, 共召开了 11 次国际学术会议, 促进了国际间雨水利用的交流与研究。我国在秦汉时期就有修建池塘坝拦蓄雨水利用的历史记载, 水窖修筑历史也有数百年^[1,2]。近几年来, 雨水利用在我国, 特别是北方干旱地区得到了迅速发展。甘肃在干旱半干旱地区实施了“121”工程、“雨水集流节灌”工程, 陕西实施了“甘露”工程, 宁夏在南部山区实施了“窑窖农业”工程, 内蒙古进行了“112 集雨节灌”工程的试验示范研究, 甘肃、内蒙古、陕

收稿日期 (Received date): 2005- 03- 14; 改回日期 (Accepted): 2005- 06- 30。

基金项目 (Foundation item): 国家 863 项目“新型高效雨水集蓄与利用技术研究” (2002AA2Z4051); 研究所创新项目“山地水资源开发与农业可持续发展”资助。 [Founded by National “863” Project (2002AA2Z4051) and Knowledge Innovation Project of Institute.]

作者简介 (Biography): 曹建生 (1973-), 男, 河北肃宁人, 硕士生, 助研。主要从事水文水资源、生态水文方面的研究。 [Cao Jian-sheng (1973-), male, born in Suning, Hebei province, master graduate student, assist researcher, main researches on hydrology and water resources and ecological hydrology.]

西、山西、广西、河北、河南、江苏、浙江、四川等许多省区开展了雨水利用工作。其利用形式已经由起步阶段单纯的用来解决人畜饮水、回补城市地下水,发展到利用雨水进行大田作物、经济作物、设施农业生产、林草植被恢复和城市雨水的综合利用^[5,6]。1995-06 北京举办了第七届国际雨水集流系统大会,并分别于 1996 年、1998 年在兰州、徐州召开了第一届全国雨水利用学术讨论会。为了推动全国雨水利用的学术交流,促进雨水利用工作的发展,2001-07-23 中国水利学会雨水利用专业委员会在甘肃兰州正式成立,这标志着我国雨水利用进入了一个新的阶段。时隔两年之后,即 2003-09 甘肃省水利厅在国家商务部和国际雨水集流系统协会的支持下,成功举办了第一届国际雨水集蓄利用技术培训班,极大的促进了全球雨水利用的学术交流与技术合作。

1 太行山区概况与水文地质特征

1.1 地理位置与气候特征

太行山是中国东部地区的重要山脉和地理分界线,耸于北京、河北、山西、河南 4 省、市间。位于 $35^{\circ} \sim 40^{\circ} 15'N$, $112^{\circ} \sim 116^{\circ} E$,北起北京西山的拒马河,南至河南北部的卫河,西接山西高原,东临华北平原,南北约 600 km,东西约 180 km。太行山北高南低,大部分海拔在 1 200 m 以上,山势东陡西缓,西翼连接山西高原,东翼由中山、低山、丘陵过渡到平原。山西高原的河流经太行山流入华北平原,近年来,由于气候条件的变化和山西省实施水土保持工程,加强了降雨的就地入渗,入境水量大量减少。多年平均降水量在 500~600 mm,季节性分布明显,主要发生在 6~9 月,占全年总降雨量的 70% 以上,且经常以暴雨的形式出现。属半湿润半干旱地带;年平均陆面蒸发量在 450~550 mm,水面蒸发量在 1 200~2 000 mm。

1.2 水文地质特性

太行山下垫面的地质岩性主要以片麻岩为主,另有少量石灰岩,其中在片麻岩区岩体风化裂隙比较发育。由于地质构造、岩性、地貌的不同,造成太行山区地下水的资源量在时空分布与存在形式上均有较大差异,其水理性质也不尽相同,太行山区地下水按其存在形式的不同,可分为裂隙水、孔隙水及喀斯特水三类。其中裂隙水主要以裂隙岩体非

饱和流的形式存在于片麻岩的风化裂隙及基岩裂隙中。从蓄水构造的角度讲,三种形式的地下水均需要不透水的隔水层、较大的集水面积和能够蓄水、透水的含水层。在片麻岩区一般由于风化裂隙较发育、广泛,因此裂隙水较为普遍;但由于缺乏良好的能够蓄水、透水的含水层,从而造成裂隙水的供水能力较小,这是太行山区裂隙水资源利用率较低的一个重要因素。但是,裂隙水作为山区宝贵的水资源,始终是当地人民维持生活与发展生产必不可少的水资源之一。勤劳的人们为了生活和发展,在长期的找水过程中积累了丰富的经验,针对不同类型区的地下水环境,建立了多种水资源开发利用模式,有位于片麻岩坡地的“远山引水、长藤结瓜”的“截潜”饮水与灌溉工程、位于石灰岩区“抽取深层喀斯特水”的饮水与灌溉工程及位于山间河谷区“挖大口井”的饮水与灌溉工程。然而,有关太行山区地下水环境、深层次水文规律及生态效应的探索目前还很少,特别是对可用于农业生产、人民生活及生态环境的浅层地下渗流的运移机理与开发利用技术的研究就更少了^[7]。

1.3 坡地水文地质结构与坡地水分转化过程

小流域坡地可以确定为一个独立的水文地质单元^[8]。片麻岩坡地岩土并非单一、均匀介质,而是由不同质地、不同结构的复杂介质构成,其结构特征表现为“岩土二元结构”。“岩土二元结构”指的是一种在垂直方向上呈“上覆土壤、下伏岩石”的结构,见图 1 所示。在太行山片麻岩区,这种结构突出表现为上部土壤结构不良,土层浅薄,几乎没有腐殖质,更为恰当的说法是角砾石之间夹杂着赤褐色的无机土,土层厚度在 20~50 cm 间;下部主要为充满裂隙的片麻岩风化层,岩体破碎,裂隙复杂、多变,风化层一般厚达 0.5~10 m,且随着埋藏深度的加深,风化岩体的不连续节理频率、张开度和渗透性均相继减小,渗透系数小的下一层于渗透系数大的上一层来说,便构成弱透水层或相对不透水层。

表 1 给出了太行山片麻岩区某坡地岩土介质不同深度的物理特性。由表 1 可以看出,坡地上部土壤层的第二层,较第一层和第三层特殊,原因主要是第一层处于地表,含有大量的杂草根系,结构比较疏松;第三层与坡地下部的风化岩体交界,含有大量的角砾石,结构同样较为疏松;而第二层角砾石含量较少,杂草根系也较少,结构比较密实。因

此, 第二层的干重度较第一层和第三层均偏高, 而有效空隙度及渗透系数较第一层和第三层均偏低。

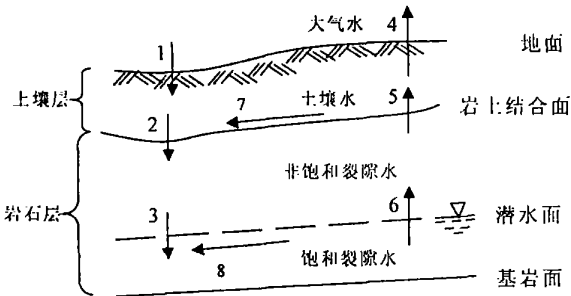
当降雨到达坡面以后一部分雨量将沿坡面产生地表径流, 另一部分渗入土壤, 随着这一过程的继续, 土壤含水量达到并超过田间持水率, 由于水分不能为毛管力所保持, 而受重力的支配, 形成重力水。当重力水渗透到风化岩石所构成的弱透水层或相对不透水层时, 一部分水量在土壤- 风化岩石的交界面处积聚, 并沿相对不透水层侧向流动, 形成壤中流, 另一部分水量则进入风化岩石继续向下渗透, 当风化岩石的含水量达到并超过岩石的持水度后, 便形成重力水, 当重力水渗透到基岩所构成的弱透水层或相对不透水层时, 水量在风化岩石- 基岩的交界面处积聚, 并沿相对不透水层侧向流动, 形成裂隙流, 如图 1 所示。

1. 4 植被对坡地降雨入渗的影响

坡地上植被, 特别是乔木和灌木通过其根系从

表 1 太行山片麻岩坡地不同深度的物理特性
Table 1 Slope physical character in depth in gneiss area of Taihang mountain

岩性	样品 个数	深度 (cm)	干重度 (g/cm ³)	有效空隙度 (%)	渗透系数 (cm/d)
褐土	5	0~ 10	11. 858	48	40. 00
褐土	5	10~ 20	12. 936	38	12. 00
褐土	5	20~ 30	12. 348	46	37. 00
片麻岩	5	30~ 40	22. 050	36	10. 54
片麻岩	5	40~ 50	23. 716	34	8. 32
片麻岩	5	50~ 60	24. 206	35	5. 21
片麻岩	5	60~ 70	23. 618	32	5. 46
片麻岩	5	70~ 80	23. 814	32	5. 12
片麻岩	5	80~ 100	23. 912	31	5. 13



- 1. 降水入渗补给土壤水; 2. 土壤水入渗补给非饱和和裂隙水;
- 3. 非饱和和裂隙水补给饱和和裂隙水; 4. 土壤水蒸发;
- 5. 非饱和和裂隙水补给土壤水; 6. 饱和和裂隙水补给非饱和和裂隙水;
- 7. 壤中流; 8. 裂隙流

图 1 岩土二元结构体界面水分转化示意图

Fig. 1 Water transport in rock-soil dualistic structure

岩石的裂隙及孔隙中吸收水分, 然后经植被的叶片, 以蒸腾的方式, 将这部分水分扩散到大气中, 这是自然界水分循环中一个重要组成部分^[9]。虽然蒸腾并不是植物生长所必须的, 但是, 蒸腾对植物生长也有一定的积极作用; 另外, 植物在通过其根系从岩体的裂隙中吸收营养物质来维持自身生长的同时, 还分泌各种化学物质, 这对坡地岩体的风化过程均起了一定的促进作用, 主要表现在岩石的破碎, 岩体裂隙的增多、增长, 裂隙宽的增大, 以及岩块孔隙的增多, 这使得在降雨过程中, 不同程度地加快了降雨的入渗过程及对浅层地下裂隙潜流的补给。水分在岩土、植物和大气中的状况、运动与变化, 和人类的物质生产和生活关系极为密切, 在当今水资源和生态环境成为世界共同面临的重大问题, 更加引起人们的关注。

2 坡地渗流集蓄技术

由于受自然条件和社会因素的影响, 太行山区水资源贫乏, 基本属于资源型缺水, 区域性、季节性干旱缺水问题严重, 近几年干旱有蔓延和加重的趋势, 水资源短缺越来越成为制约该区社会经济发展的主要因素。解决这一问题, 一方面要靠节水, 另一方面要靠开源, 要在全面节流的基础上, 进一步加强对雨水资源的可控能力。太行山区水资源的主要补给来源是大气降水, 从理论上讲提高雨水资源的利用率就是要降低无效蒸发, 其途径基本有 2 个, 第一通过集流降低土壤水的转化率, 进行雨水的异地利用; 第二通过覆盖抑制蒸发, 加强雨水的就地利用; 两种途径因土地利用类型的不同而有所不同, 在荒坡等非农用地上主要通过前一种途径提高雨水资源的利用率, 而在这种以“岩土二元结构体”地质构造为代表的坡地岩土环境中, 决定了将降雨径流转化为坡地壤中流及裂隙潜流相对容易。同时, 在太行山片麻岩区, 由于特殊的水文地质结构, 以坡地壤中流及裂隙潜流为主要特征的风化岩体裂隙饱和/ 非饱和渗流, 在降雨过程中或降雨后一段时间内普遍存在, 特别是裂隙潜流。对这部分水资源的赋存条件、变化规律及开发技术进行科学研究, 有助于利用风化岩体裂隙的蓄水功能, 提高雨水资源的转化率, 增强雨水资源的供水能力; 有利于解决降雨 (供水) 与农作物需水之间存在的时空差异, 充分、合理利用当地有限的降雨径流资

源,使之永续利用是提高当地群众生活水平、控制水土流失、改善当地生产、自然环境条件,促进经济可持续发展的主要措施。

针对太行山片麻岩坡地的水文地质特性,特别是在垂直方向上,存在两个结构面,即土壤-风化岩体结构面和风化岩体-基岩结构面,充分利用岩土二元结构体在垂直方向上,岩土渗透能力的不均匀性,分别提出了两种集蓄坡地渗流的技术。

2.1 坡地壤中流集蓄技术

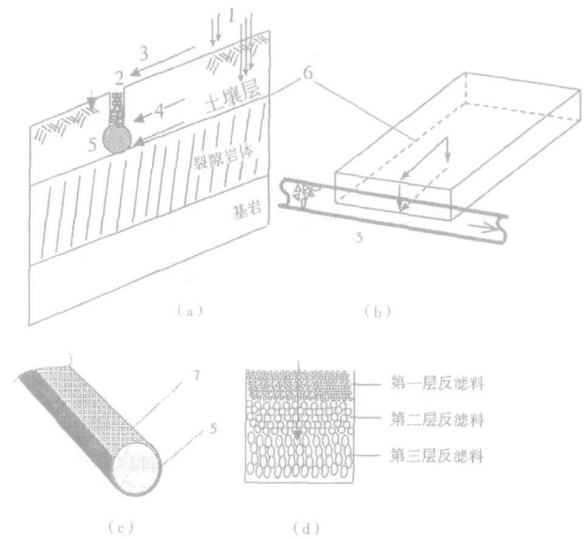
该技术利用一种蜂窝状集蓄管对土壤-风化岩石界面内的壤中流进行集蓄;同时,通过布设人工砂石反滤层对地面径流进行集蓄(图2)。其中,渗流集蓄管由半开放管壁(迎水方向为开、背水方向为关)的集水管和设置于集水管内壁的过滤介质构成^[10],见图2(c);砂石反滤层由三层不同粒径的砂石料组成,第一层厚0.1 m,反滤料的粒径0.25~1 mm,第二层反滤料厚0.1 m,反滤料的粒径1~5 mm,第三层厚0.1 m,反滤料的粒径5~20 mm;粒径较小一层的颗粒不会穿过粒径较大一层颗粒间的孔隙,从而保证反滤层每一层自身不发生渗透变形,见图2(d);另外,集蓄管的铺设方向与等高线呈一定角度,从而保证进入集蓄管中的水能够自流。该方法的工作原理为,在降雨过程中及降雨结束后的一定时间内,坡地壤中流被埋设在土壤-风化岩体结构面内的集蓄管所截断,并通过过滤介质进入集蓄管,在管内形成管流,按照管道铺设方向进行汇集,缓慢流入蓄水池。

2.2 坡地裂隙潜流集蓄技术

该技术首先根据人工植物篱的减流、增渗原理,在坡耕地上每隔7~8 m,沿等高线水平种植单行石榴(株距100 cm),并在石榴行的两侧种植高密度的牧草各一行(分别距石榴行30 cm)。降雨发生时,使降落在坡地上的雨水就地快速下渗到“岩土二元结构体”内,当水分继续下渗到“岩土二元结构体”的底部时,由于下部不透水或相对弱透水层——基岩的存在,水分将在风化岩石-基岩的交界面处积聚,并由以垂直运动为主,转为以水平运动为主,沿着基岩-风化岩体的交界面,在重力作用下,以浅层地下裂隙潜流的形式向坡地的下部或流域的出口处流动。其次,在坡地的下部或流域的出口处开挖截流沟,并在截流沟的下游合理位置修建蓄水池,通过导管将截流沟和蓄水池连接在一起,从而完成了坡地裂隙潜流的整个集蓄过程。

2.3 坡地渗流集蓄技术的优点

与传统雨水集蓄技术相比坡地渗流集蓄技术有以下优点:第一,不必修建专门的集流场与沉淀池,因此不会破坏当地的生态环境;第二,更程度地解决了,时间上降雨相对集中与作物需水期分散的矛盾与空间上作物需水相对集中与降雨分散的矛盾;第三,可以充分利用风化裂隙岩体的蓄水空间,对雨水资源进行调蓄,可大量减少蓄水池的修建,降低雨水集蓄利用的投资;另外,充分利用风化裂隙岩体对雨水资源的调蓄作用,可以在暴雨洪水中削减洪峰,起到防灾减灾的作用。



1. 降雨, 2. 砂石反滤层, 3. 地面径流, 4. 壤中流, 5. 集蓄管, 6. 岩土结合面, 7. 过滤介质
(a) 侧面图, (b) 正立面图, (c) 集蓄管放大示意图, (d) 反滤层放大示意图

图2 坡地壤中流集蓄系统示意图

Fig. 2 Collecting system of soil water in slope

3 小结

雨水集蓄利用作为一种古老的技术,在科技高速发展,同时又面临水资源严重短缺的今天,将重新焕发出新的生机与活力。

针对太行山区干旱、缺水的发展现状,在全面分析太行山区水文地质特征,特别是坡地水文地质结构特性的基础上,提出了坡地“岩土二元结构体”的概念,并对其交界面内存在的壤中流及裂隙流的发生机理进行了分析,最后,提出了两种集蓄坡地渗流的技术,该技术创新了雨水利用的形式,

在中国北方石质山地具有广泛的推广与应用价值。

参考文献 (References):

- [1] Changming Liu, Haisheng Mou. Rainwater Catchment Systems Context, Rainwater Utilization for World' s People [A] . In: 7th International Rainwater Catchment Systems Conference [C]. Proceedings Beijing, China, 1995. 1: 21~ 25.
- [2] Changming Liu, Xiwu lte. Rainwater catchment systems of north China [J] . *Journal of International Rain-water Catchment Systems*, 1993, (1): 37~ 40.
- [3] Changming Liu . Strategies for China' s Water Problems in the 21st Century [M] . Beijing: Science Press. 1996. 170~ 187.
- [4] Shizuo Shindo. Rainfall harvesting in Volcanic Islands of Japan- Case studies of the Izu Islands [A] . Proceeding of International Symposium&2nd Chinese National Conference on Rainwater Utilization [C] . Xuzhou, Jiansu Province, China 1998. 131~ 133.
- [5] Liu Changming, Mou Haisheng. Expounding connotation of rainwater resources and its utilization [A]. In: Research on Water Problems in China [C]. Beijing: Meteorological Press, 1996. 160~ 164. [刘昌明, 牟海省. 论雨水资源及雨水利用的内涵 [A]. 中国水问题研究 [C] . 北京: 气象出版社, 1996. 160 ~ 164.]
- [6] Zhu Qiang. Sustainable development of water resources and rainwater harvesting [J] . *Technique of Seepage Control*, 2002, 8 (1): 2~ 5. [朱强. 水资源可持续发展和雨水集蓄利用 [J] . 防渗技术, 2002, 8 (1): 2~ 5.]
- [7] Cao Jiansheng, Zhang Wanjun, Tang Changyuan. Dynamic variation or subsurface flow in small basin [J] . *Journal of Hydraulic engineering*, 2002, (6): 9195. [曹建生, 张万军, 唐常源. 太行山典型小流域潜流动态变化研究 [J] . 水利学报, 2002, (6): 91~ 95.]
- [8] David R. Maidment, Zhang Jianyun, Li Jisheng. Hydrology manual [M] . Beijing: Science Press, 2002. 203 ~ 249. [David R. Maidment, 张建云, 李纪生. 水文学手册 [M] . 北京: 科学出版社, 2002. 203~ 249.]
- [9] Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchan. Hydrodynamics of soil water [M] . Beijing: Tsinghua University Press, 1988. 18~ 24. [雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学 [M] . 北京: 清华大学出版社, 1988. 18~ 24.]
- [10] Zhang Wanjun, Cao Jiansheng. A kind of pipe collecting seepage water [p] . China: utility and new pattem. 02289351. 2. 2003. [张万军, 曹建生. 一种渗流集蓄管 [P] . 中国: 实用新型, 02289351. 2. 2003.]

Slope Seepage Water Collecting Techniques in Gneiss Area in Taihang Mountain

CAO Jiansheng^{1,2}, LIU Changming¹, ZHANG Wanjun¹

(1. Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization, CA S, Shijiazhuang 050021, China;

2. The Graduate School, Academia Sinica, Beijing 100039, China)

Abstract: To increase rainwater harvesting efficiency and scientifically value the potential of regional rainwater becoming resource, based on analyzing the history and present situation of rainwater use in and out of china, analysed the hydrology and geology of slope in gneiss area. The surface of slope was covered by a complex medium, hereinto, the up layer was soil and the down layer was rock, we called the distribution rock-soil dualistic structure. The structure was suit for collecting rainwater and the collecting technique was innovative, which were easily spreaded and used in the mountainous area of north china.

Key words: slope; soil water flow; fissure water; seepage; collecting technique