

姜光辉, 刘凡, 王奇岗, 等. 基于表层岩溶带调控的峰丛洼地低影响开发构建[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 165-173.

DOI: 10.11932/karst2021y32

基于表层岩溶带调控的峰丛洼地低影响开发构建

姜光辉, 刘凡, 王奇岗, 郭芳

(中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要: 岩溶峰丛洼地地区石漠化、饮水困难和水污染等环境问题高发, 生态环境十分脆弱。低影响开发概念的引入有助于规范开发行为, 促进水资源的高效利用, 降低石漠化和地下河污染风险。根据水文条件和开发方式岩溶洼地空间分为坡耕地水土流失敏感区、表层岩溶泉水源地敏感区和落水洞污染输入敏感区。低影响开发模式总体是在3类敏感区实现5个管理目标。坡耕地敏感区的低影响开发目标设置为降低农田耗水量和减少水土流失, 开发途径是减少蒸发和调控坡面洪水径流。表层岩溶泉水源地敏感区的管理目标是降雨—径流资源化利用和饮用水安全保障, 通过实施雨水收集回用工程和设置水源地保护区来实现。落水洞敏感区需要通过设置径流缓冲区和沉淀过滤池来预防污染物进入。我国南方石漠化地区探索和总结出以表层岩溶带降雨—径流管理为特征的低影响开发模式。该模式要求峰丛顶部留置生态保护区涵养水源。岩溶洼地底部为落水洞排洪预留缓冲区, 利用岩溶裂缝设置下凹式绿地, 实现自然渗透和净化。“峰”、“洼”之间过渡区划定水源地保护区边界, 同时设法增加雨水资源化利用率, 补充生态和生活缺水量。低影响开发模式也适用于峰丛洼地发育的东南亚和中美洲等地区。

关键词: 低影响开发; 集雨; 石漠化治理; 降雨补给; 水柜

中图分类号: TV213.9 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)02-0165-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

由峰丛洼地、峰林平原、坡立谷、断陷盆地等地表形态, 以及溶洞、地下河等地下空间组合构成的岩溶环境具有强烈的脆弱性。在岩溶发育区, 人类活动易导致森林退化、地面塌陷、地下水污染、石漠化等环境问题。作为居住环境的岩溶洼地具有空间狭小、易旱易涝、水土流失严重等特征, 因此, 在洼地开发过程中既要设法缓解用水紧张, 还要降低开发活动对地表和地下空间环境的干扰, 以降低环境灾害发生的风险。

由于全球岩溶类型多样, 人们对环境管理有着

不同的侧重点。在欧洲, 根据污染物迁移的路线和条件, 提出了岩溶含水层脆弱性的评价方法, 并运用该方法建立脆弱性分布图, 为大区域范围内有差别地制定地下水管理方案提供依据^[1]。热带亚热带地区具有地理代表性以及重要科学、文化和生物多样性价值的岩溶景观则在多种国际公约框架下成立了保护区^[2]。一些干扰强烈且环境破坏严重的岩溶地区需要进行生态修复, 保持保护与开发的平衡^[3]。

经历了石漠化的中国南方岩溶区, 其生态环境治理目标围绕选育兼具经济和生态效益的新品种、建立环境友好的产业模式。环境管理重点是遏制水土流失, 发展节水农业, 通过雨水利用、表层岩溶泉

基金项目: 广西重点研发计划(桂科 AB18221093); 国家自然科学基金(42172287); 桂林市科学研究与技术开发计划(20180101-2)

第一作者简介: 姜光辉(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩溶水文学研究。E-mail: bmnxz@126.com。

收稿日期: 2021-06-13

开发等方式增加可利用的水资源量^[4-7]。但同时一些治理工程对岩溶水文和生态过程认识不足,以及技术方法单一导致环境管理缺乏系统性。

表层岩溶带位于含水层的上部,它与土壤和植被构成不可分割的功能连续体,发挥着固碳、增汇、保水、过滤污染物等作用,同时它对森林植被退化、山坡开垦、工程建设活动敏感。表层岩溶带调蓄功能强弱和管理措施直接关系到水资源开发利用和地下水的防护,是洼地开发利用必须关注的关键带^[8]。本研究借鉴城市低影响开发理念^[9],探讨岩溶环境管理的思路;总结石漠化治理经验,提出峰丛洼地环境的管理方案。

1 峰丛洼地的开发及环境破坏

岩溶洼地或漏斗是石灰岩等可溶岩分布区在丰富雨水溶蚀作用下形成的一种形似漏斗的负地形,在东南亚和中美洲被称为“平底锅”地貌^[10]。岩溶洼地广泛分布在中国南方、东南亚、中东欧、美国肯塔基州、中美洲、新西兰等国家和地区,被认为是判断可溶岩地区岩溶是否发育的标志性地貌。岩溶洼地有利于降雨入渗,没有地表排水口,其底部的落水洞成为径流快速排泄通道,这也导致了地表易旱易涝和地下水易污染。岩溶洼地与峰丛组合形成峰丛洼

地,是中国南方分布最广泛、最典型的岩溶地貌。

岩溶地貌发育和水文系统形成过程中地下水呈现垂直分带^[11]。表层岩溶带承担着将降雨渗流汇集并经由溶蚀裂隙、落水洞等通道进入含水层的功能。外源水以及洼地形成的坡面流可能不经过表层岩溶带,而是直接通过落水洞排泄进入地下河,在此过程中碳酸钙发生溶蚀并流失,岩石上留下溶沟等多种溶蚀形态。表层岩溶带成为岩溶含水层顶部溶蚀最强烈的部分。表层岩溶带具有良好的渗透性和吸收降雨径流的能力,但厚度小,调蓄功能和防护能力弱。表层岩溶带的下界面渗透性降低,阻挡径流继续下渗,局部区域出现侧向径流和形成表层岩溶泉。表层岩溶带的下部为包气带,地下水运动以垂直渗流为主。含水层的饱水带径流汇集至少量岩溶管道,不仅径流速度快,而且水位或流量具有剧烈的动态。

表层岩溶带的发育增强了岩溶洼地的渗透性,使水资源和土壤难以保存,岩溶洼地成为干旱和水土流失易发区。随着人口不断增加,岩溶洼地被开发利用,生态环境一度遭受到严重破坏,引起表层岩溶带结构改变和功能弱化。人类活动对表层岩溶带的影响包括:建房、修路、采石等活动,直接破坏了其结构;森林退化伴随着蒸发、入渗、产流、排泄、溶蚀等水文和水化学的响应,一些地区采取凿岩掘土的方法来改造坡耕地(表1)。

表1 峰丛洼地开发及环境管理措施

Table 1 Development of peak cluster depression and environmental management measures

类型	峰丛洼地的开发及环境影响				环境管理措施
	岩石	土壤	植被	水	
中国南方岩溶	坡改梯、采石、路基、隧道建设等改变岩溶结构	坡耕地土壤遭受严重侵蚀,质量下降	森林遭砍伐退化为灌木林或草坡	地表水、地下水、雨水综合利用缓解干旱,但产生更多生活废水	进行石漠化生态修复,建立环境友好的产业发展模式
印尼岩溶	采用石块砌墙保土,修建坡耕地	坡耕地种植引起水土流失	森林面积减少,转变为耕地或经济果木林	雨水资源化利用,同时农业活动和生活垃圾污染地下水	开发利用地下河建成集中供水点
菲律宾岩溶	采石、地震和台风引起滑坡和崩塌加速了岩溶风化和地质景观破坏	很小改变	森林面积减少,濒危物种受到威胁	开发岩溶泉和开采地下水。极端天气引起水资源短缺	建立保护区对环境进行全面的保护

相比较而言,中南半岛与中国南方地区同在季风控制区和特提斯构造带,不仅岩溶发育具有显著的相似性,而且石漠化和水环境质量下降也广泛发生,峰丛洼地的环境管理成为一个受到关注的国际性问题^[12]。越南政府在西北部石漠化严重的河江省

和北部高平省岩溶区申报建立了世界地质公园,采取从碎屑岩山区远距离引水的方法在岩溶洼地建成以乡镇为中心的集中供水设施,支持旅游业发展。国际岩溶研究中心培训班收集的资料显示,泰国清莱府则采取修建蓄水池开发利用岩溶泉和打井开采

地下水相结合的方法解决缺水问题,鼓励当地群众发展园艺旅游业^[13]。越南、老挝、泰国、马来西亚受干扰程度小的峰丛洼地保留了原始森林生态系统,表层岩溶带表现出良好的服务功能,支撑了丰富的生物多样性资源。这些地区采取建立保护区的方式对岩溶环境进行整体性保护,例如,越南下龙湾、宁平长安、峰牙—己榜属于世界自然遗产地保护区;老挝南诺石山保护区申报成立世界自然遗产地。

马来群岛至中国南海岛礁,以及印尼至菲律宾的板块结合部的岛弧上出露新生代礁灰岩。相比于中国南方地区和中南半岛的古生代至中生代的碳酸盐岩,礁灰岩透水性好,且岩溶洼地规模较小。印度尼西亚爪哇岛南部岩溶区锥状山峰海拔 600 m,相对高度约 50 m。礁灰岩岩溶率达到 6.5%~33.6%^[14]。这种情况下,岩石整体渗透性更强,表层岩溶带很难储水,其调蓄功能和净化能力反而较弱^[15]。该地区采用礁灰岩石块建立挡土墙,利用了岩溶洼地底部堆积石灰土的低渗透性修建集水塘。生活污水和农业活动对地下水造成污染。

菲律宾薄荷岛的巧克力山是新构造运动俯冲带陆块多次抬升并经长期溶蚀而形成的一类锥状岩溶地貌^[16]。越靠近海岸带峰丛就越年轻,相反离海岸

带越远的岩溶地貌发育越成熟。远离海岸带的峰丛仅能生长草丛,并且草丛因为缺水而枯黄,形成了形似巧克力状的山丘,数量有 1 776 座。当地群众利用岩溶泉在坡立谷修建了水渠,种植水稻。但是,随着人口增加,农田不断侵占森林,同时巧克力山的礁灰岩作为建筑材料被开采,使政府保护岩溶景观和生物多样性的目标难以实现^[17]。

2 中国南方峰丛洼地低影响开发的探索

广西以及邻近的贵州、云南以及越南北部山区峰丛洼地分布广且发育典型,岩溶洼地的干扰程度高,石漠化曾经十分严重,且干旱和洪涝问题突出。中国南方石漠化治理工程采取了生态移民、退耕还林、封山育林等生态措施,实施了水资源开发、土地整理、流域单元治理等工程方案,探索了生态旅游、种养一体等新型产业模式,取得了积极成效^[18]。

峰丛洼地降雨入渗系数达到 50% 左右,导致地表可调控利用的水量较少。表层岩溶泉的开发为缓解用水紧张提供了新思路(图 1)。表层岩溶泉枯季流量每天 1~50 t,适合作为农村家庭供水或村寨集中供水水源。广西通过普及农村水柜,调蓄表层岩溶

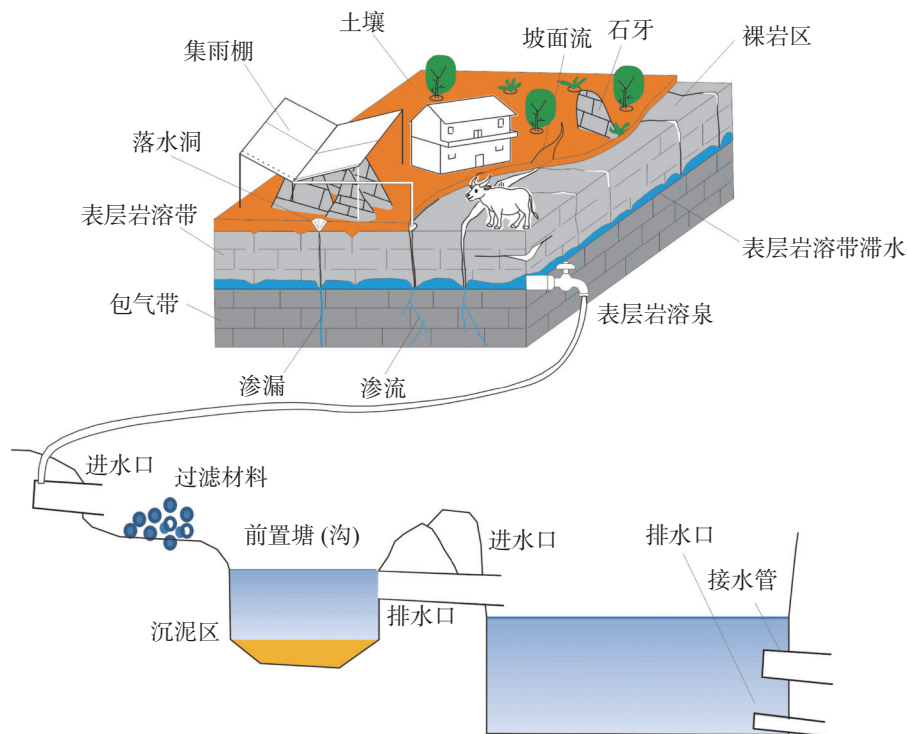


图 1 中国南方地区峰丛洼地以雨水/表层岩溶泉利用为特色的低影响开发

Fig. 1 Low Impact Development characterized by rainwater/epikarst spring utilization in peak cluster depressions in South China

水和收集雨水作为饮用或灌溉水源。脱贫攻坚期间广西河池、百色典型岩溶贫困县修建水柜上万座。表层岩溶泉和降雨的水量不稳定,具有强烈的季节性变化,引起饮用水水质变质问题^[19]。峰丛洼地低影响开发的重点是扩大雨水收集利用,实现集水设施的科学管理^[20]。雨水开发和表层岩溶水联合利用,增强表层岩溶带的“海绵”效应,解决饮用水不达标问题。

岩溶洼地生活废水排放和农业活动引起的水环境污染逐渐加重,在不少地区的表层岩溶泉中检测到氮、磷、微生物、有机类污染物^[21]。重庆、四川、贵州、湘西等地区分布由紧密褶皱构造控制而发育形成的槽谷型洼地,其底部经常有季节性的河流水系流入落水洞。低影响开发需要对作为水源的表层岩溶泉制定保护方案,提高废水达标排放率,通过引入植草沟、人工湿地等技术增强表层岩溶带的过滤净化功能,减少污水通过落水洞排放。

控制水土流失也是峰丛洼地开发需要重点关注的问题。贵州毕节等地区由间互型或互层型碳酸盐岩发育形成的峰丛洼地土壤较厚,易发水土流失^[22]。贵州毕节地区探索通过修建生物篱,建立混农林模式,采取秸秆还田等生物措施阻止表土流失^[23]。但是阻断土壤通过表层岩溶带地下漏失的技术成果还较少应用。

3 石漠化治理示范区的低影响开发试验

位于右江河谷的广西平果县果化石漠化治理示范区成立于2004年。果化示范区在峰丛洼地严重石漠化区先后试验了玉米/牧草轮作、水果+草药复合种植等技术,最终选择推广火龙果^[24]。火龙果原产地为中美洲,在广西亚热带岩溶石山适宜性好。示范区修建两座500 m³水池调蓄峰丛洼地的3个表层岩溶泉,提高了水资源开发利用,保证了火龙果灌溉用水。火龙果代替广种薄收的玉米成为岩溶洼地主要种植品种。示范区通过开发表层岩溶泉、改变种植品种、恢复植被、坡改梯等措施有效遏制水土流失,构建低影响开发模式。

贵州石漠化治理也以控制水土流失为主要任务。示范区通过农林品种优选、土壤质量管理、水利工程开发等改善农业条件。治理工程采取免耕技术减小对土壤的干扰,通过植草种树增加土壤覆盖度和

减少裸岩率,修建排水沟和挡土墙减轻山洪径流冲刷。治理工程采取坡改梯等工程性的措施,或者采取秸秆还田和施加生物炭等农艺管理措施改善土壤质地,提高抗侵蚀能力。花江示范区在北盘江南岸岩溶峡谷山坡严重石漠化区构建了花椒种植园。花椒属于芸香科小乔木,根系发达,对土壤质量要求不高,喜钙且耐旱,成为贵州和重庆等地区进行石漠化治理的优选物种。示范区尝试构建混农林发展模式,提高农业生态系统的抗逆性和水分利用效率,推行保水剂、秸秆还田、铺设地膜等农艺节水措施^[25]。

简而言之,当前石漠化治理示范区研究作物优选、水土保持技术和农艺水肥管理,主要目标是通过农业增收实现脱贫致富,同时遏制水土流失,保持土地资源可持续。本研究提出的峰丛洼地低影响开发主要是应用雨洪管理和表层岩溶带径流调控技术,克服地表降雨快速下渗引起的干旱、洪涝、水土流失和污染等问题。两者目标有共同之处。

4 低影响开发的技术实现

根据土地的功能和国土资源开发方式的差异,研究提出峰丛洼地存在三种类型敏感区:①土地开垦、种植、施肥、喷药等农业活动形成的坡耕地敏感区;②水资源开发活动引起的与农业、养殖、生活等排污行为关联的水源敏感区;③受到开发活动波及影响的地下河敏感区。每一种类型敏感区的管理需要采取相应的低影响开发技术作为支撑。针对三种类型的敏感区,峰丛洼地低影响开发确定饮水安全、水土保持、水环境保护方面的五个目标(表2)。管理目标的实现需要充分考虑表层岩溶带的含水特征,综合采取雨水利用、表层岩溶水开发、降雨入渗管理等技术手段。

坡耕地敏感区是水土流失高风险区,而且具有灌溉用水需求。坡耕地敏感区位于岩溶洼地底部周围坡度小于25°的坡脚部位。该地貌部位的表层岩溶带具有一定的土壤覆盖度,表层岩溶水局部排泄形成泉水,地表坡面流较为丰富。坡耕地敏感区进行梯田改造,被广泛用于种植玉米、大豆等作物,引起森林退化和水土流失,形成石漠化景观。近年来,石漠化治理示范的探索表明,坡耕地敏感区可行的管理方法不在于农田改良,而在于选择种植合适的林、果、草品种,能够适应耕地小块分散且岩石裸露

表 2 岩溶洼地低影响开发的技术方法
Table 2 Technical methods of Low Impact Development in karst depressions

低影响开发目标	技术设计	技术实现
(1)充分利用雨水	构建人工集雨面,将雨水收集与表层岩溶带调蓄结合起来,利用岩溶空间的蓄水和净化能力	采用屋顶、路面、小广场作为集水面,并配置水质净化设施。利用表层岩溶带形成的自然排泄出口修建蓄水池。雨水收集后注入表层岩溶带,利用表层岩溶带的净化能力和调蓄功能
(2)保证表层岩溶泉饮用水安全	调查坡面表层岩溶带发育特征,建立表层岩溶泉保护区	绘制表层岩溶发育剖面图,编制表层岩溶带水文地质图,划分表层岩溶泉水源地保护的核心区和缓冲区
(3)降低农田耗水	选种优良品种、探索农林混作模式、增强土壤保水能力	修建渗水池、挡土墙,进行坡改梯,实施客土回填、秸秆还田
(4)减少水土流失	增强表土抗侵蚀性、拦蓄坡面流、堵住地下漏失	通过拦水坝收集地表径流。落水洞周围设置下凹式绿地和植草沟等拦截沉淀泥沙
(5)保护地下水环境	划定地下水生态保护红线,增强水源涵养作用	在陡坡、裸岩地、风水林、水源林等有条件的地区设置为生态保护区。严禁弃渣和垃圾填埋、污水处理未达标排放等行为

的岩溶小生境特征,建立农林混作的立体农业结构模式。同时充分利用表层岩溶带形成泉水的水文地质条件,采取多种手段建立雨水/径流收集和灌溉设施,推广采用节水灌溉技术。

岩溶洼地农药化肥的使用、以及生活污水、养殖废水的排放对表层岩溶泉这种补给范围小且径流路径短的水源保护构成很大的威胁。洼地的管理需要规划水源敏感区,掌握表层岩溶带结构和水文过程,控制敏感区内部污染源,减少水源污染风险。我国现有的水源地环境保护标准均未涉及表层岩溶带水源。可参考地下水源保护技术^[26]。农村居民点生活污水减少无规划排放,农户按照“生态宜居”新农村建设要求改造厕所、修建生物滤池等生活污水收集处理设施。鸡舍、猪圈、羊圈等家庭养殖设施因为存在较大的污染风险,而不宜设置在水源敏感区内。

岩溶洼地底部平地、洼地中间落水洞周围以及常年性入洞溪流两岸设置为地下河敏感区。当岩溶渗漏性强烈时,洼地底部不会出现常年性的水流。而且一些位于地下河主管道上方的岩溶洼地经常发生内涝,这些水文因素导致围绕落水洞建立污染物拦截、过滤、消纳设施起不到预期效果。岩溶洼地的防污措施可以选择下凹式绿地、植草沟或人工湿地。防污范围需要扩大到洼地底部包含落水洞在内的表层岩溶带。

5 峰丛洼地的低影响开发构建

峰丛洼地岩溶地貌的发育形成有利于降雨通过地表和地下路径快速渗漏排泄,引起干旱、内涝、水

土流失、水环境污染等问题。该类型脆弱环境区需要建立以低影响开发为中心的环境管理新模式,促进土地、水资源、地质景观、生物多样性的可持续,实现峰丛洼地的合理开发。受到地形和岩溶发育特点等因素制约,岩溶洼地的底部比峰丛顶部更容易积存土壤和水分,致使土地功能存在空间差异,其开发利用方式呈现垂直“三分法”土地利用结构(图 2)。峰丛顶部裸岩表层岩溶带适宜保留林、灌、草等原生态特征,作为封山育林区。岩溶洼地的底部覆盖型表层岩溶带是居住和农业等集约利用区。两者之间的过渡地带为林、果、农混合种植区。

依据土地利用“三分法”以及岩溶洼地三种敏感区的划分,岩溶环境管理新模式强化雨水、坡面流、表层岩溶水的资源化利用,以达到缓解用水紧张、减

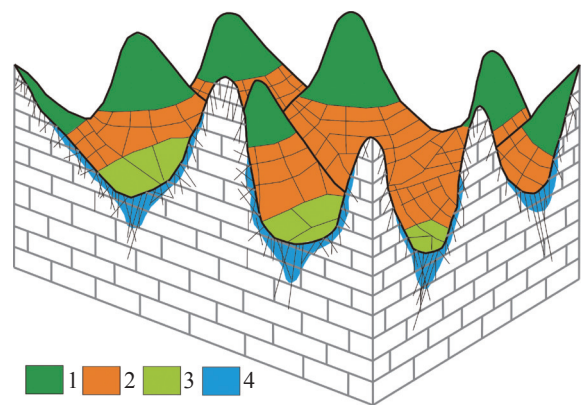


图 2 峰丛洼地“三分法”土地利用结构和低影响开发构建
1-水源涵养区,主要功能是增加表层岩溶水的补给 2-林、果、农混合种植区,设置雨水和表层岩溶泉的拦蓄管理设施 3-居住、农业、养殖等集约利用区,设置垃圾处理和污水过滤净化设施 4-表层岩溶带

Fig. 2 Land use structure and Low Impact Development construction of “three-division method” in peak cluster depression

缓径流外排的目标。新模式建议借鉴城市低影响开发的思路和技术,根据表层岩溶带水文地质条件设置水源保护红线,保证表层岩溶泉饮用水安全。新模式建议依照水土流失和污染物排放的发生条件和迁移路径,抓住表层岩溶带水量涨落的关键时机,做好涵养、拦蓄、收集、堵漏、过滤等控制设施,达到充分积存、充分净化、消减洪水、细水长流的效应。

6 结 语

锥状或塔状岩溶是热带和亚热带地区具有代表性的地貌。印度尼西亚爪哇岛具有锥状峰丛与岩溶洼地组合地貌。菲律宾薄荷岛具有一种锥状峰丛巧克力山与坡立谷组合而成的岩溶地貌,中国南方以及中南半岛多个地区具有峰丛与岩溶洼地组合形成的峰丛洼地。这些地区生态环境脆弱,历史上或现在由于过度开发引起多种环境问题。为此该类型岩溶环境的管理受到国际关注。由于岩溶环境中土壤缺少且岩石裸露率高,表层岩溶带发育并对水资源调蓄发挥重要作用。岩溶环境的管理需要针对表层岩溶带研发和采取低影响开发技术,保持表层岩溶带的调蓄能力和污染物过滤功能,减少开发活动对脆弱环境的影响。

经历了长期开发后峰丛洼地形成了垂直“三分法”的土地功能分区和土地利用结构。峰丛顶部适宜建立水源涵养区,增加表层岩溶水的补给。山坡的林、果、农混合种植区是水土流失重点防控区,同时应划出水源地保护区,保证表层岩溶泉作为水源的饮用水安全。在水源地保护区内管理生活污水、路面径流和坡耕地施肥活动,减少水源污染风险。

峰丛洼地坡耕地的管理需要加强雨水收集技术的应用,构建坡耕地雨水灌溉设施。雨水收集的集水面采用不同材质和建筑方式的接雨器,并且有可能将雨水收集与表层岩溶带调蓄结合起来,提高雨水利用效率。岩溶洼地底部通过落水洞管理减少地下河污染负荷。在落水洞径流路径上设置串珠状的下凹式绿地和人工湿地,利用溶蚀裂隙等岩溶负形态增强过滤功能。

参考文献

[1] Marín A I, Martín Rodríguez J F, Barberá J A. Groundwater vulnerability to pollution in karst aquifers, considering key chal-

- lenges and considerations: application to the Ubrique springs in southern Spain[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29: 379-396.
- [2] Gunn J. Karst groundwater in UNESCO protected areas: a global overview[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29: 297-314.
- [3] Gregorič A C. Typical Doline and Surface Landforms of Kras (Slovenia): Karst Landscape Features and Possibilities for Their Conservation[J]. *Geoheritage*, 2021, 13: 26.
- [4] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 程洋, 杨奇勇, 吴泽燕, 梁建宏. 21世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 461-468.
- JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, TONG Liqiang, CHENG Yang, YANG Qiyong, WU Zeyan, LIANG Jianhong. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of southwest China in the 21st century[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 461-468.
- [5] 袁成军, 熊康宁, 容丽, 翁应芳. 喀斯特石漠化生态恢复中的生物多样性研究进展[J]. *地球与环境*, 2021, 49(3): 336-345.
- YUAN Chengjun, XIONG Kangning, RONG Li, WENG Yingfang. Research progress on the biodiversity during the ecological restoration of karst rocky desertification[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(3): 336-345.
- [6] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 谭秋, 冉晨, 陈欢, 习慧鹏, 陈飞, 操玥, 吴路华, 李汇文, 钟昕. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 680-693.
- LUO Xuling, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, TAN Qiu, RAN Chen, CHEN Huan, XI Huipeng, CHEN Fei, CAO Yue, WU Luhua, LI Huiwen, ZHONG Xin. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest Karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 680-693.
- [7] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 曾馥平. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(10): 1264-1272.
- WANG Kelin, YUE Yuemin, CHEN Hongsong, ZENG Fuping. Mechanisms and Realization Pathways for Integration of Scientific Poverty Alleviation and Ecosystem Services Enhancement[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Science*, 2020, 35(10): 1264-1272.
- [8] 姜光辉, 郭芳. 岩溶水柜集流坡面的径流模式和调控建议[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 271-278.
- JIANG Guanghui, GUO Fang. Runoff pattern and adjusting measure of the karst slope for tanks[J]. *Advances of Water Science*, 2021, 32(2): 271-278.
- [9] 住房和城乡建设部印发:《海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建》[J]. *建设科技*, 2015(1): 10.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development issued: technical guidelines for sponge city construction: low-impact development of rainwater system construction[J]. *Construction Science and Technology*, 2015(1):10.
- [10] LIANG Fuyuan, DU Yunyan, GE Yong, LI Ce. A quantitative morphometric comparison of cockpit and doline karst landforms[J]. *Journal of Geography Sciences*, 2014, 24: 1069-1082.

- [11] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 1-8.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-8.
- [12] 何师意, 袁道先, Do Tuyet. 越南北部岩溶特征及其相关环境问题[J]. 中国岩溶, 1999, 12(1): 90-95.
HE Shiyi, YUANG Daoxian, Do Tuyet. Characteristics of karst in northern Vietnam and its relevant environmental problems[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 12(1): 90-95.
- [13] JIANG Guanghu, CHEN Zhao, Chaiporn Siripornpibul, Eko Haryono, GUO Fang. The karst water environment in Southeast Asia: Characteristics, Challenges, and approaches[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29: 129-135.
- [14] Riyanto Indra Agus, Widyastuti M, Cahyadi Ahmad, Agniy Romza Fauzan, Adji Tjahyo Nugroho. Groundwater Management Based on Vulnerability to Contamination in the Tropical Karst Region of Guntur Spring, Gunungsewu Karst, Java Island, Indonesia[J]. *Environment Process*, 2020, 7: 1277-1302.
- [15] 张宪鑫. 浅析印尼巴齐丹火电厂岩溶地基处理[J]. *东方电气评论*, 2010, 24(3): 55-61.
ZHANG Xianxin. Method of karstification groundwork treatment for Indonesia Pacitan Power Plant[J]. *Dongfang Electric Review*, 2010, 24(3): 55-61.
- [16] Moyra E, J Wilson. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: implications for equatorial carbonate development[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 147(3-4): 295-428.
- [17] Boquet Y. It's More Fun in the Philippines? The Challenges of Tourism[M]. In: *The Philippine Archipelago*. Springer Geography. Springer, Cham, 2017.
- [18] 王宇, 张华, 张贵, 彭淑惠, 杨文礼, 蔡保新, 冯敏, 王梓激. 云南省石漠化调查及治理综述[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 486-496.
WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, PENG Shuhui, YANG Wenli, CAI Baoxin, FENG Min, WANG Ziwei. Review of the investigation and integrated renovation on rocky desertification in Yunnan Province, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 486-496.
- [19] 郭永丽, 姜光辉, 赵红亮, 王紫燕, 苑晓雨. 峰丛洼地典型家庭水柜水量及水质的动态变化特征[J]. *中国农村水利水电*, 2017(10): 40-44.
GUO Yongli, JIANG Guanghui, ZHAO Hongliang, WANG Ziyan, YUAN Xiaoyu. Dynamic variation characteristics of water quantity and water quality of typical family water tanks in peak-cluster depression[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(10): 40-44.
- [20] 高璟钰, 朱林阁, 李晓娜. 生物慢滤技术在石漠化农村中的探索与实践[J]. *中国农村水利水电*, 2016(7): 25-29.
GAO Jiangyu, ZHU Linge, LI Xiaona. Exploration and implementation of bio-slow sand filtration technology in rural rocky desertification Areas [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(7): 25-29.
- [21] 王涛, 吴启美, 莫光员, 张朝晖. 涟江上游表层岩溶泉水污染源解析[J]. *环境化学*, 2021, 40(3): 729-736.
WNG Tao, WU Qimei, MO Guangyuan, ZHANG Zhaohui. Analysis on pollution sources of epikarst spring water in the upper reach of Liangjiang River[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(3): 729-736.
- [22] 黄凯, 刘瑞禄, 覃莉, 宋涛, 刘忠仙, 李瑞. 不同降雨条件下坡长对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 271-280.
HUANG Kai, LIU Ruilu, QIN Li, SONG Tao, LIU Zhongxian, LI Rui. Effects of slope length on soil erosion of karst slope under different rainfall conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 271-280.
- [23] 盘礼东, 李瑞, 黎庆贵, 黄凯, 张琳卿. 黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 9-16.
PAN Lidong, LI Rui, LI Qinggui, HUANG Kai, ZHANG Linqing. Effects of straw mulching on runoff and sediment characteristics of sloping farmland in the karst area of western Guizhou[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 9-16.
- [24] 黄玉清, 何成新, 王晓英, 李先琨, 陆树华. 西南喀斯特山区农果草系统耦合及生产效益分析: 以广西平果县果化镇龙何屯为例[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(6): 156-160.
HUANG Yuqing, HE Chengxin, WANG Xiaoying, LI Xiankun, LU Shuhua. Integrated crop, fruit and pasture system and its economic benefits in Southwest China karst terrain: A case study of Longhe Village, Guohua Town, Pingguo County, Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(6): 156-160.
- [25] 吴清林, 梁虹, 熊康宁, 李瑞. 石漠化环境水土综合整治与山地混农林业前沿理论与对策[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 11-18, 33.
WU Qinglin, LIANG Hong, XIONG Kangning, LI Rui. Frontier theories and countermeasures for integrated regulation of soil and water loss and mountainous agroforestry in rocky desertification environment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 11-18, 33.
- [26] 中华人民共和国国家环境保护标准. 农村饮用水水源地环境保护技术指南(HJ 2032-2013), 2013.
Ministry of Environmental Protection, PRC. Guideline on technologies of pollution prevention and control for rural drinking water sources environmental protection, HJ 2032-2013, 2013.

Low Impact Development construction of peak cluster depression based on regulation of epikarst zone

JIANG Guanghui, LIU Fan, WANG Qigang, GUO Fang

(*Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract Most of the bare karst areas environments with the widest distribution in southern China have peak cluster depression landforms. With high incidence of many environmental problems such as rocky desertification, flood, water shortage, and water pollution, the karst environment there is proved to be very fragile. For the bare karst environment, it has a very developed subterranean river drainage networks, causing most of the water resources to enter the aquifer, and then flow and discharge rapidly through the underground karst conduits. For a long time, as a karst living environment, the lack of water and soil resources have become the main cause of environmental degradation. The introduction of the concept of Low Impact Development (LID) is necessary and timely in the karst peak-cluster depression area, based the rich research and practice in southern China. It is believed to be effective for promoting the utilization of water resources, reducing human disturbance, and covering the other environmental problems, such as rocky desertification and risk of underground river pollution.

The LID methods based on the regulation of the epikarst zone and sinkholes are mainly suitable for guiding the development of karst land in dolines and depressions. It is realized by solving the questions of how to plan the land use and to design the rural infrastructure according to the special hydrogeological conditions and epikarst hydrological process. The concept and technology of LID in view of urban facilities will give guidance for the construction of a holistic environmental remediation project in a rural area, including water resources storage, pollutant treatment, and land restoration for rocky desertification. It is very helpful to promote rural revitalization in the remote and fragile ecological environment area of karst rocky mountains.

Karst dolines naturally have topographic and hydrogeological conditions that promote rapid rainfall infiltration. Controlled by monsoon climate, the karst environment is characterized by distinct rainy season and dry season. Due to the lack of soil cover, storm water forms various types of runoff on the rocky slope, which flows into the underground river eventually through epikarst zone and sinkholes. The epikarst zone with a high degree of karstification has high hydraulic conductivity and regulation and storage function with a large number of small caves. It is the main water storage space on the slope and forms the epikarst spring. The bottom of the depression is flat with continuous soil cover. The flood is discharged by the sinkhole, but sometimes the groundwater inversely enters the karst depression through the sinkhole, resulting in waterlogging. Karst depressions are widely used as living space and agricultural planting. According to its terrains, development practice and disturbance intensity, the land of karst doline can be divided into three kinds of sensitive areas, and they are, (1) sloping farmland with risk of soil erosion, (2) epikarst springs for drinking water source with risk of pollution, and (3) the sinkholes with risk of contaminant input. The LID model would try to achieve five management goals in the three sensitive areas.

(1) The goal of LID in the sloping farmland is to minimize water consumption by crop irrigation and to protect precious and thin soil from erosion, which technically can be achieved by requiring a filtering system such as building terraced fields, interception basin and straw mulching, so as to regulate soil moisture and slope flood runoff. (2) The management goals of the sensitive areas of epikarst springs are the utilization of rainfall-runoff resources and the ensurance of drinking water safety, which technically can be achieved by implementing rainwater harvesting projects and setting up water source protection area. (3) Contaminant interception and absorption facilities, such as buffer zone and sedimentation and filtration ditch, should be built in the sensitive area of sinkhole for achieving the goal of stopping contaminants entering groundwater.

The LID model for peak cluster, or “LID based on epikarst”, which is characterized by rainfall -runoff management in the epikarst zone, has been explored and summarized in the karst rocky desertification region of South China. The model requires reserving the water resources in the woodland area at the top of the peak in the process of development planning and utilization of karst depression, for enhancing the recharge by infiltration through epikarst zone. In the intensive utilization of land at the bottom of karst dolines, the buffer zone would be reserved for controlling flood discharge by sinkholes, and a low elevation green belt is set with filled karst grooves for promoting natural infiltration and purification. In the transition zone between “peak” and “doline”, the scope and boundary conditions of water confluence at epikarst spring should be clearly defined, and the boundary of the water source protection zone should be determined. At the same time, it is necessary to increase the utilization of rainwater to supplement the water shortage of ecosystems and living. Although LID model based on epikarst is raised from the rocky desertification control in southern China, it could be possibly extend to the karst areas in other regions such as Southeast Asia, where peak-cluster is also well developed.

Key words Low Impact Development, rainwater harvesting, rocky desertification control, rainfall infiltration, water tank

(编辑 张玲)