

DOI: 10.5846/stxb201409031749

徐艳芳, 王克林, 祁向坤, 岳跃民, 童晓伟. 基于 TM 影像的白云岩与石灰岩上喀斯特植被时空变化差异研究. 生态学报, 2016, 36(1): - .

Xu Y F, Wang K L, Qi X K, Yue Y M, Tong X W. Spatial and temporal vegetation changes under geological settings of limestone and dolomite based on TM images. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

基于 TM 影像的白云岩与石灰岩上喀斯特植被时空变化差异研究

徐艳芳^{1,2,3}, 王克林^{1,2,*}, 祁向坤^{1,2}, 岳跃民^{1,2}, 童晓伟^{1,2,3}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 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

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:喀斯特土壤主要由白云岩和石灰岩风化而来, 植被生长及其分布究竟怎样响应这一特殊地质背景? 本研究以人为干扰影响较小的喀斯特自然保护区为研究对象, 采用监督分类法对 1990 年和 2011 年两期 TM 影像进行植被分类, 并利用景观格局分析方法研究两种岩性上植被变化差异。结果表明, 1990 年和 2011 年研究区内两种母岩上均以乔木林和乔灌为主, 草灌和草丛分布少, 白云岩上乔木林的面积比例大于石灰岩上的比例, 而草灌和草丛小于石灰岩上的比例; 近 20 年来白云岩与石灰岩上草丛、草灌、灌丛和乔灌均以正向演替为主, 但白云岩上正向演替比例大于石灰岩上的比例; 两种岩性上植被斑块连接性均增强、破碎程度均降低, 白云岩上植被斑块的破碎化程度和多样性指数较石灰岩上低, 内部连接性强。由此可见, 喀斯特白云岩较石灰岩有利于草丛、草灌的自然恢复, 岩性引起的水土资源配置和养分地球化学循环过程差异制约着喀斯特地区植被的时空格局。

关键词:植被变化; 遥感; 白云岩; 石灰岩

Spatial and temporal vegetation changes under geological settings of limestone and dolomite based on TM images

XU Yanfang^{1,2,3}, WANG Kelin^{1,2,*}, QI Xiangkun^{1,2}, YUE Yuemin^{1,2}, TONG Xiaowei^{1,2,3}

1 Institute of Subtropical Agriculture, The Chinese Academy of Science, Changsha 410125, China

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

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Karst topography has high susceptibility to degradation due to human disturbance. During the last decade, much effort has been made to recover the vegetation in the region of southwest China characterized by karst topography. However, the recovery varies regionally. This study was aimed to assess the impacts of bedrocks on vegetation dynamics. Soil in the karst region of southwest China was mainly derived from limestone and dolomite bedrocks. A natural reserve was selected as the study area to examine the geological control on vegetation change. We classified the Landsat TM5 data recorded in 1990 and 2011 using a supervised classification method for stages of succession of natural vegetation and image characteristics of karst region. We then analyzed spatial patterns to identify the differences in vegetation change rate and direction for two different rock types (limestone and dolomite). In both cases, results showed that the vegetation mainly consisted of forest and tree-shrub mixture in 1990 and 2011. Compared to forest and tree-shrub mixture, the areas covered by grass-shrub

基金项目:中国科学院西部行动计划重大项目(KZCX2-XB3-10); 国家科技支撑计划(2010BAE00739-02); 国家自然科学基金项目(41471445)

收稿日期:2014-09-03; **修订日期:**2015-07-27

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

mixture and grass were small. The forest cover over dolomite bedrock was higher than that over limestone bedrock, while the grass and grass-shrub mixture covers over dolomite bedrock were lower than those over limestone bedrock. Steady forest cover existed in the areas with limestone and dolomite bedrock regions. In regions characterized by dolomite bedrock, the steady forest cover was higher than that in limestone, and the tree-shrub mixture cover increased slowly in both regions. Grass, grass-shrub mixture, shrub, and tree-shrub mixture vegetation-types were all in the period of positive succession and the percentages of positive succession of these four cases over dolomitic bedrock were higher than that in the areas with limestone bedrock. The connectivity was increased and the fragmentation was decreased in areas with limestone and dolomite bedrock. While, the level of fragmentation and diversity was lower in case of dolomite bedrock than that in case of limestone bedrock. The underlying mechanisms include varying soil depth, soil chemical properties, hydrology, etc. between the two types of bedrocks. The results implied that for grass-shrub mixture and shrub, natural recovery may be more suitable in areas with dolomite bedrock than in areas with limestone bedrock.

Key Words: vegetation change; remote sensing; limestone; dolomite

我国西南地区是世界上最大的喀斯特地貌集中分布区之一,由于特殊的地质背景和强烈的岩溶作用,形成地表地下二元结构,土层浅薄且分布不连续,加上高强度人类活动的干扰,植被覆盖率低,生态系统极其脆弱^[1-2]。由于该地区裸露岩石与浅薄土层相互镶嵌,导致喀斯特生境高度异质性和土壤生态功能的空间分异,增加了植被恢复重建的难度^[3]。然而,植被作为喀斯特退化生态系统恢复的主体,在维护脆弱生态系统稳定、调节区域碳平衡和物种多样性保护等生态服务功能方面具有重要作用^[4]。因此,揭示岩性对喀斯特植被时空变化影响对于喀斯特生态系统的功能评估和恢复重建具有重要的现实意义。

传统的植被时空变化研究主要通过野外样地调查与取样,采用空间代时间的方法研究植被结构与功能时空变化,这种方法耗时多、花费大且空间范围有限;另一方面,空间代时间的方法假定所有样地除了演替的时间长短不同外,样地的其他生物和非生物条件相同,已被一些生物地理研究所质疑^[5]。从二十世纪七十年代开始的陆地资源卫星影像(Landsat MSS/TM/ETM+)迄今为止已积累了40多年的数据,为应用长时间序列遥感数据进行区域植被时空变化研究提供了有效方法^[6-8]。目前喀斯特地区植被变化研究通过野外样地调查与取样,基本厘清了局部典型植被群落演替的顺序及不同演替阶段植被的物种构成、生物量和生物多样性的特征等^[9-12],同时也基于多时相遥感数据初步揭示了区域尺度典型喀斯特地区植被时空变化^[13-15]。然而,目前关于喀斯特地区区域尺度植被变化的研究更多的侧重于植被类型与结构变化及喀斯特地表形态、气候因子以及人类活动对植被时空变化的影响^[16-18],忽视了决定喀斯特地区水土资源空间配置的关键制约因素——岩性。

喀斯特地区由于受特殊的地质背景影响,植被变化呈复杂性和多变性特征,岩性基底是影响喀斯特生态环境差异的一个重要基础条件。白云岩和石灰岩在岩溶形态、岩石裂隙发育程度、土层厚度及风化壳持水性等方面都存在显著差异,这些差异制约着区域水土资源的空间配置和养分的地球化学循环过程,进而影响植被变化^[19-20]。因此,忽视喀斯特岩性对退化喀斯特生态系统植被恢复的影响,在一定程度上影响了喀斯特区域植被变化驱动机制分析的客观性,更难以正确认识区域尺度喀斯特岩性与植被恢复时空变化的相互作用。因此,本文以人为干扰影响较小的典型喀斯特自然保护区为研究对象,利用不同时间段的Landsat TM5影像分析不同岩性(白云岩和石灰岩)条件下植被时空变化差异特征,揭示不同岩性对喀斯特植被恢复的影响,以期为该地区生态工程实施及其建设成效监测与评估提供科技支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州茂兰和广西木论自然保护区(图1),是贵州高原向广西丘陵过渡的斜坡地带,地势由西

北向东南降低。该区属于亚热带季风性湿润气候,年均气温 15—18.7 °C,年均降雨量 1530—1820 mm,降水集中分布在 4—10 月。区内喀斯特地貌发育较好,地貌类型以峰丛洼地和峰丛漏斗为主,其岩性主要是由纯质石灰岩与白云岩构成。土壤为石灰土,土被不连续,多存在于岩石裂隙中。受喀斯特生境的影响和制约,原生性植被为常绿落叶阔叶混交林。茂兰和木论保护区分别设立于 1984 年和 1991 年,保护区设立前,受到人为干扰影响,区内分布着演替早期阶段到喀斯特森林顶极群落的一系列演替阶段^[21]。

本区的石灰岩和白云岩,几乎为纯质的碳酸盐类,根据化学分析,所有石灰岩的 CaO 含量在 52.59—54.33% 之间,远远大于石灰岩 CaO 含量的平均值 (42.61%),接近于石灰岩的组成矿物方解石 (CaCO_3) 中的 CaO 的理论含量 (56%),白云岩中 CaO 含量为 30.92—31.64%,MgO 的含量为 19.60—21.89%,大致与其主要组成矿物白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 中的 CaO [30.4%] 和 MgO [21.7%] 的理论含量相近似,故本区碳酸盐岩中,含方解石和白云石在 97—99% 以上,它们通过溶蚀能够残留下了形成土壤的 Si, Al, Fe 等不溶性氧化物,一般在 1% 左右。研究区石灰土成土母岩是纯度较高的白云岩和石灰岩,能够形成土粒的重要成分 SiO_2 , Si_2O_3 和 Fe_2O_3 含量极低,石灰岩仅占 1.52%,白云岩上也只有 2.02%,而含量最高的钙镁碳酸盐类在溶蚀过程中碎水土流失^[22]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源与数据预处理

两期 Landsat TM5 数据 (1990 年 5 月 18 日和 2011 年 5 月 28 日) 来源于中国科学院遥感与数字地球研究所 (<http://www.ceode.cas.cn/sjyhfw/>)。影像获取时间基本相近,减少了因太阳高度角和物候差异所造成的噪声影响。所有影像数据经过大气校正和几何校正,大气校正采用 DOS3 算法,每期影像选取 18—25 个地面控制点进行几何校正,几何校正的均方差控制在 0.5 个像元之内,所有影像采用最近邻域法进行 30m 重采样。岩性数据来源于茂兰喀斯特森林科学考察集^[22],并经过数字化处理。

1.2.2 植被演替阶段划分与分类

喀斯特区域植被自然演替阶段分为草丛-草灌-灌丛-乔灌-乔林-顶极阶段^[21],随着喀斯特植被由草丛阶段向顶极阶段演替过程中,群落高度、盖度增加,密度减小、科属种数量和物种多样性呈现先增加后递减的趋势^{[9][23]}。由于各演替阶段有不同的树种组成、树冠结构及高度,因而在影像上具有不同的特征。根据研究区植被自然演替阶段及 TM 影像对各演替阶段的可分性,本研究将演替顶极群落与乔林阶段合并归为乔木林阶段,植被群落划分为草丛、草灌、灌丛、乔灌、乔木林 5 个演替阶段,居民区、农田区、水体等非植被区域归并为一类。各演替阶段群落特征见表 (1)。

两期影像数据分类训练样本主要通过野外观测和目视解译选取,各演替阶段植被类型分别选取 15—20 个训练样本,所有影像均采用最大似然监督分类法进行分类。分类精度验证主要利用野外观测数据以及当地居民的访谈信息,分别随机选取 100 个和 121 个野外调查验证点对两期数据进行验证,分类总体精度均达 85% 左右,影像预处理与分类由 ERDAS IMAGINE 8.5 和 ArcGIS 9.2 实现。

1.2.3 数据分析方法

(1) 净变化率

净变化率 (NCR) 表示每个演替阶段从开始年份到终止年份的变化,反映植被变化的动态度。

$$NCR = \frac{A_{ie} - A_{is}}{A_{is}} \times 100\% \quad (1)$$

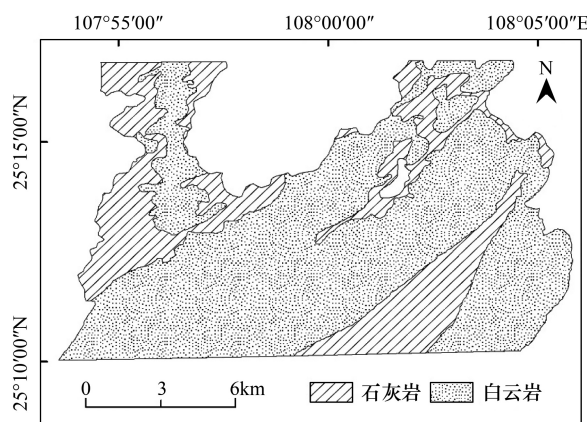


图 1 研究区位置和岩性示意图

Fig.1 Location and lithology of the study area

式中, A_{is} 是第 i 个演替阶段开始年份的面积, A_{ie} 是第 i 个演替阶段终止年份的面积。

表 1 不同演替阶段典型喀斯特植被群落特征^{[9][15]}

Table 1 Characteristics of vegetation community at different succession stages

演替阶段 Succession stage	群落特征 Community characteristics
草丛阶段 Grass stage	属于演替的早期阶段, 仅草本层一个层次, 结构简单, 群落高度小于 0.9m, 优势种主要分布有蕨 (<i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>)、白茅 (<i>Imperata cylindrica</i>) 等
草灌阶段 Grass-shrub stage	草丛向灌丛的过渡阶段, 开始出现灌木层, 但灌木高度低、个体小、盖度低, 群落高度介于 0.9—1.2m, 优势种要分布有马桑 (<i>Coriaria nepalensis</i>)、冻绿 (<i>Rhamnus utilis</i>)、斑茅 (<i>Saccharum arundinaceum</i>) 和黄荆 (<i>Vitex negundo</i>) 等
灌丛阶段 Shrub stage	形成典型的灌木层和草本层, 灌木层发育良好, 群落高度介于 1.2—2m, 优势种主要分布有盐肤木 (<i>Rhus chinensis</i>)、火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)、红背山麻秆 (<i>Alchornea trewioides</i>)、灰毛浆果楝 (<i>Cipadessa cinerascens</i>) 等
乔灌阶段 Tree-shrub stage	属于灌丛到乔木的过渡阶段, 小乔木占据一定优势, 形成乔木层、灌木层和草本层, 但乔木层和灌木层分化不明显, 群落高度介于 2—4m, 优势种主要分布有羊蹄甲 (<i>Bauhinia purpurea</i>)、八角枫 (<i>Alangium chinense</i>)、野桐 (<i>Mallotus tenuifolius</i>) 等
乔木林阶段 Forest stage	群落稳定性增大、建群种和各层优势种逐渐稳定, 优势种主要分布有青冈 (<i>Cyclobalanopsis glauca</i>) 化香树 (<i>Platycarya strobilacea</i>)、云贵鹅耳枥 (<i>Carpinus pubescens</i>)、铁榄 (<i>Sinosideroxylon pedunculatum</i>) 等

(2) 各阶段演替转移分析

转移矩阵是量化描述植被群落变化的一种方法, 能反映两个时期各演替阶段面积变化情况以及每个演替阶段从前一个时期向后一个时期转移去向比率。转移矩阵的数学形式为:

$$A_{ij} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{n1} & A_{n2} & A_{n3} & A_{nn} \end{vmatrix} \quad (2)$$

式中, A 表示面积, n 表示演替的阶段数, i 和 j 分别为研究期初与研究期末的演替阶段序号

1.2.4 景观格局分析

本研究选取的自然保护区植被景观类型以乔木林为主导, 乔灌、灌丛、草灌、草丛等景观类型交互分布, 形成一个包含了不同植被演替阶段的喀斯特植被景观实体。为了进一步定量刻画植被时空演变的结构组成和空间配置特征, 本研究进一步通过景观指数来分析植被变化的景观格局特征。基于对不同植被景观类型斑块平均面积的大小、形状的规则程度以及分散与集聚程度等方面的考虑, 并结合不同景观指数之间的相关性及其含义, 选取并计算斑块个数 (NP)、斑块密度 (PD)、平均斑块面积 (AREA_MN)、聚集度指数 (AI)、散布与并列指数 (IJI)、香农多样性指数 (SHDI) 等景观指数来分别分析斑块类型水平与景观水平研究区植被的景观格局变化特征^[24]。

2 结果与讨论

2.1 两种母岩上植被的时空变化特征

两种母岩上植被各演替阶段不同时期的面积分布及其变化见图 2 和表 2。由此可知, 1990 年和 2011 年研究区两种母岩上均以乔木林和乔灌为主, 草灌和草丛阶段面积小。这主要是由于研究区属于自然保护区, 人为干扰少, 利于植被自然恢复。白云岩上演替晚期阶段的乔木林比例大于石灰岩上的比例, 而演替早期阶段的草灌和草丛比例小于石灰岩上的比例, 石灰岩上非植被比例大于白云岩上的比例, 主要分布为居民点、农

田区以及裸地。1990—2011 年两种母岩上各演替阶段面积变化明显,白云岩上乔木林面积增加 1404.1 ha,乔灌减少 126.0 ha,灌丛减少 694.7 ha,草灌减少 376.0 ha,非植被地分别减少 59.7 ha;石灰岩上乔木林面积增加 565.6 ha,乔灌略有增加,灌丛减少 309.9 ha,草灌减少 213.4 ha,非植被地增加。两种母岩上草灌和灌丛的变化率明显大于其他演替阶段,这主要由于草灌和灌丛阶段个体较小,高度和密度居中,盖度较小,光线较强,这一阶段生物量开始上升,物种多样性增长,生物归还系数提高,有利于土壤质地的改善,促进植被的更新^[25]。石灰岩上乔木林的净变化率均大于白云岩上,这主要是由于白云岩上已有的乔木林面积比例大,能够发生演替的面积相对较少。

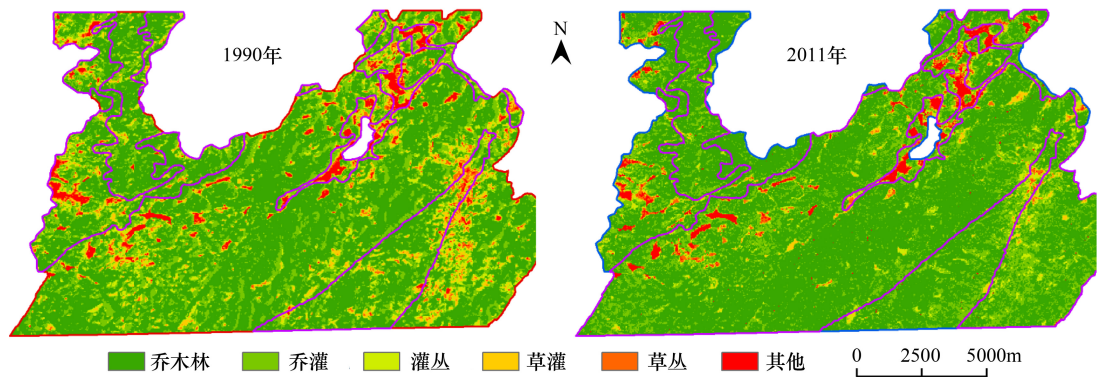


图 2 1990 年和 2011 年植被各演替阶段空间分布图

Fig.2 Spatial distributions of vegetation successional stages in 1990 and 2011

表 2 1990 年和 2011 年各演替阶段面积分布比例及变化

Table 2 The percentage and variations of succession stages in 1990 and 2011

阶段 Stage	1990 年/%		2011 年/%		1990—2011NCR/%	
	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone
乔木 Forest	59.7	47.1	70.5	58.2	+18.1	+23.5
乔灌 Tree-shrub	23.3	24.4	22.3	24.6	-4.2	+0.7
灌丛 Shrub	8.9	12.4	3.6	6.3	-59.7	-49.0
草灌 Grass-shrub	4.2	6.1	1.2	1.9	-69.8	-68.7
草丛 Grass	2.1	4.0	1.0	2.8	-54.0	-28.8
其他 other	1.8	6.0	1.4	6.2	-25.2	+2.5

2.2 两种母岩上植被变化速率的差异

由表 3 和 4 可知,近 20 年来两种母岩上植被演替速率总体趋于缓慢,乔木林保持稳定的比例达 80% 以上,白云岩上乔木林保持稳定的比例大于石灰岩上。从各阶段正向演替速率看,在演替的高级阶段,1990—2011 年两种岩性上各阶段向乔木林阶段演替的过程中,乔灌演替为乔木速率最快,白云岩上乔灌演替为乔木林的年均演替速率 3.1%,石灰岩上年均演替速率为 2.7%;而两种岩性上由灌丛到乔木林的正向演替速率比较慢,白云岩和石灰岩上灌丛演替为乔木林的年均演替速率分别为 1.6%和 1.3%。在演替的初级阶段,两种岩性上非植被地的演替速率差异也较大,白云岩上非植被地演替为草丛、草灌的年均演替速率分别为 0.6%和 0.8%,而石灰岩上分别为 0.4%和 0.3%。从各阶段逆向演替速率看,1990—2011 年石灰岩上的草灌和草丛更容易退化成非植被地,白云岩上草灌和草丛退化成非植被的年均速率为 0.2%和 0.3%。石灰岩草灌和草丛退化成非植被的年均速率为 0.5%和 0.7%。因此,研究区白云岩较石灰岩上更利于草灌草丛等处于演替初级阶段的植被恢复,而石灰岩上群落不够稳定,容易发生退化,尤其是处于演替低级阶段的草灌草丛易退化成裸地。

表 3 1990—2011 年白云岩上植被各演替阶段面积转移矩阵/hm²Table 3 The transfer matrix of vegetation succession on dolomite in 1990—2011/ hm²

阶段 Stage	乔木 Forest	乔灌 Tree-shrub	灌丛 Shrub	草灌 Grass-shrub	草丛 Grass	其他 Other	1990 总 1990sum
乔木 Forest	6597.2	1128.2	35.1	2.6	1.0	12.7	7776.8
乔灌 Tree-shrub	2059.5	869.9	75.6	13.9	4.4	11.5	3034.8
灌丛 Shrub	411.7	557.6	131.8	26.7	13.4	22.1	1163.3
草灌 Grass-shrub	80.4	250.2	119.8	44.2	24.3	20.0	538.9
草丛 Grass	27.9	85.2	75.9	35.1	31.2	18.0	273.3
其他 other	4.2	17.7	30.4	40.3	51.3	93.2	237.1
2011 总	9180.9	2908.8	468.6	162.8	125.6	177.5	13024.2

表 4 1990—2011 年石灰岩上植被各演替阶段面积转移矩阵/hm²Table 4 The transfer matrix of vegetation succession on limestone in 1990—2011/hm²

阶段 Stage	乔木 Forest	乔灌 Tree-shrub	灌丛 Shrub	草灌 Grass-shrub	草丛 Grass	其他 Other	1990 总 1990sum
乔木 Forest	1991.5	390.6	21.1	1.4	0.7	5.2	2410.5
乔灌 Tree-shrub	743.4	419.0	54.2	7.6	5.2	17.6	1247.0
灌丛 Shrub	187.4	279.8	90.4	19.7	14.6	41.1	633.0
草灌 Grass-shrub	36.9	111.9	75.4	25.0	29.7	31.5	310.4
草丛 Grass	13.1	40.4	55.0	25.5	39.1	29.3	202.4
其他 other	3.7	13.6	27.1	17.9	54.8	190.3	307.4
2011 总	2976.0	1255.3	323.2	97.1	144.1	315.0	5110.7

2.3 两种母岩上植被演替方向的差异

两种母岩上植被整体演替方向的分布和植被各阶段演替方向的分布见图 3 和图 4。由图 3 可知,两种母岩上植被整体主要保持稳定不变,正向演替的比例约 20%,逆向演替的比例相对较小。这主要是由于研究区为保护区,演替晚期阶段的植被分布较多,群落趋于稳定,演替速率趋于缓慢。白云岩上总体正向和逆向演替比例均小于石灰岩上,保持稳定不变的比例大于石灰岩上,这主要是由于白云岩上乔木林面积分布较大,能够发生演替的面积较少。石灰岩上植被逆向演替的比例大主要可能是由于研究区石灰岩上植被分布的区域海拔较高,坡度大,土层浅薄,植被恢复相对缓慢;同时地势低平的区域在划分为保护区前相比白云岩区有较多农田分布。由植被各阶段演替方向的分布(图 4)看,两种岩性上草丛、草灌、灌丛和乔灌这四个阶段均以正向演替为主,白云岩上正向演替的比例大于石灰岩上的比例,其中草灌和草丛正向演替所占比例最大,分别为 83.6% 和 82.0%。两种岩性上各阶段正向演替的面积对总体正向演替面积贡献最大的均为乔灌,比例达 40.0% 以上,其次是灌丛,比例达 22.2% 以上。对逆向演替来说,白云岩上乔灌逆向演替的面积对总体逆向演替面积的贡献比例大于石灰岩上,但其他阶段对总体逆向演替面积的贡献比例均小于石灰岩上(图 5)。由此可见,研究区两种岩性上植被总体保持不变,发生正向演替的主要是乔灌和灌丛,白云岩上更利于草丛和草灌的正向演替。

2.4 两种母岩上植被景观格局变化特征

为了进一步反映研究区景观整体格局变化,借助于景观格局分析软件 Fragstats4.2,计算出两种母岩上景

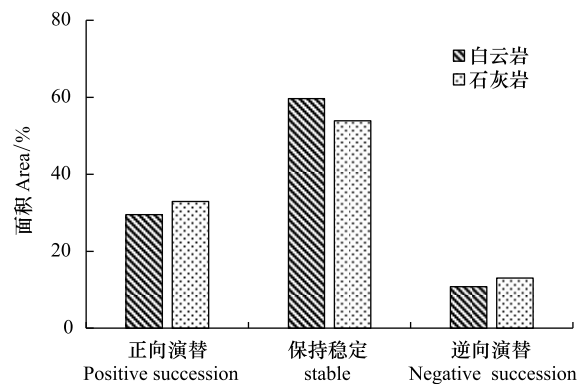


图 3 白云岩与石灰岩上植被总体演替方向分布

Fig. 3 The distributions of vegetation succession direction on dolomite and limestone

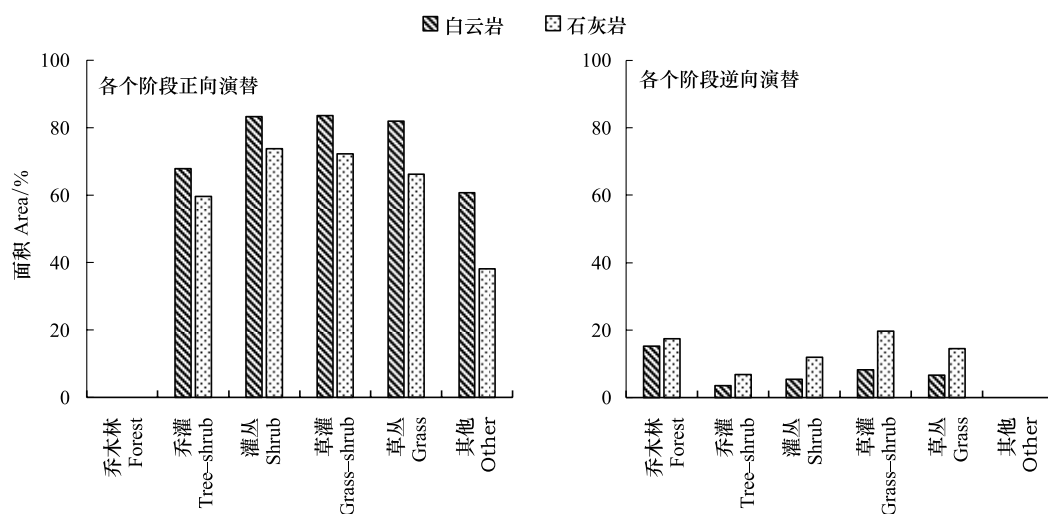


图 4 两种母岩上植被各阶段演替方向分布 (F: 乔木林, TS: 乔灌, S: 灌丛, GS: 草灌, O: 其他)

Fig.4 Distributions of each succession stages' direction on the two rock type

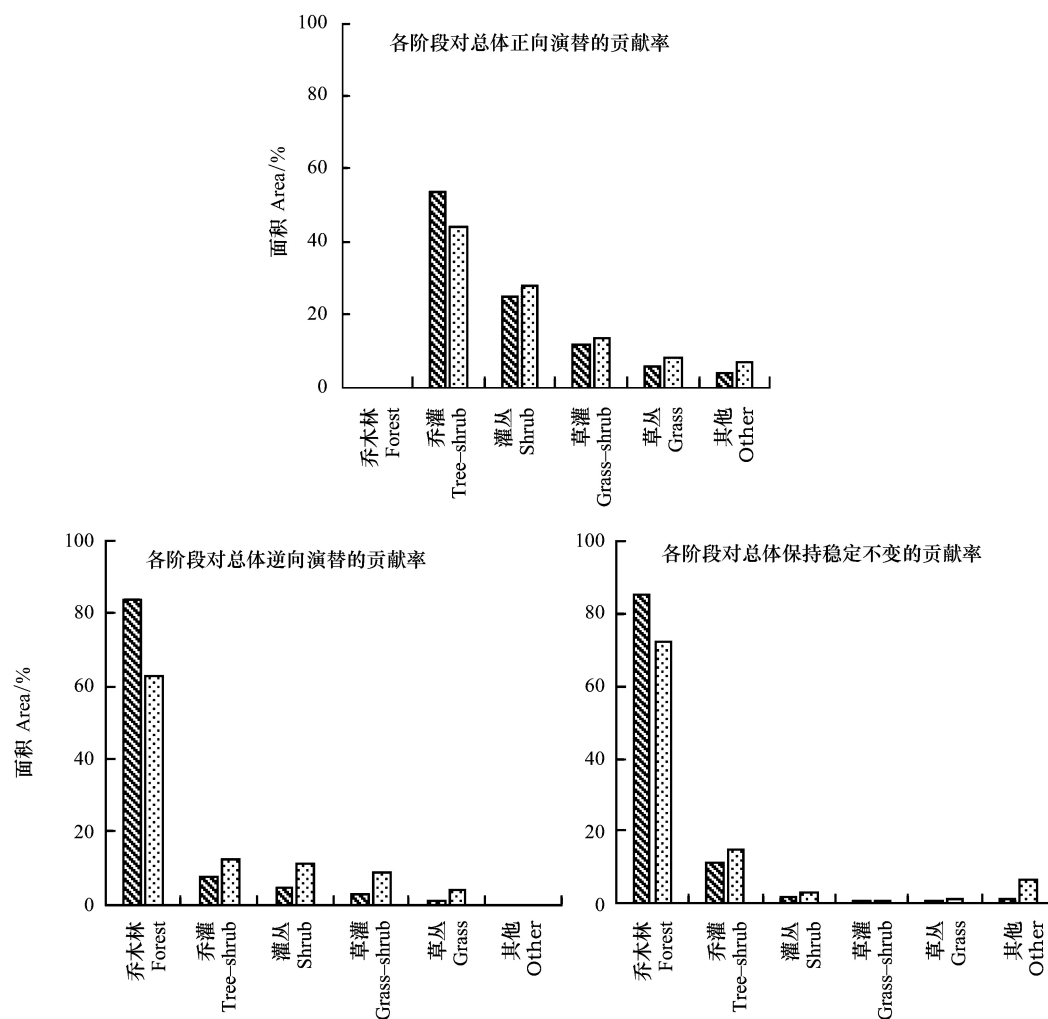


图 5 各阶段不同演替方向对总体不同演替方向总面积的贡献比例

Fig.5 The contribution percentages of each stage to the sum area of different succession direction

观水平与斑块类型水平特征指数。从景观水平的指数变化(表5)来看,两种母岩上斑块数量和斑块密度均减少,平均斑块面积和聚集度指数均增加,但白云岩上斑块的破碎化程度和多样性指数较石灰岩上均低但内部连接性强,这主要是由于乔木林在白云岩上比例大且集中分布,而石灰岩分布零散,乔木林的比例相对较少。从斑块类型水平的指数变化(表6和表7)来看,两种岩性上乔木林的斑块数量均减少,平均斑块面积和聚集度指数明显大于其他演替阶段类型,白云岩上乔木林的平均斑块面积和聚集度指数均大于石灰岩上。近20年来草灌灌丛的斑块数、斑块面积均减少,聚集度指数也明显减小,说明研究区植被趋于正向演替,由草灌、灌丛向乔木林、乔灌等植被演替高级阶段发展。因此,景观格局分析进一步表明,近20年来研究区植被在逐渐恢复。

表5 两个时期白云岩与石灰岩上景观水平指数分布

Table 5 Landscape metrics of vegetation succession on the two rock type at the landscape level in 1990 and 2011

景观指数 Landscape index	1990		2011	
	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone
NP	7518	3954	6254	3417
PD	57.7	77.4	48	66.9
AREA_MN	1.7	1.3	2.1	1.5
AI	73.2	67.2	75.5	70.2
SHDI	1.1	1.4	0.9	1.2

表6 1990年白云岩与石灰岩上斑块类型水平指数分布

Table 6 Landscape metrics of vegetation succession on the two rock type at the class level in 1990

阶段 Stage	NP		AREA_MN		IJI		AI	
	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone
乔木 Forest	412	319	18.9	7.6	26.7	28.5	87.2	83.5
乔灌 Tree-shrub	2787	1201	1.1	1.0	48.9	54.5	58.5	56.6
灌丛 Shrub	2049	1056	0.6	0.6	76.7	79.1	42.8	43.8
草灌 Grass-shrub	1226	725	0.4	0.4	75.6	75.4	41.8	39.4
草丛 Grass	821	159	0.3	1.9	81.7	75.7	35.2	77.3
其他 other	223	494	1.1	0.4	76.2	77.7	68.2	39.4

表7 2011年白云岩与石灰岩上斑块类型水平指数分布

Table 7 Landscape metrics of vegetation succession on the two rock type at the class level in 2011

阶段 Stage	NP		AREA_MN		IJI		AI	
	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone	白云岩 dolomite	石灰岩 limestone
乔木 Forest	375	308	24.5	9.7	16.3	21.0	86.0	82.6
乔灌 Tree-shrub	3586	1396	0.8	0.9	33.1	45.7	52.0	53.7
灌丛 Shrub	1270	818	0.4	0.4	76.0	83.7	38.8	40.2
草灌 Grass-shrub	485	402	0.3	0.2	83.0	87.1	39.8	29.9
草丛 Grass	265	268	0.5	0.5	86.8	78.7	47.3	48.0
其他 other	273	225	0.7	1.4	94.9	90.1	64.0	72.1

2.5 不同岩性上植被变化差异原因分析

上述研究结果表明,不同喀斯特岩性(白云岩、石灰岩)上植被的时空变化,演替的速率与方向以及景观格局均存在时空差异,这可能是由于两种母岩在岩溶形态、岩石裂隙发育程度、土层厚度及风化壳持水性等方面的差异引起。岩性差异制约着喀斯特区域水土资源的空间配置和养分地球化学循环过程,进而影响不同岩性上植被变化的时空差异。首先,从水土资源空间配置方面来看,一方面,岩性不同,形成的表层岩溶带、土壤

结构和植被类型也不同,岩溶发育程度和规模也不同,其控制着系统的输入、输出和传输过程,影响着系统的水文特性,不同的碳酸盐岩岩溶水系统具有不同的下渗和产流方式以及蓄水调水的能力,以石灰岩为主的地下水系统具有一定规模的地下空间,地下河水系发育,水土垂直漏失严重^[26]。另一方面,白云岩的风化过程以物理风化为主,物理崩解提供的岩石碎块更有利于化学风化的进行,再加上白云岩中晶间孔隙均匀,有利于整体溶蚀作用的进行,而石灰岩在受力时节理裂隙分布极不均匀,易形成岩石裂缝和洞穴系统,表现为差异性溶蚀作用显著,这些差异决定了溶蚀残留物在地表具有不同的堆积与丢失方式^[19]。石灰岩区土粒易聚集在岩体的裂隙和地下空隙系统中,而白云岩中溶蚀残余物质能相对均匀的分布于地表,白云岩地区的土层厚度往往大于石灰岩地区,成土速度较灰岩岩组快,土体分布较连续,裸地相对要少,而石灰岩地区石漠化现象更严重^[27]。

其次,从养分的地球化学物质循环过程来看,喀斯特区域元素地球化学迁移形成了富钙偏碱的地球化学环境,并制约元素迁移的质和量^[20],从元素营养方面影响植物变化。由于岩性的不同,化学元素含量存在差异,又因岩石风化过程中 90% 以上的物质随水带走,能够残留下来形成土壤的一般在 1% 左右,而 Ca、Mg 的大量迁移使土壤偏碱性,并制约着很多元素,尤其是 Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素的存在状态和有效性^[28-29]。白云岩区土壤为中性偏弱酸性,石灰岩区为中性偏碱,石灰岩区土壤有更高的钙、镁含量。在碱性条件下,土壤中的 N 矿化快,而 P、Fe、Mn 等营养元素的生物有效性比在酸性土壤中更差,嫌钙植物在这类土壤上生长则会出现缺 P 和 Fe 症状。酸性土壤中由于 pH 低,钙生植物在生长过程中需要吸取大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 作为营养,但酸性土壤不能保证供应,因而钙生植物生长不良或甚至于不能生长。上述差异特别是钙镁元素之外的含量差异,在形成土壤过程中可能得到了放大,因而对植物的影响更明显^[30]。已有研究表明,喀斯特区域植物分布与岩性有更为直接的关系,植物对土壤元素的吸收、富集有一定的选择性,植物元素的含量与分布和元素的地球化学行为密切相关^[31]。因此,不同岩性条件下喀斯特植被恢复与演变存在时空差异,在喀斯特区域并不是一经封山育林就能完全自然恢复,它受到地质背景的限制,在实施生态恢复工程时,必须考虑岩性的差异对植被恢复的影响,因地制宜的采取生态建设与保护措施。

3 结论

喀斯特地区受特殊的地质背景影响,白云岩和石灰岩在岩溶形态、裂隙发育程度、土层厚度及风化壳持水性等方面都存在显著差异,这些差异制约着区域水土资源的空间配置和养分过程,进而影响植被变化。本文基于两期 Landsat TM5 数据,选择人为干扰少的茂兰和木论保护区,对比分析了喀斯特区白云岩与石灰岩上植被时空变化特征,主要研究结论如下:

(1) 1990—2011 年研究区的两种母岩上均以乔木林和乔灌为主,草灌和草丛的面积分布少,随着演替恢复时间的增长,两种母岩上低级阶段的植被群落逐渐被高级阶段群落取代,植被群落趋于稳定,演替速率逐渐减缓。

(2) 白云岩与石灰岩上乔木林大部分保持稳定不变,白云岩上乔木林保持不变的比例较大;草丛、草灌、灌丛和乔灌均以正向演替为主,而逆向演替比例小于石灰岩上。

(3) 景观格局变化上,近 20 年来两种岩性上植被斑块数量和密度均减少、景观连接性和聚集度均增强,白云岩上植被景观破碎化程度和多样性指数较石灰岩上低、内部连接性强。

(4) 喀斯特白云岩较石灰岩有利于草丛、草灌的自然恢复,岩性引起的水土资源配置和养分地球化学循环过程差异制约着喀斯特地区植被的时空格局,在实施生态工程时,必须考虑不同岩性条件下的植被恢复的时空差异特征,因地制宜的采取生态建设与保护措施。

参考文献 (References):

- [1] 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.

- [2] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [3] 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.
- [4] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 2004, 10(12): 2052-2077.
- [5] Johnson E A, Miyanishi K. Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 419-431.
- [6] Song C H, Woodcock C E, Li X W. The spectral/temporal manifestation of forest succession in optical imagery: The potential of multitemporal imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2/3): 285-302.
- [7] Kuplich T M. Classifying regenerating forest stages in Amazônia using remotely sensed images and a neural network. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234(1/3): 1-9.
- [8] Frost G V, Epstein H E, Walker D A. Regional and landscape-scale variability of Landsat-observed vegetation dynamics in northwest Siberian tundra. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(2): 025004.
- [9] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. 林业科学, 2002, 38(1): 1-7.
- [10] 李先琨, 蒋忠诚, 黄玉清, 向悟生, 吕仕洪, 叶铎, 苏宗明. 桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响. 地球学报, 2008, 29(2): 253-259.
- [11] 杜虎, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 曾馥平, 鹿士杨, 时伟伟, 唐成, 谭秋锦. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系. 植物生态学报, 2013, 37(3): 197-208.
- [12] 温远光, 雷丽群, 朱宏光, 刘虹, 覃林, 马祖陆, 王克林, 庄嘉, 蓝嘉川, 龙涛, 陆晓明, 邓艳, 谢益君, 王家妍. 广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征. 生态学报, 2013, 33(18): 5723-5730.
- [13] 杨胜天, 朱启疆. 贵州典型喀斯特环境退化与自然恢复速率. 地理学报, 2000, 55(4): 459-466.
- [14] 阎建忠, 张德铨, 摆万奇, 刘燕华, 包维楷, 刘林山, 郑度. 基于植被演替的土地覆被变化研究——大渡河上游的森林采伐、更新和退化. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005, 35(11): 1060-1073.
- [15] Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 245-253.
- [16] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 陈琼, 严祥. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价-以贵州省毕节地区为例. 生态学报, 2011, 31(12): 3255-3264.
- [17] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 廖楚杰, 徐艳芳, 朱海涛. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应分析. 生态学报, 2014, 34(12): 3425-3434.
- [18] 马华, 王云琦, 王力, 王云坤. 近 20a 广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系. 山地学报, 2014, 32(1): 38-45.
- [19] 李阳兵, 王世杰, 李瑞玲. 岩溶生态系统的土壤. 生态环境, 2004, 13(3): 434-438.
- [20] 袁道先. 论岩溶环境系统. 中国岩溶, 1988, 7(3): 179-186.
- [21] 喻理飞, 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 熊志斌. 退化喀斯特群落自然恢复过程研究——自然恢复演替系列. 山地农业生物学报, 1998, 17(2): 71-77, 86-86.
- [22] 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987: 35-37.
- [23] 文丽, 宋同清, 杜虎, 王克林, 彭晚霞, 曾馥平, 曾朝霞, 何铁光. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制. 生态学报, 2015, 35(17): 1-17.
- [24] 邬建国. 景观生态学-格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000: 97-108.
- [25] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被的演替规律与更新策略. 山地学报, 2008, 26(5): 597-604.
- [26] 曹建华. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 2005: 23-30.
- [27] 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 张殿发, 李凤全, 周忠发, 熊康宁. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
- [28] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 1988: 25-30.
- [29] 侯满福, 蒋忠诚. 茂兰喀斯特原生林不同地球化学环境的植物物种多样性. 生态环境, 2006, 15(3): 572-576.
- [30] 周运超, 潘根兴. 茂兰森林生态系统对岩溶环境的适应与调节. 中国岩溶, 2001, 20(1): 47-52.
- [31] 莫源富, 奚小双, 陈忠将. 岩石-土壤-植被(红背山麻杆-裸花紫珠)间的元素迁移——以广西巴马岩溶石山地区为例. 中国岩溶, 2010, 29(4): 440-444.