中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 12 期: 1974 ~ 1981
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 地球关键带研究专题

岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖

刘鸿雁[1*], 蒋子涵[1], 戴景钰[1], 吴秀臣[2], 彭建[1], 王红亚[1], Jeroen MEERSMANS[3], Sophie M. GREEN[4], Timothy A. QUINE[4]

1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;
2. 北京师范大学地理学部, 北京 100875;
3. Cranfield Soil and Agrifood Institute, School of Water, Energy and Environment, Cranfield University, Cranfield MK43 0AL, United Kingdom;
4. Geography, CLES, University of Exeter, Exeter EX4 4SB, United Kingdom
* E-mail: lhy@urban.pku.edu.cn

收稿日期: 2018-07-02; 收修改稿日期: 2018-12-21; 接受日期: 2019-01-18; 网络版发表日期: 2019-03-07
国家自然科学基金项目(批准号: 41571130044、41325002)、高等学校学科创新引智计划项目(编号: B14001)、北京大学本科生拔尖人才培养计划项目资助

摘要 地球关键带研究将地表植被组成和功能与岩石层的特性联系起来, 为研究喀斯特地区特殊的岩石和土壤条件如何影响地表植被提供了新的思路. 文章基于贵州中部喀斯特关键带白云岩和石灰岩分布区岩石、土壤和植被调查结果, 发现木本植物覆盖度随宽度1mm以上的裂隙数目增多而线性增加, 而草本植物覆盖度则呈相反的趋势(p<0.01). 白云岩分布区由于岩性致密、裂隙不发育、土层厚度一般在20cm以内, 适合浅根系的草本植物分布. 石灰岩分布区由于裂隙发育、土壤分布深、树木的深根系分布在裂隙中, 植被组成和结构复杂. 基于2001~2010年MODIS遥感数据获取的每16天一个时相的归一化植被指数(NDVI)和年净第一性生产力(NPP)结果进一步表明, 石灰岩分布区各时相NDVI总体显著高于白云岩分布区, 但多年平均NPP则相反. 本文结果表明, 在喀斯特关键带, 岩性决定土壤的结构和分布, 进而决定地上植被木本植物和草本植物的覆盖. 尽管石灰岩地区土壤量可能比白云岩地区偏低, 但发达的裂隙结构更适合深根系的树木生长, 植被活动强. 当前喀斯特地区石漠化治理需要充分考虑地球关键带岩石-土壤-植被-大气相互作用, 提出适合不同岩性的植被恢复措施.

关键词 植被组成, 植被生产力, 白云岩, 石灰岩, 喀斯特关键带

1 引言

中国是全球喀斯特的重要分布区, 喀斯特分布区面积达363.1×10^{4}km^2, 其中裸露的碳酸盐类基岩面积约为130×10^{4}km^2, 40%以上分布在以贵州高原为中心的西南地区之一(Jiang等, 2014; Sweeting, 2012). 中国西南喀斯特地区人地矛盾突出、土壤流失严重, 石漠化的快速扩展对社会经济的可持续发展造成了严重影

中文引用格式: 刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 吴秀臣, 彭建, 王红亚, Meersmans J, Green S M, Quine T A. 2019. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖. 中国科学: 地球科学, 49: 1974–1981, doi: 10.1360/N072018-00184
英文引用格式: Liu H, Jiang Z, Dai J, Wu X, Peng J, Wang H, Meersmans J, Green S M, Quine T A. 2019. Rock crevices determine woody and herbaceous plant cover in the karst critical zone. Science China Earth Sciences, 62: 1756–1763, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9328-3

© 2019 《中国科学》杂志社

响. 探讨喀斯特分布区地表植被组成和覆盖的影响因子是这一地区植被恢复的基础(Tong等, 2018).

喀斯特分布区复杂的岩相及其错综的分布制约着植被特征及其分布. 基于遥感数据可以获取区域尺度地表植被特征, 进而分析其与地表环境要素之间的联系(Yue等, 2010a, 2010b). 然而, 喀斯特分布区复杂的地下结构可能通过影响土壤分布以及水分条件进而影响到地表植被, 而遥感等手段难以探究地下结构对地表植被组成和生产力的影响. 前人的研究表明, 中国西南喀斯特地区表层土壤对地表植被的贡献率只有21%, 地形特征的贡献率只有13.2%, 说明仅仅基于地形和土壤难以解释地表植被的格局, 未知的复杂地下结构的影响有待进一步深入探讨(Du等, 2015). 有研究表明岩石能够储存27%的降水(Rempe和Dietrich, 2018), 为进一步探讨岩石对地表植被的影响机制提供了新的线索.

地球关键带是指异质的近地表环境, 岩石-土壤-水-空气-生物复杂的相互作用调节的自然栖息地, 是提供支撑生命系统的资源(National Research Council, 2001). 地球关键带在垂直方向上从林冠一直延伸到基岩, 并在水平方向有较大的扩展空间(National Research Council, 2001; Brantley等, 2007). 土壤是岩石与植物之间的中间环节, 对喀斯特地区植被组成和生产力的形成机制需要基于地球关键带研究中岩石-土壤-植物-大气连续体的途径来认识, 然而这方面的研究仍然很少(Guo和Lin, 2016). 贵州中部(黔中)地区是中国喀斯特发育的代表性地区, 是基于地球关键带思路开展研究的理想场所, 本文中喀斯特关键带特指黔中以喀斯特地貌为主的区域.

喀斯特关键带土壤流失严重, 土壤分布不均匀. 根据前人研究, 这一地区土层厚度往往不足30cm(尹亮等, 2013), 使得植被生长速率慢; 同时发达的岩石节理导致地下土壤呈间断分布(杨成等, 2008), 种间、个体间生长过程差异较大(朱守谦, 1997). 然而, 前人的研究忽视了喀斯特关键带内部岩性差异对土壤和植被的影响. 根据区域地质图, 在黔中喀斯特关键带, 分布最广的是石灰岩, 其次是白云岩(马丽芳, 2002). 二者的主要区别在于Ca/Mg比值不同. 以碳酸钙为主的石灰岩更容易溶蚀并形成裂隙, 导致水分和土壤经过裂隙进入地下. 而白云岩以碳酸镁为主, 较石灰岩坚韧, 不易溶蚀, 在风化面上形成纵横交错的刀砍状致密缝隙, 常在岩石表层形成薄的土壤层, 水分不易下渗. 基于白云岩和石灰岩不同的特性, 本文提出如下科学假说: 在喀斯特关键带, 石灰岩和白云岩可能通过裂隙结构的不同进而影响地表植被的组成和生产力.

黔中喀斯特关键带是研究喀斯特关键带地下结构对地表植被影响的理想场所. 前人较为系统地研究了这一地区及邻近地区的植物群落类型及其种类组成(黄威廉等, 1988; 宋同清等, 2010; 刘玉国等, 2011). 在局地尺度的研究中, 前人已经注意到土壤水分对于地上植被的影响. 通过测定黔中喀斯特区常见种叶片δ^{13}C值, 前人发现黄壤区植物叶片δ^{13}C值分布区间较黑色石灰土区窄, 变异系数较小, 整体较黑色石灰土区偏负; 相关分析结果显示黄壤区植物叶片δ^{13}C值的主要影响因子为土厚和坡度, 黑色石灰土区为土壤含水量, 说明岩石对植物δ^{13}C值的影响是通过调节土壤水分实现的(杜雪莲等, 2009). 另有研究探讨了植物群落种类组成与土壤干旱的关系, 将这一地区的主要树种根据其耐旱性划分成先锋种、次先锋种、次顶极种和顶极种等不同的种组, 其中先锋种、次先锋种耐旱适应性强于次顶极种和顶极种(喻理飞等, 2002). 对于不同空间尺度上岩性、土壤与植物群落组成及生产力之间的关系, 由于观测的困难, 目前仍然缺乏研究.

有鉴于此, 本文选择黔中喀斯特关键带广泛分布的石灰岩和白云岩开展研究, 充分利用基础设施建设形成的基岩剖面, 开展岩石裂隙、土壤分布、地表植物群落调查. 基于遥感获取不同岩性条件下的植被生产力数据. 在此基础上, 分析岩石裂隙对喀斯特关键带植被组成和生产力的影响.

2 研究区域与研究方法

2.1 黔中喀斯特关键带

黔中地区广泛分布着三叠系的石灰岩和白云岩, 岩性复杂, 常夹杂其他岩类, 如砂岩、页岩、泥岩等(马丽芳, 2002). 白云岩和石灰岩两类岩石或单独分布, 或者混杂分布, 导致不同地点Ca/Mg比值不同, 裂隙发育程度不同(Bucker和Grapes, 2011).

本文选择以普定为中心的地区作为核心研究区(105°25′~106°02′E, 26°25′~26°33′N). 研究区属于亚热带季风湿润气候, 年平均气温15.1℃, 年平均降水

1378.2mm, 雨量充沛. 研究区岩溶地貌发育非常典型, 分布广泛, 类型齐全. 由于岩溶发育, 石灰岩地区河水渗漏严重, 形成20余条地下河. 研究区处于长江水系和珠江水系分水岭地带, 北面为长江水系, 南面局部为珠江水系(普定县地方志编撰委员会, 1999).

2.2 野外调查方法

野外调查在黔中喀斯特关键带的核心地段普定及周边地区进行. 野外调查过程中选择施工开挖的地段, 集中分布在普定(105°43.5′E, 26°14.5′N)、沙湾(105°45.1′E, 26°19.9′N)、赵家田(105°46.7′E, 26°16.1′N)和秀水(105°40.9′E, 26°18.4′N)四个片区, 海拔范围为1210~1240m. 共调查开挖的18个样地, 每个样地的剖面长度均超过10m(图1). 在每一个调查地点记录经度、纬度、海拔、坡度、坡向、剖面走向、岩性等信息. 为了说明人为干扰的影响, 在天龙山(26°14.8′N, 105°45.8′E)等人为干扰较少的地点也进行了植被调查, 记录不同坡向和地形条件下的样地8个.

沿剖面记录宽度>1mm的裂隙数量、每个裂隙的宽度、裂隙中土壤和根系的分布. 在每个地点记录地表土层厚度, 取10个数据平均.

在每个剖面的上方进行植物群落调查, 样地面积为10m×10m, 全面记录样地中出现的植物种类以及每一个物种的多度、盖度、高度等信息.

2.3 遥感数据及其处理

本文采用研究区2001~2010年的MODIS数据, 其空间分辨率为500m, 时间分辨率为16d(每年23个时相). 根据区域地质图, 这一区域内主要为石灰岩和白云岩. 在数据预处理时, 将野外取样区域为核心向周边拓展, 将所有石灰岩和白云岩的像元分别挑出, 提取各个像元的每半月的LAI数据和每年的NPP数据. 所选取的石灰岩区域面积为5986km^2, 白云岩区域面积为6051km^2. 对于白云岩和石灰岩区, 分别计算每个时相NDVI的多年均值以及NPP的多年均值.

2.4 数据分析

首先, 对各样地野外记录的每个物种的多度数据进行量化, 然后对样地记录的每一个物种分别计算相对多度、相对盖度和相对高度, 最后计算每个物种在样地内的重要值.

(1) 相对多度=某一物种的多度/样地内所有物种的总多度,

(2) 相对盖度=某一物种的盖度/样地内所有物种的总盖度,

(3) 相对盖度=某一物种的高度/样地内所有物种的总高度,

(4) 重要值=(相对多度+相对盖度+相对高度)/3.

对各样地木本植物和草本植物分别计算重要值. 按照重要值由高到低排序, 重要值高的物种作为群落的优势种.

对于遥感资料提取的NDVI和NPP数据, 利用*t*检验判别不同岩性区NDVI的差异, 利用K-S非参数性检验判别NPP的差异. 在做*t*检验之前, 对每组数据的正态分布进行检验.

3 结果

3.1 不同岩性下植被组成的差异性

野外调查结果表明, 不同岩性下裂隙发育截然不同. 以白云岩为主的地区沿出露基岩剖面宽度>1cm的裂隙通常少于1个/10m, 而以石灰岩为主的地区裂隙数量通常在5个/10m以上.

研究区共记录植物种类304种. 离城区的远近大体反映了人类干扰程度强弱. 随着人类干扰程度的增加, 物种多样性逐渐减少, 天龙山8个样地平均植物物种丰富度为40种/100m^2, 赵家田为28.5种/100m^2, 沙湾为26.7种/100m^2, 秀水为25.5种/100m^2, 而普定仅有21.2种/100m^2. 同时, 群落种类组成可能发生变化. 天龙山的优势植被类型为化香(*Platycarya strobilacea*)林、润楠(*Machilus pingii*)林等, 林下有刺植物少, 草本层优势种不明显. 赵家田、沙湾、秀水、普定等乔木层的优势种化香、马桑(*Coriaria nepalensis*)、滇鼠刺(*Itea yunnanensis*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、珍珠荚蒾(*Viburnum foetidum* var. *ceanothoides*)、异叶鼠李(*Rhamnus heterophylla*)等, 有刺植物(如滇鼠刺、小果蔷薇、异叶鼠李)比例明显增加, 也反映了人类活动的影响; 草本层的优势种明显, 主要为橘草(*Cymbopogon goeringii*)、黄背草(*Themeda triandra* var. *japonica*).

尽管人类活动可能降低物种多样性, 改变群落种类组成, 但赵家田、沙湾、秀水、普定等受人类干扰的样地中木本植物和草本植物覆盖度并未表现出与人

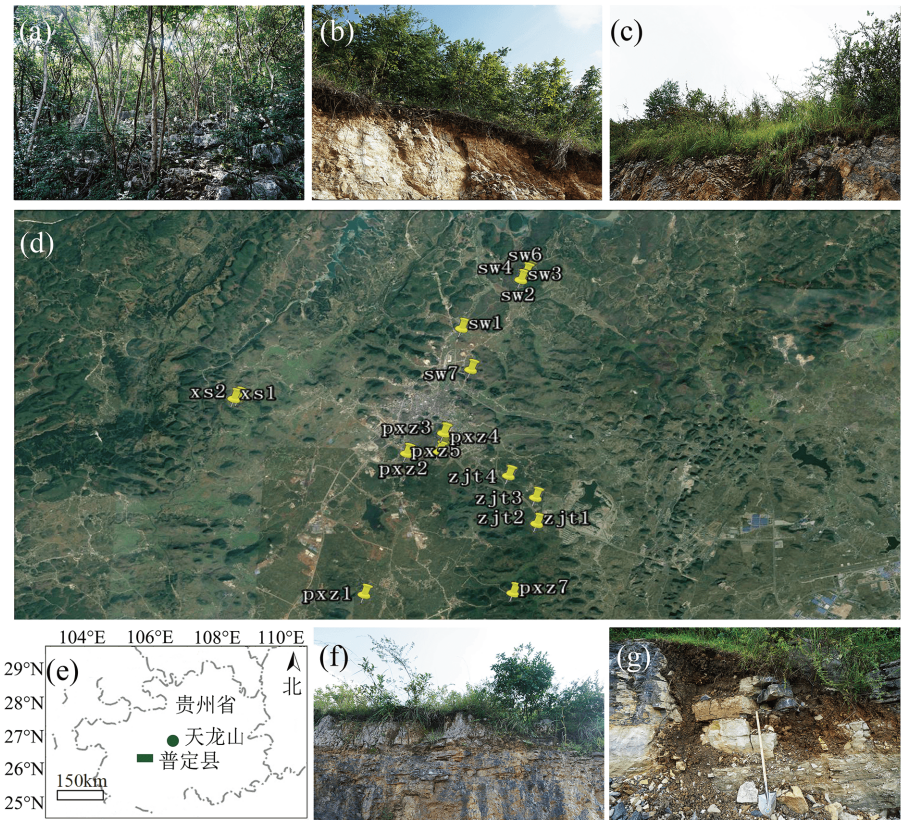

图 1　样地位置及部分样地照片

(a)~(c)分别表示多裂隙石灰岩上森林植被、中等裂隙度石灰岩上灌丛植被、以及少裂隙白云岩上草地植被, 分别摄于天龙山, sw1和sw2样地. (d) 表示本文研究区(普定县及周边取样区域)内剖面位置, pxz、sx、sw、zjt分别代表普定(新行政中心)、秀水、沙湾、赵家田. (e) 表示本文研究区及天龙山样地位置. (f)和(g)分别表示少裂隙和多裂隙土壤剖面, 分别摄于pxz4及zjt2样地. 戴景钰摄于2016年夏

类活动的相关性. 将四个片区18个样地的木本、草本覆盖度与岩石裂隙发育程度进行线性拟合表明, 各个样地中木本植物覆盖度与裂隙发育程度成正比, 而草本层覆盖度则与裂隙发育程度成反比(p<0.01; 图2).

3.2　不同岩性下植被活动和生产力的差异性

对每一时相的NDVI值进行了多年(2001~2010年)平均, 然后分别比较对应时相石灰岩和白云岩分布区的NDVI值, 可以发现在年内约3/4的时相(17个时相)石灰岩分布区NDVI显著高于白云岩分布区(p<0.01). 不显著的月份主要出现在一、二、五、八月. 但对白云岩和石灰岩分布区的多年NPP数据的比较则发现石灰岩分布区多年(2001~2010年)NPP平均值较白云岩地区显著偏低(图3).

NDVI表征了植被活动, 而NPP表征了生产力水平. 不同岩性下植被活动与生产力的结果与相应植被组成和覆盖结果有很好的对应关系. 石灰岩为主的地区木本植物覆盖度高, 植被活动强, 但生产力水平低; 而白云岩为主的地区草本植物覆盖度高, 植被活动弱, 但生产力水平高.

4　讨论

本文结果表明, 无论是野外调查反映的植被种类组成和覆盖度, 还是遥感影像反映的植被活动和生产力均与岩石类型有密切的关系. 石灰岩地区更适合深根系的树木生长, 而白云岩地区更适合浅根系的草本植物生长. 尽管石灰岩地区NDVI较白云岩地区偏高, 但其植被生产力比白云岩偏低, 符合草地与森林相比生物量低但生产力高的一般特点(Schultz等, 1995). 这一结果进一步说明与岩性相关的地下土壤分布会对地上植被产生重要影响, 尤其是影响木本植物和草本植

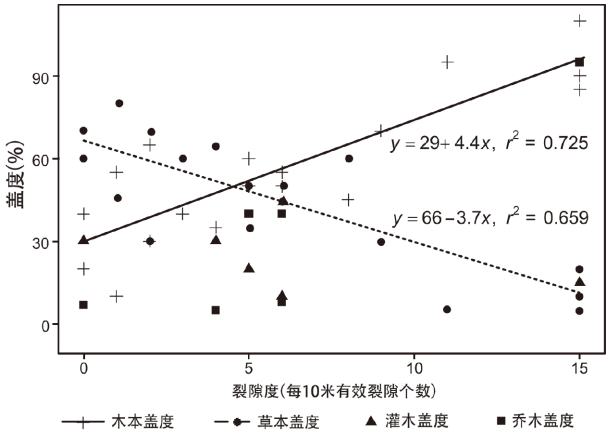

图 2　研究区植被特性与裂隙度的关系

木本植物覆盖度为乔木盖度和灌木盖度相加, 其值>100%

物的分布, 从而验证了前面提出的假说.

本文的结果进一步证实了植物根系分布的两层模式, 亦即树木根系分布在深层土壤而草本植物根系分布在浅层土壤(Schenk和Jackson, 2005). 深根型的树木可能只能生长在土层较厚, 或者存在地下网络通道的区域, 以长期稳定地获取足够的水和养分; 而土层薄的地区只能维持短寿命的草本植物生长. 岩石缝隙为木本植物根系提供了物理空间, 深根性木本植物的根系可穿过土壤或岩石, 形成的地下通道, 获取深层地下水, 以保证植物正常生长(Canadell等, 1996; Richter和Billings, 2015). 在石灰岩区域存在大量的岩石裂缝, 表层土壤容易沿着这些裂缝被淋洗到地下通道, 水土流失严重. 尽管如此, 到达裂隙深层的水分难以被蒸发, 容易被深根系的树木吸收利用.

本文的结果表明, 土壤深度而非土壤体积决定了地表植被的组成和生产力, 也据此提出了白云岩和石灰岩分布区岩石-土壤-植被-大气连续体的不同模式(图4). 本研究通过岩石剖面裂隙的观测发现树木的根系沿着裂隙可达1m以上, 大大超过过去对于土壤水分研究所关注的深度. 随着裂隙深度的增加, 水分和养分储量就会增大几个量级, 水分和养分在地下储库里的滞留时间也会延长(Richter和Billings, 2015). 石灰岩分布区地下裂隙还促进了岩石深层与地表植被的水分联系, 基岩可能通过这一途径自下而上控制地表植被(Rempe和Dietrich, 2014, 2018; Hahm等, 2014). 与石灰岩分布区不同, 白云岩分布区通过裂隙淋失的土壤少. 如果不考虑地表土壤流失, 白云岩分布区单位面积的土壤量比石灰岩分布区大, 但前者土层浅, 很少超过20cm, 不适合深根系的树木生长. 白云岩分布区的浅层土壤中水分易被蒸发, 也缺少与岩石深层的水分联系, 因此白云岩分布区的植被覆盖以草本植物为主, NDVI值低.

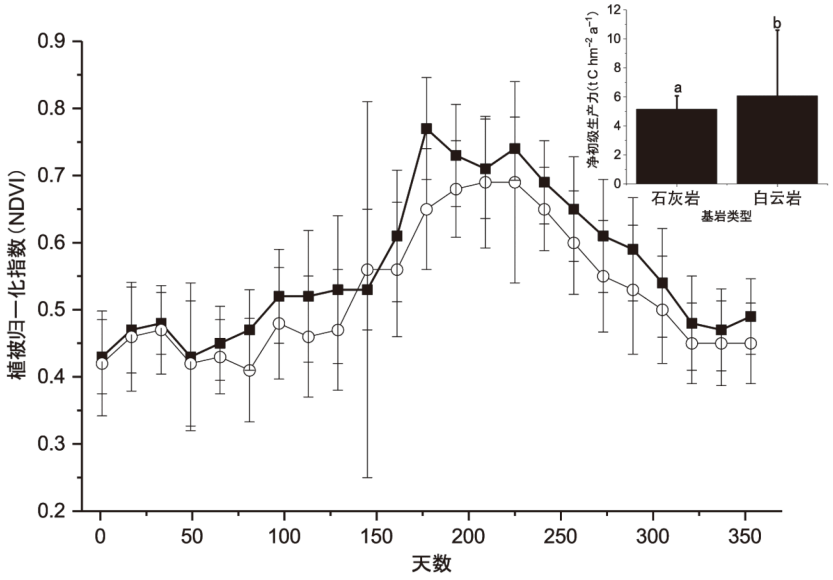

图 3　研究区不同岩性条件下植被NDVI的比较

黑色方块表示石灰岩区域, 空心圆圈表示白云岩区域. 右上角小图为白云岩和石灰岩区域植物生长量(多年净第一性生产力的平均值)比较, a和b表示是否存在差异

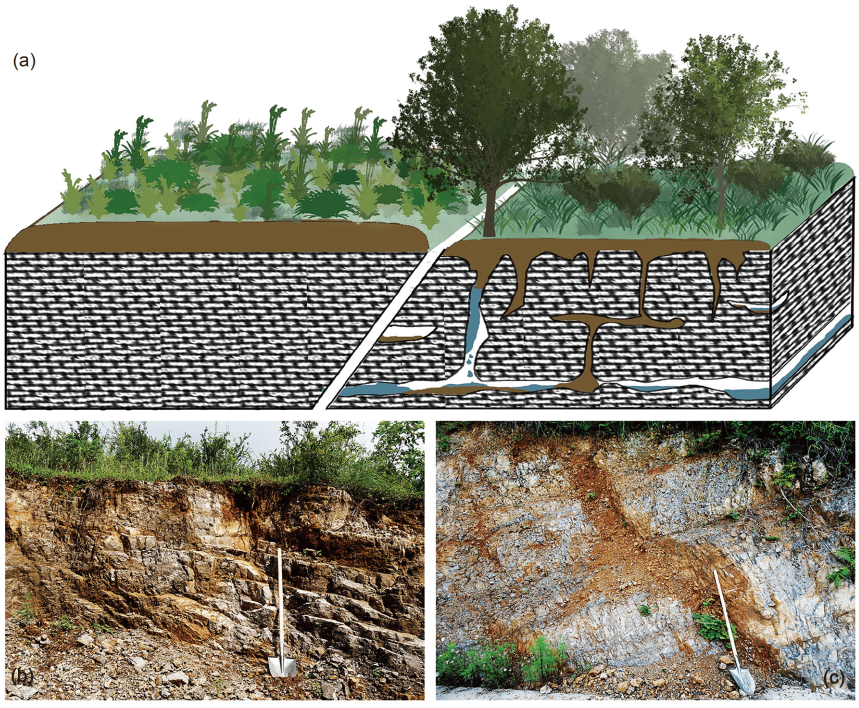

图 4　研究区岩性-土壤-植被-气候系统示意图

(a)表示白云岩(左)和石灰岩(右)地下裂隙的不同导致土壤分布不同, 进而影响到地表植被的组成和覆盖. (b)和(c)分别为相应的野外照片, (b)为白云岩, (c)为石灰岩

本文结果也暗示植物根系与岩石层的相互作用对地表植被至关重要. 深根系深度意味着植物能把碳能量投送到风化层甚至岩石裂隙内部, 从而进一步促进土壤风化(Roering等, 2010). 外生菌根可在4m深度穿过风化层的微孔隙, 促进系统内的水分养分循环(Bornyasz等, 2005). 土壤中植物根系、微生物与土壤和岩石介质往往交织在一起, 使地下的水分和养分过程更加复杂(Richter和Yaalon, 2012). 植物的根际效应能够活化有机养分, 在满足植物自身的养分需求的同时, 加速分解土壤有机质, 将根系、微生物、土壤紧密的联系在一起(Kuzyakov和Xu, 2013).

本文结果对于面临石漠化威胁的喀斯特关键带的植被改善和土地利用优化有着重要意义. 全球深根系植物(5%以上的根系分布在超过2m的深度)主要分布在干旱胁迫的地区(Schenk和Jackson, 2005), 而农业的耕作层的深度一般不超过0.5m, 如果将高大树木破坏而改为种植相对矮小的农作物, 意味着植物只能利用浅层有限的物质资源. 在喀斯特关键带种植人工林进行生态恢复需要重点考虑裂隙发达的石灰岩分布区, 而种植草本植物开展生态恢复则需要重点考虑白云岩分布区, 从而充分利用水热资源, 提高生态系统生产力, 提升其稳定性(Loreau和Hector, 2001).

本文仍然无法确定岩石层本身给植物根系提供的水分量, 也无法确定土壤养分的作用. 可以肯定的是, 湿润的深层土壤能够通过与岩石界面的相互作用保存水分, 为未来进一步定量分析植物对土壤和岩石储存水分的利用提供了思路. 本文对于岩石裂隙、土壤分布和体积、植被种类组成和生产力的关系描述可以为准确量化整个关键带的恢复力和可持续性提供基础(Richter和Billings, 2015). 由于植被类型、岩性构造的差异, 不同关键带水分和养分的下边界差异极大(Roering等, 2010; Holbrook等, 2014), 如何清晰定义关键带垂直梯度上的水分和养分动态仍是一个科学挑战(Lin, 2010).

5　结论

本文通过黔中喀斯特关键带地表植被调查和遥感

影像分析, 探讨了喀斯特关键带内部岩性与地表植被组成和生产力的密切关系. 白云岩岩石致密而缺少大的裂隙, 石灰岩岩石中存在大的缝隙. 地上植被中木本/草本的覆盖度比例与岩石中的宽裂隙(宽度>1cm)的多少具有很好的正相关. 基于MODIS遥感数据获取的NDVI结果进一步表明, 石灰岩分布区各个时相的NDVI值均高于白云岩分布区, 但植被生产力较白云岩分布区低, 符合林地和草地的一般特征. 本文结果说明在喀斯特关键带, 岩性决定土壤的结构和分布, 进而决定地上植被的组成. 尽管石灰岩分布区土壤量可能偏小, 但发达的裂隙结构更适合深根系的树木生长, 植被生产力高. 当前喀斯特地区石漠化治理需要充分考虑地球关键带岩石-土壤-植被-大气相互作用, 基于岩性考虑植被恢复的措施.

致谢 本文野外调查得到了中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站的大力支持, 谨此致谢.

参考文献

杜雪莲, 王世杰, 罗绪. 2009. 黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ^{13}C值的影响. 环境科学, 35: 3587–3594

黄威廉, 屠玉麟, 杨龙. 1988. 贵州植被. 贵阳: 贵州人民出版社

刘玉国, 刘长成, 魏雅芬, 刘永刚, 郭柯. 2011. 贵州省普定县不同植被演替阶段的物种组成与群落结构特征. 植物生态学报, 35: 1009–1018

马丽芳. 2002. 中国地质图集. 北京: 地质出版社

普定县地方志编纂委员会. 1999. 普定县志. 贵阳: 贵州人民出版社

宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 覃文更, 谭卫宁, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨. 2010. 木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释. 植物生态学报, 34: 298–308

杨成, 刘丛强, 宋照亮, 刘占民, 郑厚义. 2008. 贵州喀斯特山区植物土壤C、N、S的分布特征. 北京林业大学学报, 30: 45–51

尹亮, 崔明, 周金星, 李忠武, 黄斌, 方健梅. 2013. 岩溶高原地区小流域土壤厚度的空间变异特征. 中国水土保持科学, 11: 51–58

喻理飞, 朱守谦, 叶镜中. 2002. 喀斯特森林不同种组的耐旱适应性. 南京林业大学学报(自然科学版), 26: 19–22

朱守谦. 1997. 喀斯特森林生态研究. 贵阳: 贵州科技出版社

Bornyasz M A, Graham R C, Allen M F. 2005. Ectomycorrhizae in a soil-weathered granitic bedrock regolith: Linking matrix resources to plants. Geoderma, 126: 141–160

Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. 2007. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. Elements, 3: 307–314

Bucker P K, Grapes R. 2011. Metamorphism of Dolomites and Limestones. Berlin, Heidelberg: Springer

Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J B, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. Oecologia, 108: 583–595

Du H, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Song M, Zhang H. 2015. Spatial pattern of woody plants and their environmental interpretation in the karst forest of southwest China. Plant Biosystems, 149: 121–130

Guo L, Lin H. 2016. Critical zone research and observatories: Current status and future perspectives. Vadose Zone J, 15: 1–14

Hahm W J, Riebe C S, Lukens C E, Araki S. 2014. Bedrock composition regulates mountain ecosystems and landscape evolution. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 3338–3343

Holbrook W S, Riebe C S, Elwaseif M, Hayes J L, Basler-Reeder K, Harry D L, Malazian A, Dosseto A, Hartsough P C, Hopmans J W. 2014. Geophysical constraints on deep weathering and water storage potential in the Southern Sierra Critical Zone Observatory. Earth Surf Process Landf, 39: 366–380

Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. Earth-Sci Rev, 132: 1–12

Kuzyakov Y, Xu X L. 2013. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: Mechanisms and ecological relevance. New Phytol, 198: 656–669

Lin H. 2010. Earth's Critical Zone and hydropedology: Concepts, characteristics, and advances. Hydrol Earth Syst Sci, 14: 25–45

Loreau M, Hector A. 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. Nature, 412: 72–76

National Research Council (NRC). 2001. Basic Research Opportunities in Earth Science. Washington D C: National Academy Press

Rempe D M, Dietrich W E. 2014. A bottom-up control on fresh-bedrock topography under landscapes. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 6576–6581

Rempe D M, Dietrich W E. 2018. Direct observations of rock moisture, a hidden component of the hydrologic cycle. Proc Natl Acad Sci USA, 115: 2664–2669

Richter D B, Yaalon D H. 2012. "The changing model of soil" revisited. Soil Sci Soc Am J, 76: 766–778

Richter D B, Billings S A. 2015. 'One physical system': Tansley's ecosystem as Earth's critical zone. New Phytol, 206: 900–912

Roering J J, Marshall J, Booth A M, Mort M, Jin Q. 2010. Evidence for biotic controls on topography and soil production. Earth Planet Sci Lett, 298: 183–190

Schultz J, Jordan I, Jordan D. 1995. The Ecozones of the World: The Ecological Divisions of the Geosphere. Berlin, Heidelberg: Springer

Schenk H J, Jackson R B. 2005. Mapping the global distribution of deep

roots in relation to climate and soil characteristics. Geoderma, 126: 129–140

Sweeting M M. 2012. Karst in China: Its Geomorphology and Environment. Berlin, New York: Springer

Tong X, Brandt M, Yue Y, Horion S, Wang K, Keersmaecker W D, Tian F, Schurgers G, Xiao X, Luo Y, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H, Fensholt R. 2018. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. Nat Sustain, 1: 44–50

Yue Y M, Zhang B, Wang K L, Liu B, Li R, Yang Q Q, Zhang M Y. 2010a. Spectral indices for estimating ecological indicators of karst rocky desertification. Int J Remote Sens, 31: 2115–2122

Yue Y M, Wang K L, Zhang B, Chen Z X, Jiao Q J, Liu B, Chen H S. 2010b. Exploring the relationship between vegetation spectra and eco-geo-environmental conditions in karst region, Southwest China. Environ Monit Assess, 160: 157–168

(责任编委: 张甘霖)