

DOI: 10.5846/stxb201112011836

陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. 生态学报 2013, 33(2): 0317-0326.

Chen H S, Nie Y P, Wang K L. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions: a review. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0317-0326.

岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展

陈洪松^{1,2,*}, 聂云鹏^{1,2}, 王克林^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100)

摘要: 西南岩溶地区虽然降水充沛, 但因具有二元水文结构, 地表水大量渗漏、地下水深埋, 加上土层浅薄且分布不连续、土壤储水能力低, 岩溶干旱严重, 水分亏缺仍然是植被恢复重建的关键限制因子。如何有效地进行植被的恢复重建和实现水土资源的协调利用, 是该地区石漠化综合治理面临的主要难题。由于地质背景的特殊性、地形地貌的复杂性和生境的高度异质性, 岩溶山区水分运移过程与其他类型区显著不同, 亟需综合考虑岩性、地形地貌、土壤与岩石分布、植被等因素的影响。在简要介绍岩溶山区土壤-岩石环境特征的基础上, 综述了降雨入渗产流规律、水分时空异质性、植物水分来源及适应机理等几个方面的研究进展, 探讨了当前研究中存在的问题, 并对未来研究进行了展望。今后应以大气-植被-土壤-岩石系统为研究对象, 将水分运移过程与植物的水分利用方式有机结合, 综合运用土壤物理学、生态水文学、植物生理学、岩溶地质学等多学科研究手段, 探讨表层岩溶带的水文调节功能及其主要影响因素, 揭示坡面、小流域尺度植被与水文过程的相互作用机理, 为西南岩溶山区水源涵养型植物群落的优化配置提供科学依据。

关键词: 岩溶山区; 土壤水分; 异质性; 水分来源; 植被格局; 植物适应机理

Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions: a review

CHEN Hongsong^{1,2,*}, NIE Yunpeng^{1,2}, WANG Kelin^{1,2}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;

2 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

Abstract: Karst ecosystem is very fragile and sensitive to environmental change. China has the largest karst area (344.3×10⁴ km²) with the widest distribution and highest landform diversity in the world, mainly or primarily concentrating in the southwest (about 55×10⁴ km²). The karst region of southwest China is geology-controlled eco-environment, and the basic characteristics include the shortage of surface water and soil resources, low vegetation coverage and high diversity of microhabitats. Due to special geological background, intensive karst process and recent irrational land uses, both vegetation destruction and soil and water loss are increasingly serious in karst region of southwest China. This results in karst desertification, a process of land degradation involving extensive exposure of basement rocks and drastic decrease in soil productivity. Karst desertification has been leading to the concentrated poverty population and the lack of cultivated land. The karst region of southwest China, the crucial area for the West Development in China, is easy to plunge into a vicious circle between poverty and environmental degradation. Therefore, how to rehabilitate vegetation effectively and to utilize soil

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB3-10); 国家自然科学基金项目 (41171187, 31100294); 国家科技支撑计划课题 (2010BAE00739-02)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbchs@isa.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

and water resources harmoniously are the primary problems for the comprehensive control of karst desertification in this region. Although rainfall is abundant, surface water is leaked heavily and groundwater is buried deeply due to dual hydrological structure in karst region of southwest China. Karst drought is serious and water deficit is still the primary factor for influencing vegetation restoration due to discontinuous shallow soils and low soil storage capacity. Thus, study on spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms is very important for vegetation restoration in karst region of southwest China. Water movement in karst region is significantly different from other kinds of region because of special geological background, complex landform and high heterogeneous habitat, and the effects of lithology, topography, the soil-rock distribution and vegetation should be considered altogether. Although many advances have been achieved on hillslope rainfall infiltration and runoff generation, spatial variability of soil water, adaptation of plants to water stress in different habitats, the current researches can not illustrate the difference of water status in various soil-rock environments and the corresponding adaptation mechanisms in karst regions. This heavily affects the achievement of vegetation restoration and reconstruction. In this paper, on the basis of the simple introduction to the characteristics of soil-rock environment, the research advances on rainfall infiltration and runoff generation, spatio-temporal variability of soil water, plant water sources and its adaptation mechanisms were summarized in karst regions. The further study should attach importance to investigate the relationship between water movement in soils and fractured rocks and plant water utilization, and to survey the effects of various environmental factors on eco-hydrological processes in the atmosphere-plant-soil-rock system. In order to reveal the interactive mechanism of vegetation and hydrological processes at hillslope and catchment scales in karst areas, the multi-disciplinary research methods and techniques, including soil physics, eco-hydrology, plant physiology and karstology, should be applied to discuss the hydrological regulation function of epikarst and its primary influencing factors. These studies would provide scientific basis for optimal disposition of plant community with water-conserving function in karst region of southwest China.

Key Words: karst region; soil water; heterogeneity; water source; vegetation pattern; plant adaptation mechanisms

岩溶(喀斯特)地区约占全球陆地总面积的12%,是世界上主要的生态脆弱带之一,其生态环境问题是当今国际地学研究的热点。我国是世界上岩溶面积最大、分布最广、类型最多的国家,岩溶总面积达344.3万 km^2 ,主要集中在西南部(约55万 km^2),是全球三大岩溶集中分布区中连片裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶发育最强烈的地区^[1-2]。西南岩溶地区特殊的地质背景和强烈的岩溶作用,加上近现代人类不合理的土地利用,导致植被破坏和水土流失日益严重,石漠化不断加剧,成为西部大开发战略实施的重点和难点地区^[3-5]。岩溶生态系统植被具有喜钙、石生、旱生的特点,一旦破坏,极难恢复。如何有效地进行植被的恢复重建和实现水土资源的协调利用,是西南岩溶山区石漠化综合治理面临的主要难题^[2-5]。

西南岩溶地区虽然降水充沛,但因地表地下二元结构,地表水大量渗漏、地下水深埋,加上土层浅薄且分布不连续、土壤总量少、储水能力低,岩溶干旱严重,水分的亏缺仍然是该区植被恢复重建的主要障碍因子^[2]。由于地质背景的特殊性和地形地貌的复杂性,岩溶山区水分运移过程与其他类型区显著不同,不同类型岩溶区水分运移规律也有很大的差异^[2, 6-8]。岩石与浅薄土层的交错镶嵌,形成类型多样的小生境和多层空间结构,增加了水分运移过程的复杂性和水分、养分的空间异质性,直接影响植被的演替过程和分布格局^[9-13]。虽然国内外在岩溶山区坡面降雨入渗产流规律、土壤水分的时空变异特征、不同生境植物的水分适应对策等方面取得了一定的进展^[14-19],但由于生境的高度异质性和水文地质结构的复杂性,当前的研究还难以阐明不同土壤-岩石环境水分状况的差异成因及植物的适应机理,严重影响了该区植被恢复重建的成效。随着西南岩溶山区石漠化综合治理二期工程的全面开展,迫切需要综合考虑岩性、地形地貌、土壤与岩石分布、植被等因素对水分运移过程的影响,为不同类型岩溶区生态建设提供理论依据。因此,本文在简要分析岩溶坡地土壤-岩石环境特征的基础上,综述了降雨入渗产流规律、水分时空异质性、植物水分来源及适应机理

等几个方面的研究进展,并探讨了研究中存在的问题及研究前景,以期深化对岩溶山区生态水文过程与机理的认识,为该区植被恢复重建和石漠化综合治理提供科学依据。

1 岩溶山区土壤-岩石环境特征

在岩石裸露率高、土层浅薄且分布不连续的岩溶山区,土壤-岩石环境特征受地质背景制约,与碳酸盐岩岩性密切相关。该地区分布最广的两类岩石是石灰岩和白云岩,它们在岩石裂隙发育程度、风化作用方式、岩溶形态、土层厚度及风化壳持水性等方面都有差异,对植物的水分利用方式和植被的空间分布具有明显的制约作用^[11-12]。白云岩整体风化作用明显,其溶蚀残余物质能相对均匀地分布地表,但表层岩溶带厚度较小且二元结构不发育,石漠化发生率较低;而石灰岩差异性风化作用明显,土粒易聚集在岩体的裂隙和地下空隙系统中,土层较浅且分布极不均匀,表层岩溶带厚度较大,石漠化发生率较高。碳酸盐岩风化形成的石灰土,其理化性质有别于地带性土壤,表现为富钙、偏碱性、质地偏粘、营养元素供给速率慢且不平衡、土壤养分含量高但易流失^[20-21]。岩溶山区土壤与母岩之间界面明显,缺乏过渡层,结合力差,非常容易水土流失。由于碳酸盐岩风化成土作用缓慢,致使这些地区土层瘠薄,一旦流失就很难恢复。

碳酸盐岩的可溶性与长期强烈的岩溶作用,致使岩溶地区地形破碎、崎岖不平,岩溶生境异质性高。岩溶山区土壤在较大取样面积呈集群分布,受控于裂隙的空间展布和地貌部位;在较小取样面积呈均匀分布和随机分布,常分布于石沟、石缝等肥沃生境^[11]。微地貌的土壤差异和岩溶生境异质性密切相关。岩溶山区浅薄且分布不连续的土壤可与石面、石缝、石沟、石洞、石槽、溶洞等组合形成多种小生境类型,小生境的多样性(生境类型及其组合多样且时空变化无序)导致群落组成物种的复杂性及生态类型的多样性^[11,13,22]。土壤与岩石的交错镶嵌,显著地改变了小尺度范围内的水文循环和土壤侵蚀过程,促进了土壤资源的再分配,致使土壤斑块和土壤性质异质性高^[13,22]。岩溶山区气候、地形、地质构造、岩溶作用、土壤等条件的差异,形成不同区域岩溶生态系统(本底稳定性与脆弱性各异)及生境类型的多样性^[4,11]。即使在岩石裸露率较高的情况下,不同生境的组合类型不同,相应的生境严酷程度也不同,土壤水分、养分状况也有很大差异。石漠化难以治理的最主要原因,就是植被缺少立地条件,同时无法获取自身生长所必需的水分和养分。但是,即使在强度石漠化阶段,一些封闭的或开放性不强的小生境仍会有少量土体留存,维持了较好的土壤结构和较高的水分与养分水平,为植被恢复重建提供可能^[11,13,20]。岩溶山区不同的土壤-岩石环境形成类型多样的小生境,因不同生境降雨入渗产流规律和水分状况差异显著,该区水分时空异质性及植物适应机理与其他类型区有明显差异。

2 岩溶坡地降雨入渗产流规律

岩溶生态系统的水文生态功能受地质背景的制约,主要受表层岩溶带结构、地表土壤和植被覆盖情况、降雨性质等因素的影响^[4,6-8,10,23-25]。表层岩溶带由高度风化的碳酸盐岩组成,位于地表(或土壤层)之下或直接裸露于地表(一般厚3—10 m,部分可超过30 m),为土壤和基岩的过渡带,孔隙率和渗透性随深度的增加而递减^[10,14,23]。坚硬质纯的碳酸盐岩(尤其是结晶灰岩或大理岩)是表层岩溶带发育的物质基础,高温多雨且雨热同期造成的强的水动力和高的土壤空气CO₂含量(0.3%—5.5%)是其形成的动力条件^[4,23-24]。William^[23]研究发现表层岩溶带孔隙率可超过20%,而底层相对未风化的结晶灰岩则小于2%。蒋忠诚等^[24]野外调查发现,表层岩溶带裂隙率在广西弄拉等地可达60%,而在贵州六盘水梅花山则为30%左右。气候条件决定了表层岩溶带主要分布在我国秦岭以南的热带和亚热带岩溶区。表层岩溶带的厚度在湿热多雨的广西桂林岩溶区可达10 m,在贵州高原一般为2 m左右^[24]。表层岩溶带可增加入渗补给量,并延缓雨水在岩溶水系统停留的时间,其对岩溶水调蓄功能的大小主要与表层岩溶带的结构、岩层产状、地表覆盖情况和降雨性质有关^[23-25]。不同植被群落特征的岩溶生态系统,因表层岩溶带结构的差异而具有不同的水文生态功能。

在具有地表地下双层水文结构的岩溶山区,岩石渗漏性较强,降雨可通过竖井、落水洞、漏斗等迅速汇入地下,常形成“地下水滚滚流、地表水贵如油”的特殊景观。岩溶山区小流域降雨径流系数较高(一般0.4—0.7),但不同植被类型坡面地表产流很少。彭韬等^[26]在贵州岩溶地区普定县陈旗小流域研究发现,观测期内

(2007年7月至2008年2月)不同利用方式径流小区地表径流量为0.99—10.8 mm(相应的穿透雨量为464—541 mm),次降雨径流系数为0.01%—12.81%。张喜等^[27]在黔中岩溶地区鱼梁河流域研究发现,受小生境和林地表层土壤特性的综合影响,2003—2005年不同植被类型次降雨径流系数为1.96%—21.37%,年均地表径流量为1.765—22.934 mm,且退耕还林幼林>针叶林>针阔混交林>阔叶林。在广西环江中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,陈洪松等^[28]基于大型径流小区5年(2006—2010年)的观测资料,发现虽然年降雨量1300—2000 mm,但无论平水年还是丰水年,不同利用方式坡面次降雨径流系数都<5%(0.01%—4.57%),年降雨径流系数<1%(年地表径流量0.3—9.5 mm)。Wilcox等^[15]在美国爱德华兹高原岩溶地区的模拟降雨试验发现,灌木砍伐、搬移前后,灌木林地地表都不产流,至少50%的降水以壤中流形式出现;草地地表径流占10%—50%,壤中流<10%。但是,对于岩溶小流域,除非有泉水出流,否则灌木林覆盖率的变化对河川径流的影响很少或没有影响^[29]。显然,岩溶坡地地表产流主要受土壤-岩石环境影响,即与基岩裸露率、土壤厚度及其空间分布、水文地质结构等密切相关,而植被类型或土地利用方式并不一定是主要的影响因素。

岩溶山区降雨产流除坡面径流外,还存在壤中流、渗透流、坡下流、竖井流、地下径流等多种形态^[6-7,10,30-32]。虽然同位素示踪技术为不同尺度水文过程研究提供了有效手段,但这方面的研究在岩溶山区尚有待系统深入开展。White^[10]比较详细地分析了岩溶水文过程,认为岩溶蓄水层含有溶解产生的管道,与储存在裂隙和基岩可透水颗粒间的地下水相互连通,能容许地下水的快速流动,并接受地表水流以暴雨径流的形式通过落水洞输入。Peters等^[31]综合利用水文、同位素示踪、地球化学等方法研究发现,土层浅薄的森林流域壤中流发生在土壤-基岩界面以上的薄层风化带内,雨水以优先流的形式先从垂直方向渗透至基岩,再又侧向流过基岩表面。但是,Buether等^[32]利用示踪技术研究表明,大尺寸碎石的存在可能破坏大孔隙的连续性,土壤中水流主要表现为基质流。Bonacci等^[6]认为岩溶区包气带狭窄裂隙水流以扩散流和层流为主,而浅潜流带大管道水流以湍流为主。姜光辉等^[30]探讨了岩溶坡地5种产流模式,认为石质坡地的径流(泉水)是表层岩溶带产流、超渗产流、蓄满产流(饱和产流)的集合,洪峰的上升阶段由超渗产流和饱和产流构成,退水过程以及基流则主要由表层岩溶带径流提供。陈洪松等^[28]认为,当基岩裸露率较低、土层较厚、土壤入渗率较高时,不同利用方式坡面降雨产流以蓄满产流为主,但裸露基岩或局部土层浅薄地段以超渗产流为主。由于岩溶山区二元结构的独特性和生境的高度异质性,目前的研究还难以阐明不同尺度降雨入渗产流过程及其主要影响因素的差异。

3 岩溶山区水分时空异质性

一般认为,土壤水分空间变异的影响因素主要有气候(降雨、太阳辐射等)、地形(坡度、坡向、海拔、上坡汇水面积等)、土壤性质(机械组成、有机质含量、结构、大孔隙等)、植被类型以及土壤平均含水量等^[33]。在具有二元结构、土层浅薄且不连续、岩石裸露率高的岩溶山区,水分时空异质性与其它类型区有显著差异。岩溶山区土壤与岩石的斑块分布以及地表与地下空间的高连通性,产生不同的土壤-岩石环境,形成复杂多变的地形地貌和类型多样的小生境。因不同生境降雨入渗产流规律和蒸散状况差异的影响,该区土壤水分具有明显的时空变异性和派生性^[2,11,13,22]。很多研究表明^[6-8,15,19,29,34-36],岩溶山区土壤水分的时空变异特征与降雨、土层深度、土壤性质、裸岩率、表层岩溶带结构、土地利用方式、植被类型等因素密切相关。在植被类型相对一致时,由于大块裸岩能够产生更多的径流和提供遮阴,其周围土壤水分、养分含量通常相对较高^[18,37-38]。但是,由于地表出露岩石的非均匀性与地下岩石裂隙结构的多样性,即使在相同的岩石、土壤、植被条件下,不同类型小生境水分状况也有很大差异,导致水分具有明显的时空异质性。

在桂西北典型岩溶峰丛洼地,受石丛和地形的影响和控制,洼地样区表层土壤水分呈现斑块或条带状分布,具有明显的季节变化和尺度效应^[36,39-40]。与裸岩率较高地段相比,土被连续分布区土壤水分空间连续性较好,具有较小的总体方差和较大的变程。因此,在研究不同性质斑块土壤水分的变异特征时,需要选取不同的采样设计。随着季节变化,洼地表层土壤水分的空间结构参数及其影响因素会发生一定变化,但平均含水

量对土壤水分空间变异的主导作用持续存在^[35-36, 40]。土壤水分的空间异质性随平均含水量的增加而减小,但尺度效应不随平均含水量的变化而变化。变程一般在平均含水量中等时较大,而在极干旱或降雨之后较小^[36]。在地形地貌更加复杂、小生境类型多样的坡地,土壤水分空间分布及其季节变化主要受土地利用方式、裸岩率、土层深度和土壤有机碳含量的影响,土壤容重和坡度的影响次之,坡位和海拔的影响最小^[18-19, 35]。岩溶峰丛洼地土壤含水量以自然植被最高,撂荒地和坡耕地次之,人工林最小^[18-19, 35, 40]。在特殊的土地利用结构下,岩溶峰丛洼地表层土壤含水量坡地高于洼地,甚至有随海拔高度升高而增加的趋势^[18-19]。但是,当土层比较深厚、岩石裸露率较低时,与其他类型区相似,土壤水分可能具有沿坡向下逐渐升高的趋势。显然,岩溶山区水分时空变异研究应该考虑地质背景的影响。同时,应该根据研究的目的和精度要求,结合尺度效应和土壤水分状况确定适宜的采样尺度和频率。但是,岩溶山区已有的水分时空异质性研究取样间隔都相对较大,没有考虑小尺度范围内生境的高度异质性以及不同生境降雨入渗产流规律和土壤水分状况的差异,亟需综合考虑各种因素的影响。

4 岩溶山区植物的水分来源

不同生活型植物的水分来源是恢复生态学和生态水文学的研究热点,近年来在岩溶山区也倍受关注^[12, 14, 16-17, 41-43]。土壤-岩石环境水分状况、表层岩溶带水文地质结构随岩性和地形变化很大,对植物的水分来源及其季节变化有显著影响。对比分析植物木质部水样与雨水、土壤水、地表水(泉水或溪流水)、表层岩溶带水、地下水等各种潜在水源氢氧同位素含量的相互关系,参考土壤水势、叶片水势、土壤含水量等数据,可推测植物的主要水分来源;而利用同位素混合模型可进一步计算植物对各种水源的利用比例^[44-47]。但是,由于样品(土样或水样)采集困难,如何确定土壤和表层岩溶带的供水强度一直是岩溶山区植物水分来源研究中的难点。有研究者根据植物叶片水势的季节变化,结合植物水与雨水氢氧稳定同位素含量的相互关系,推测植物对土壤和表层岩溶带水分的利用^[14]。也有研究者研发了一套可测定包气带土壤和裂隙岩体含水量的技术,但其田间应用尚需时日^[48]。挖坑^[41, 49]或钻孔^[42, 50]虽可大致确定土壤-岩石环境特征和植物根系的分布情况,但这费时费力且对样地具有永久性破坏,不便于分析植物水分来源的季节变化。浅根系草本植物根茎水的氢氧同位素含量常用来代替表层土壤水的氢氧同位素含量^[14],但难以反映植物对不同层次土壤水的利用情况。泉水氢氧同位素含量常用来代替表层岩溶带水的氢氧同位素含量^[16, 42],但仅适用于有泉水出流的地段,且难以确定不同层次表层岩溶带的供水作用。由于储存在岩石中或岩层下的水分受蒸发损失小^[51],前期、近期雨水可分别用来代替深层和浅层裂隙水^[43],但近期、远期雨水的具体时间范围以及浅层、深层裂隙的具体层次还有待进一步确定。

因不同土壤-岩石环境降雨入渗产流规律和水分状况的差异,相同植被演替阶段异质性生境不同生活型植物的水分来源也有较大差异。一般而言,岩溶山区浅根系植物主要利用来自最近降水的浅层土壤水,而深根系植物常常同时利用不同深度的水源,且能依靠储存在岩石裂缝或裂隙中的水分来抵御干旱的胁迫^[23, 41, 49-54]。在墨西哥尤卡坦半岛北部喀斯特地区,Querejeta等^[49]研究发现,在季节性干旱时期,生长在浅薄土层上的乡土树种(常绿和落叶)很少或几乎不利用地下水,主要依赖储存在上部(2—3 m)土壤—基岩剖面中的水分来抗旱。但是,旱季不同植物的主要水分来源具有一定的差异。落叶乔木檳榔青(*Spondias purpurea*)和十二雄蕊破布木(*Cordia dodecandra*)、常绿乔木黄栌叶榕(*Ficus cotinifolia*)以浅层(0—15 cm)土壤水分为主,而常绿乔木面包树(*Brosimum alicastrum*)和榄状塔利无患子木(*Talisia olivaeformis*)、落叶乔木象耳豆(*Enterolobium cyclocarpum*)以表层岩溶带(风化基岩)水分为主。因此,根系下扎深度和耐旱性不一定与常绿和落叶二分法直接相关,部分植物可依靠菌根真菌(mycorrhizal fungi)来吸水^[51]。外生菌根菌丝比细根(2—10 μm)窄得多,可达1 m长,能深入风化岩石基质,并为水分从岩体进入植物根系提供许多通道。与5龄常绿乔木面包树相比,9龄面包树旱季虽然具有较低的水分利用效率和降幅较缓的枝条含水量,但其更好的水分状况不是由于根系分布更深,而主要是由于有更发达的侧向根系,能从更多的土壤—基岩中获取水分^[49]。在美国爱德华兹高原喀斯特地区,McCole和Stern^[42]研究发现,常绿灌木杉木(*Juniperus ashei*)主要水

分来源由冷湿冬季以浅层(约 10—30 cm) 土壤水为主转变为干热夏季以表层岩溶带水分为主。Schwinning^[14] 研究发现,虽然常绿树种德克萨斯活橡木(*Quercus fusiformis*) 和杉木叶片水势在久旱的春夏雨后得以恢复,但茎水同位素比值的变化并未明显显示植物从浅层土壤中吸收利用了雨水,可能的原因是储存在表层岩溶带大孔隙中的水分以活塞流的形式被提升至植物根系活跃区。Dawson^[55] 研究证实,根系提水作用不仅存在于水文周年性亏缺的干旱半干旱地区,而且也同样存在于具有水分间歇式亏缺的相对湿润地区;深根植物根系提水是表层浅根植物水分的一个重要来源。在贵州花江岩溶低热河谷小流域,容丽^[17] 研究发现,在强度石漠化样地,旱季(4 月) 植物的主要水分来源是表层岩溶带水,雨季(7、8 月) 除了常绿树种清香木(*Pistacia weinmannifolia*) 比较固定地利用土壤下层(10—50 cm) 水分外,落叶树种野桐(*Mallotus japonicus* var. *floccosus*) 和红背山麻杆(*Alehornea trewioides*) 利用土壤表层(0—10 cm) 水;在潜在石漠化样地,植物对水分的利用比较稳定,常绿、落叶树种均主要(50% 以上) 利用土壤下层水分。在广西环江典型岩溶峰丛洼地白云岩地区,Nie 等^[16] 研究发现,连片出露基岩生境落叶乔木菜豆树(*Radermachera sinica*) 的水分来源存在季节变化,旱季主要利用表层岩溶带水,雨季则以近期雨水为主;落叶小灌木红背山麻杆以及半落叶乔木粉苹婆(*Sterculia euosma*)、常绿大灌木鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)、常绿乔木石山榕(*Ficus orthoneura*) 水分来源没有季节变化,前者(红背山麻杆) 始终以近期雨水为主要水源,而后者始终以表层岩溶带水为主要水源。临近土层浅薄生境,菜豆树在旱季主要利用表层岩溶带水,雨季以浅层(0—30 cm) 土壤水为主;红背山麻杆始终以浅层土壤水为主要水源。在石灰岩地区连片出露基岩生境,聂云鹏等^[43] 研究发现,雨季,粉苹婆、菜豆树、鹅掌柴以及红背山麻杆和落叶灌木紫弹树(*Celtis biondii*) 均以近期雨水为主要水源;旱季,5 种植物均同时利用近期和前期雨水,其中乔木(粉苹婆和菜豆树) 和常绿大灌木(鹅掌柴) 对前期雨水的利用比例均超过 50%。乔木和常绿大灌木水分来源的季节变化可能与其二态根系有关,而落叶小灌木(红背山麻杆) 和落叶小乔木(紫弹树) 水分来源的稳定性可能与二者根系较浅且具有较高的水分利用效率有关。显然,由于地质背景的差异性、表层岩溶带水文地质结构的复杂性和生境的高度异质性,不同生活型植物的水分来源及其季节变化具有较大的差异^[14, 16-17, 42-43]。

5 植物对异质性生境的适应机理

岩溶生态系统植物的群落结构和物种多样性、植物的各种生理生态性状与土壤-岩石环境水分状况密切相关。生境的异质性通过影响植物群落的分布格局和稳定性,对植被演替的方向和速率产生重要影响^[9, 11, 56-57]。在缺水、少土和碳酸盐岩偏碱性的岩溶生态系统,植物物种多样性受到限制,具有强烈的选择性(喜钙、耐旱及石生),而且顺向演替难、逆向演替易;植被类型、大小及覆盖度主要受岩溶裂隙的发育程度及规模所控制^[1, 7, 11-12]。植物对各种类型小生境的利用特点为岩溶环境不同石漠化阶段采取相应的植被恢复途径、方式提供了理论依据。在植被的自然恢复过程中,植物与土壤-岩石环境相互影响、相互作用:裸露岩石(风化作用)→地衣植物群落(分泌有机酸腐蚀岩石表面,植物群体参加土壤的聚集和水分含蓄)→苔藓植物群落(聚集土壤能力更强,土壤水分、养分条件改善)→草本植物群落(土壤增厚,土壤蒸发减少,土壤细菌、真菌、小动物活动增强)→木本植物群落(腐殖质层增厚,土壤涵养水分能力增强,植物根系发育,固土能力增强)^[2, 11]。以生物量增长和土壤形成成为纽带,灰岩出露后表层岩溶系统的发育演进而为石质岩溶→生物岩溶→土壤岩溶→生态系统岩溶,最终成为以生物活动和土壤媒体过程为主导的岩溶生态系统^[58]。

由于不同土壤-岩石环境水分状况的差异,不同生活型植物的适应机理也存在差异^[12, 59-60]。常绿落叶阔叶混交林常以单叶、革质、中型叶为主,树皮光滑颜色较浅;灌丛群落则表现出藤本、有刺灌木发达、落叶种类与常绿种类混交等一系列特殊的外貌特征。岩石中较宽裂隙常被土壤或水力性质类似土壤的粗颗粒和有机物料充填,能维持较高的根系密度,但窄小裂隙迫使植物根系发展为二态根垫^[43, 51]。与草本植物相比,乔灌木常具有发达而强壮的根系,能攀附岩石、穿透裂隙,吸收储存在岩石空隙、裂隙中的水分和养分^[4, 7, 25, 51]。与浅薄土层相比,虽然深根系植物在整个岩层中的平均根长密度较小,但裂隙中的平均根长密度却较大。有研究表明,在夏季干旱时期,风化基岩能为乔灌木提供大部分所需的水分,其水分来源于通过土壤的基质流和裂

隙的优先流^[53]。与深根系植物通过利用岩石裂隙水或深层水分来抗旱不同,浅根系植物一般通过提高水分利用效率来适应干旱胁迫。有研究发现,部分植物始终以浅层土壤水为主要水源,而很少利用浅薄土层下风化基岩层的水分^[50-53]。这类植物一方面通过发展高密度的浅层根系来提高对浅层有限水量的吸收效率,另一方面通过降低叶片气孔导度提高水分利用效率或通过提前落叶来应对干旱^[14-51]。在巴西南大河州 Parque Estadual de Itapuã, Silva 和 Dillenburg^[60]研究了旱季大块裸岩(花岗岩)植物水分关系,发现常绿灌木伞花铁仔木(*Myrsine umbellata*)通过维持较高的黎明前和正午叶水势以及较高的气孔导度和蒸腾速率来抗旱,推测其根系较深,能获取更多的深层水分,对水分亏缺的忍耐力较低,采用避旱的水分利用策略;常绿灌木车桑子(*Dodonaea viscosa*)和阿根廷古柯(*Erythroxylum argentinum*)通过维持较低的黎明前叶水势和关闭更多气孔来抗旱,推测其根系较浅,耐旱性较强。在广西环江典型岩溶峰丛洼地白云岩地区,邓彭艳等^[61]研究发现红背山麻杆光合速率、水分利用效率、叶氮及叶绿素含量均高于菜豆树,具有更强的光合及水分利用能力,对环境变化响应更灵敏;两者通过降低气孔导度限制蒸腾、提高水分利用效率来适应干旱环境。有研究表明,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其水分利用效率呈一定程度的正相关,能反映植物对不同生境水分状况差异的响应^[62-63]。与非岩溶区相比,岩溶区植物一般具有较高的水分利用效率;与落叶树种相比,岩溶区常绿树种一般具有较低的水分利用效率^[41-49]。随着石漠化的发展和水分可利用性的降低,植物的水分利用效率也相应提高^[17-62-64]。容丽^[17]通过对比分析贵州花江岩溶低热河谷小流域不同石漠化程度样地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与0—30 cm土壤储水量的关系,发现有相当一部分植物能通过提高水分利用效率来适应干旱,如八角枫(*Alangium chinense*)、粗糠柴(*Mallotus philippinensis*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、清香木、红背山麻杆、野桐;但也有一部分植物的水分利用效率随水分条件的下降呈降低趋势或对水分变化不敏感。谭巍^[65]等对比分析了桂西北岩溶坡地连片出露石丛及其临近浅薄土层7种典型植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节性差异,发现季节性降雨变化对乔木类菜豆树、藤本类的铁线莲(*Clematis kweichowensis*)以及落叶灌木黄荆(*Vitex negundo*)叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响较小,而对浅根系草本植物蕨(*Pteridium aquilinum*)和肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、落叶灌木盐肤木(*Rhus chinensis*)和红背山麻杆影响较大,而生境条件的差异对红背山麻杆和黄荆叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响较大。显然,不同生境相同生活型植物以及相同生境不同生活型植物的水分适应机理亟需综合考虑不同生境水分状况、植物群落组成和结构以及植物根系分布特征的影响。

6 结论与展望

由于地质背景的特殊性、地形地貌的复杂性和生境的高度异质性,岩溶山区水分运移过程十分复杂,具有许多与其他类型区不同的规律和特点。不同土壤-岩石环境水分状况的差异成因及植物适应机理,是国际土壤物理学和生态水文学研究的难点,也是岩溶山区植被恢复重建迫切需要解决的关键科学问题。虽然国内外开展了不少相关研究,但主要局限于干旱半干旱地区或季节性干旱地区。由于研究方法和手段的限制,加上研究难度大和研究基础薄弱,当前的研究还难以明确地质因素对生态环境的控制和影响程度,难以确定自然背景在岩溶生态系统演替中的作用,难以阐明异质性生境不同生活型植物的水分利用策略以及植被与水文过程的相互作用机理,严重影响了岩溶山区植被恢复重建的成效。综合考虑岩性、地形地貌、土壤与岩石分布、植被等因素对生态水文过程的影响,将不同土壤-岩石环境水分运移过程与植物的水分利用方式有机结合,探讨不同类型岩溶区表层岩溶带水文调节功能、水分与植被空间格局以及生态过程与水文过程的相互作用机理,是解决上述科学问题的前提和基础,也是未来岩溶山区土壤物理学和生态水文学的发展趋势。

随着西南岩溶地区石漠化综合治理二期工程的全面开展,迫切需要深入研究不同尺度水分时空异质性及植物适应机理,为该区植被恢复重建提供科学依据。针对岩溶生态系统生境异质性高、水文过程变化迅速、植被片段化分布、水源涵养功能低等特点,今后应以典型岩溶小流域大气-植被-土壤-岩石系统为研究对象,综合应用土壤物理学、生态水文学、植物生理学、岩溶地质学等多学科交叉的研究方法,将野外调查、室内外试验与同位素示踪技术、显色示踪技术和地质雷达探测技术有机结合,深入分析样区、坡面、小流域尺度降雨—入渗—产流规律、植物水分关系以及水分与植被空间格局,系统研究不同尺度大气降水、地表水、土壤水、地下水

的相互转化关系,阐明坡面和小流域尺度水分时空异质性及其对植被分布的影响;分析土壤空间分布规律及其水源涵养功能,探讨表层岩溶带的水文调节功能及其主要影响因素;深入研究不同生境植物根系分布特征以及深根植物根系提水作用,弄清典型土壤-岩石环境不同生活型植物的水分来源和水分利用效率及其季节变化规律,阐明不同演替阶段异质性生境典型植物的水分适应机理;揭示坡面及不同尺度小流域植被与水文过程的相互作用机理,为水源涵养型植物群落优化配置提供科学依据。同时,应加强岩溶流域生态水文过程模拟研究,进一步分析土地利用和气候变化对生态水文过程的影响,为更大尺度生态过程与水文过程的相互作用机理研究奠定科学基础。

References:

- [1] Li Y B , Hou J J , Xie D T . The research development of research on karst ecology in Southwest China . *Scientia Geographica Sinica* , 2002 , 22(3) : 365-370 .
- [2] Chen H S , Wang K L . Soil water research in karst mountain areas of Southwest China . *Research of Agricultural Modernization* , 2008 , 29(6) : 734-738 .
- [3] Cai Y L . Preliminary research on ecological reconstruction in karst mountain poverty areas of southwest China . *Advance in Earth Sciences* , 1996 , 11(6) : 602-606 .
- [4] Yuan D X . On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the South-west China . *World Sci-Tech R&D* , 1997 , 19(5) : 41-43 .
- [5] Academic Divisions of the Chinese Academy of Sciences . Some suggestions of carrying forward the comprehensive harnessing desertification in Southwest karst region . *Advance in Earth Sciences* , 2003 , 18(4) : 489-492 .
- [6] Bonacci O , Pipan T , Culver D C . A framework for karst ecohydrology . *Environmental Geology* , 2009 , 56(5) : 891-900 .
- [7] Stothoff S A , Or D , Groeneveld D P , Jones S B . The effect of vegetation on infiltration in shallow soils underlain by fissured bedrock . *Journal of Hydrology* , 1999 , 218(3/4) : 169-190 .
- [8] Cao J S , Zhang W J , Liu C M , Yang Y H . Water movement in slopes characterized by weathering layer of gneiss beneath a shallow soil layer . *Journal of Hydraulic Engineering* , 2007 , 38(8) : 901-906 .
- [9] Ettema C H , Wardle D A . Spatial soil ecology . *Trends in Ecology and Evolution* , 2002 , 17(4) : 177-183 .
- [10] White W B . Karst hydrology: recent developments and open questions . *Engineering Geology* , 2002 , 65(2/3) : 85-105 .
- [11] Li Y B , Wang S J , Li R L . Differences in natural characteristics for karst ecosystems under different geological backgrounds as exemplified by Maolan and Huajiang ecosystems . *Geology-Geochemistry* , 2004 , 32(1) : 9-16 .
- [12] Ren H . A review of the studies of desertification process and restoration mechanism of karst rocky ecosystem . *Tropical Geography* , 2005 , 25(3) : 195-200 .
- [13] Liu F , Wang S J , Luo H B , Liu Y S , Liu H Y . Micro-habitats in karst forest ecosystem and variability of soils . *Acta Pedologica Sinica* , 2008 , 45(6) : 1055-1062 .
- [14] Schwinning S . The water relations of two evergreen tree species in a karst savanna . *Oecologia* , 2008 , 158(3) : 373-383 .
- [15] Wilcox B P , Taucer P I , Munster C L , Owens M K , Mohanty B P , Sorenson J R , Bazan R . Subsurface stormflow is important in semiarid karst shrublands . *Geophysical Research Letters* , 2008 , 35 , L10403 , doi: 10.1029/2008GL033696 .
- [16] Nie Y P , Chen H S , Wang K L , Tan W , Deng P Y , Yang J . Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China . *Plant and Soil* , 2011 , 341(1/2) : 399-412 .
- [17] Rong L . Study on Hydrologic Adaptation Response of Plants and Its Stable Isotope in Karst Rocky Desertification [D] . Guiyang: Institute of Geochemistry , Chinese of Academy of Sciences , 2006 .
- [18] Chen H S , Fu W , Wang K L , Zhang J G , Zhang W . Dynamic change of soil water in peak-cluster depression areas of karst mountainous region in Northwest Guangxi . *Journal of Soil and Water Conservation* , 2006 , 20(4) : 136-139 .
- [19] Zhang J G , Chen H S , Su Y R , Liang H B , Kong X L , Zhang W . Variability of soil moisture and its relationship with environmental factors on Karst hillslope . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* , 2010 , 26(9) : 87-93 .
- [20] Cao J H , Yuan D X , Pan G X . Some soil features in karst ecosystem . *Advance in Earth Sciences* , 2003 , 18(1) : 37-44 .
- [21] Chen H S , Zhang W , Wang K L , Hou Y . Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi , China . *Journal of the Science of Food and Agriculture* , 2012 , 92(5) : 1086-1093 .
- [22] Wang S J , Lu H M , Zhou Y C , Xie L P , Xiao D A . Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan karst virgin forest . *Acta Pedologica Sinica* , 2007 , 44(3) : 475-483 .
- [23] Williams P W . The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review . *International Journal of Speleology* , 2008 , 37(1) : 1-10 .
- [24] Jiang Z C , Wang R J , Pei J G , He S Y . Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water . *Carsologia Sinica* , 2001 , 20(2) : 106-110 .
- [25] Perrin J , Jeannin P Y , Zwahlen F . Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data , Milandre test site , Switzerland . *Journal of Hydrology* , 2003 , 279(1/4) : 106-124 .

- [26] Peng T, Wang S J, Zhang X B, Rong L, Yang T, Chen B, Wang J Y. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes. *Earth and Environment*, 2008, 36(2): 125–129.
- [27] Zhang X, Xue J H, Xu X T, Lian B, Li K Z. Forest surface runoff and its influence factors in karst mountainous area in center of Guizhou Province, China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2007, 15(6): 527–537.
- [28] Chen H S, Yang J, Fu W, He F, Wang K L. Surface runoff and soil erosion on karst hillslope with different land-use types in peak-cluster depression areas of northwest Guangxi, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 121–126.
- [29] Wilcox B P, Owens M K, Knight R W, Lyons R K. Do woody plants affect streamflow on semiarid karst rangelands?. *Ecological Applications*, 2005, 15(1): 127–136.
- [30] Jiang G H, Chen K K, Yu S, Peng W. Separating karst slope runoff in peak cluster area. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(6): 14–19.
- [31] Peters D L, Buttle J M, Taylor C H, LaZerte B D. Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian Shield basin. *Water Resources Research*, 1995, 31(5): 1291–1304.
- [32] Buchter B, Hinz C, Leuenberger J. Tracer transport in a stony hillslope soil under forest. *Journal of Hydrology*, 1997, 192(1/4): 314–320.
- [33] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1/4): 259–281.
- [34] Dasgupta S, Mohanty B P, Köhne J M. Impacts of juniper vegetation and karst geology on subsurface flow processes in the Edwards Plateau, Texas. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(4): 1076–1085.
- [35] Chen H S, Zhang W, Wang K L, Fu W. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(6): 1105–1111.
- [36] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, Zhang W, Kong X L. Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of karst hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6334–6343.
- [37] Steers R J. Rock outcrops harbor native perennials in type-converted coastal scrub. *Western North American Naturalist*, 2011, 70(4): 516–525.
- [38] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Su Y R, Zhang J G, Yi A J. The heterogeneity and its influencing factors of soil nutrients in peak-cluster depression areas of karst region. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(3): 322–329.
- [39] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Zhang J G. Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in karst region in dry season. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4): 554–562.
- [40] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, Shi Y, Zhang W, Kong X L. Spatial variability of surface soil moisture in a depression area of Karst region in Southwest China. *Clean-Soil, Air, Water*, 2011, 39(7): 619–625.
- [41] Querejeta J I, Estrada-Medina H, Allen M F, Jiménez-Osoinio J J, Ruenes R. Utilization of bedrock water by *Brosimum alicastrum* trees growing on shallow soil atop limestone in a dry tropical climate. *Plant and Soil*, 2006, 287(1/2): 187–197.
- [42] McCole A A, Stern L A. Seasonal water use patterns of *Juniperus ashei* on the Edwards Plateau, Texas, based on stable isotopes in water. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(3/4): 238–248.
- [43] Nie Y P, Chen H S, Wang K L. Seasonal variation of water sources for plants growing on continuous rock outcrops in limestone area of Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10): 1029–1037.
- [44] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261–269.
- [45] Phillips D L, Newsome S D, Gregg J W. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods. *Oecologia*, 2005, 144(4): 520–527.
- [46] Sun S F, Huang J H, Lin G H, Zhao W, Han X G. Application of stable isotope technique in the study of plant water use. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2362–2371.
- [47] Nie Y P, Chen H S, Wang K L. Methods for determining plant water source in thin soil region: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2427–2433.
- [48] Salve R. A sensor array system for profiling moisture in unsaturated rock and soil. *Hydrological Processes*, 2011, 25(18): 2907–2915.
- [49] Querejeta J I, Estrada-Medina H, Allen M F, Jiménez-Osoinio J J. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate. *Oecologia*, 2007, 152(1): 26–36.
- [50] Rose K L, Graham R C, Parker D R. Water source utilization by *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula* on thin soils over bedrock. *Oecologia*, 2003, 134(1): 46–54.
- [51] Schwinning S. The ecohydrology of roots in rocks. *Ecohydrology*, 2010, 3(2): 238–245.
- [52] Anderson M A, Graham R C, Alyanakian G J, Martynn D Z. Late summer water status of soils and weathered bedrock in a giant sequoia grove. *Soil Science*, 1995, 160(6): 415–422.
- [53] Hubbert K R, Beyers J L, Graham R C. Roles of weathered bedrock and soil in seasonal water relations of *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula*. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(11): 1947–1957.
- [54] Zwieniecki M A, Newton M. Seasonal pattern of water depletion from soil-rock profiles in a Mediterranean climate in southwestern Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(8): 1346–1352.
- [55] Dawson T E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 1993, 95(4): 565–574.
- [56] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, Sanderson R A, Bhogal A, Rose S C. Association between lowland grassland plant communities and soil properties. *Biological Conservation*, 2002, 105(2): 199–215.

- [57] García H, Tarrasón D, Mayol M, Male-Bascompte N, Riba M. Patterns of variability in soil properties and vegetation cover following abandonment of olive groves in Catalonia (NE Spain). *Acta Oecologica*, 2007, 31(3): 316–324.
- [58] Pan G X, Cao J H. Karstification in epikarst zone: the earth surface ecosystem processes taking soil as a medium—case of the Yaji Karst Experiment Site, Guilin. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(4): 287–296.
- [59] Pérez-García E A, Meave J A. Heterogeneity of xerophytic vegetation of limestone outcrops in a tropical deciduous forest region in southern México. *Plant Ecology*, 2005, 175(2): 147–163.
- [60] Da Silva L G R, Dillenburg L R. Water relations of tree species growing on a rock outcrop in the “Parque Estadual de Itapuã”, RS. *Revista Brasileira de Botânica*, 2007, 30(4): 703–711.
- [61] Deng P Y, Chen H S, Nie Y P, Tan W. Photosynthetic characteristics of *Radermachera sinica* and *Alchornea trewioides* in karst regions of Northwest Guangxi, China in dry and rainy seasons. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(8): 1498–1504.
- [62] Schuster W S F, Sandquist D R, Phillips S L, Ehleringer J R. Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of aridland plant species differing in lifespan. *Oecologia*, 1992, 91(3): 332–337.
- [63] Marshall J D, Zhang J W. Carbon isotope discrimination and water-use efficiency of native plants of the north-central Rockies. *Ecology*, 1994, 75(7): 1887–1895.
- [64] Du X L, Wang S J. Seasonal variations and responses to different rocky desertification degrees of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of 5 local plant species in karst areas. *Earth and Environment*, 2010, 38(2): 129–137.
- [65] Tan W, Chen H S, Wang K L, Nie Y P, Deng P Y. Differences in foliar carbon isotope ratio of dominant plant species in representative habitats on karst hill slopes of northwest Guangxi, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(9): 1706–1714.

参考文献:

- [1] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展. *地理科学*, 2002, 22(3): 365–370.
- [2] 陈洪松, 王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究. *农业现代化研究*, 2008, 29(6): 734–738.
- [3] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建. *地球科学进展*, 1996, 11(6): 602–606.
- [4] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题. *世界科技研究与发展*, 1997, 19(5): 41–43.
- [5] 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 489–492.
- [8] 曹建生, 张万军, 刘昌明, 杨永辉. 岩土二元介质水分运动与转化特征试验研究. *水利学报*, 2007, 38(8): 901–906.
- [11] 李阳兵, 王世杰, 李瑞玲. 不同地质背景下岩溶生态系统的自然特征差异——以茂兰和花江为例. *地球与环境*, 2004, 32(1): 9–16.
- [12] 任海. 喀斯特山地生态系统石漠化过程及其恢复研究综述. *热带地理*, 2005, 25(3): 195–200.
- [13] 刘方, 王世杰, 罗海波, 刘元生, 刘鸿雁. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1055–1062.
- [17] 容丽. 喀斯特石漠化区植物水分适应机制的稳定同位素研究[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院地球化学研究所, 2006.
- [18] 陈洪松, 傅伟, 王克林, 张继光, 张伟. 桂西北岩溶山区峰丛洼地土壤水分动态变化初探. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 136–139.
- [19] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 梁洪波, 孔祥丽, 张伟. 喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 87–93.
- [20] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 37–44.
- [22] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 谢丽萍, 肖德安. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法. *土壤学报*, 2007, 44(3): 475–483.
- [24] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 何师意. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能. *中国岩溶*, 2001, 20(2): 106–110.
- [26] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 容丽, 杨涛, 陈波, 汪进阳. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报. *地球与环境*, 2008, 36(2): 125–129.
- [27] 张喜, 薛建辉, 许效天, 连宾, 李克之. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(6): 527–537.
- [28] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 何菲, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121–126.
- [30] 姜光辉, 陈坤琨, 于爽, 彭稳. 峰丛洼地的坡地径流成分划分. *水文*, 2009, 29(6): 14–19.
- [36] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 张伟, 孔祥丽. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异. *生态学报*, 2008, 28(12): 6334–6343.
- [39] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探. *土壤学报*, 2006, 43(4): 554–562.
- [43] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1029–1037.
- [46] 孙双峰, 黄建辉, 林光辉, 赵威, 韩兴国. 稳定同位素技术在植物水分利用研究中的应用. *生态学报*, 2005, 25(9): 2362–2371.
- [47] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 土层浅薄地区植物水分来源研究方法. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2427–2433.
- [58] 潘根兴, 曹建华. 表层岩溶作用: 以土壤为媒介的地球表层生态系统过程——以桂林峰丛洼地岩溶系统为例. *中国岩溶*, 1999, 18(4): 287–296.
- [61] 邓彭艳, 陈洪松, 聂云鹏, 谭巍. 桂西北喀斯特地区菜豆树和红背山麻秆旱、雨季光合特性比较. *生态学杂志*, 2010, 29(8): 1498–1504.
- [64] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区 5 种常见灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化及其对石漠化程度的响应. *地球与环境*, 2010, 38(2): 129–137.
- [65] 谭巍, 陈洪松, 王克林, 聂云鹏, 邓彭艳. 桂西北喀斯特坡地典型生境不同植物叶片的碳同位素差异. *生态学杂志*, 2010, 29(9): 1706–1714.