

基于 GIS 的喀斯特区域不同岩性 基底植被 NDVI 变化分析

马士彬^{1,2,3}, 安裕伦^{1,2}, 杨广斌^{1,2}

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室,
贵阳 550001; 3. 六盘水师范学院 环境与资源科学系, 贵州 六盘水 553004)

摘要:为了探索喀斯特区域植被变化的一般性规律,揭示纯喀斯特与亚喀斯特区域植被效应的差异性。以 1:20 万地质图岩性基底,利用 2000—2013 年 SPOT VGT_NDVI 数据,通过变化倾斜率、变异系数以及相关分析法,对比分析了不同岩性区植被,NDVI 的变化规律及主导因素。研究发现:(1)不同岩性基底上的 NDVI 值、NDVI 变化率及变异系数存在一定差异性,NDVI 值表现为非喀斯特区域>纯喀斯特区域≈亚喀斯特区域;年际波动亚喀斯特区域>纯喀斯特区域>非喀斯特区域;呈增加趋势变化像元比重纯喀斯特区域>亚喀斯特区域>非喀斯特区域,减少趋势比重相反;各岩性区 NDVI 分布的差异性由土地覆被差异导致,其中森林和农用地比重贡献最大。(2)10 a 时间尺度上植被 NDVI 变化主要受人为因素影响,与气候变化关系不显著。(3)受岩性控制,亚喀斯特区域生态环境比较敏感,与纯喀斯特相比较更易受人作用影响。因此在喀斯特区域可持续发展过程中,“亚喀斯特”地质背景上的生态安全更应引起关注。

关键词:GIS; 亚喀斯特; NDVI; 岩性; 贵州

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0202-05

Analysis of Vegetable NDVI Variation on Various Lithology in Karst Area Based on GIS

MA Shibin^{1,2,3}, AN Yulun^{1,2}, YANG Guangbin^{1,2}

(1. School of Geography and Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Guizhou Mountain Resources and Environmental Remote Sensing Application Laboratory, Guiyang 550001, China;

3. Department of Environment and Geography, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou 553004, China)

Abstract: To explore general regularity of NDVI change in the Karst region, and reveal the diversity of vegetable effect between semi-karst and pure-karst. Based on geology map of 1:200 000, and using SPOT VGT image data from 2000 to 2013, we carried out a comparative study on NDVI change in various lithology by the method of change slope, various coefficient and correlation analysis. The results show that it is different for various lithology to mean-NDVI, the change rate and various coefficient of NDVI, mix-NDVI decreases in the order: non-Karst>Karst>semi-Karst, various coefficient of NDVI decreased in the order: semi-Karst>typical Karst>non-Karst, and the proportion of NDVI enhance decreases in the order: typical Karst>semi-Karst>non-Karst, but the proportion of decrease is the exact contrary, the diversity of NDVI in various lithology results from the land coverage, the proportion of forest and farmland are key factories on the variation of NDVI. On short-term scale, the variation of NDVI is driven by human factor, the role of climate change is insignificant. Due to the influence of lithology, in contrast with Karst, the ecological sensitivity of semi-Karst is higher, and it is easier that the ecological environment of semi Karst is influenced by the human factor. Therefore, ecology safety should be concerned especially in semi-Karst background.

Keywords: GIS; semi-Karst; NDVI; lithology; Guizhou Province

收稿日期:2016-03-31

修回日期:2016-05-17

资助项目:贵州师范大学研究生创新基金(研创[2016]25);贵州省教育厅自然科学研究重点项目(黔教合 KY 字[2013]173 号);贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2015]7610 号,黔科合 LH 字[2014]7459 号);国家自然科学基金(41161002,41361091);贵州省教育厅高校人文社会科学研究规划项目(14GH007)

第一作者:马士彬(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士生,研究方向:遥感与地理信息系统应用。E-mail:msb88.com@163.com

通信作者:杨广斌(1973—),男,山东聊城人,博士,教授,硕士研究生导师,研究方向:GIS 应用与开发。E-mail:ygblyn@163.com

喀斯特(岩溶)是一种地质过程形成的自然现象,包括水对碳酸盐岩溶蚀的地球化学过程和形成的地貌形态,中国西南地区是世界三大喀斯特地貌连片发育区^[1]。杨明德指出喀斯特环境是地球上一个独特的具有二元三维结构的自然环境,是一个物质能量交换复杂的开放系统^[2]。喀斯特区域地质环境复杂,以贵州分布的碳酸盐岩为例,有约34.6%的“不纯碳酸盐岩”,其岩溶发育特征程度与纯碳酸盐岩有显著区别,因此可以称为“亚喀斯特”,主要包括碳酸盐岩夹碎屑岩、碳酸盐岩与碎屑岩交互夹层两类^[3]。不同岩性区在岩溶形态、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,因此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^[4-5]。另外从物质循环的角度看,岩石是土壤矿物质的主要来源,由于不同岩性的岩石所含有的矿物种类及含量不同,其所提供的养分元素含量差异很大,故岩性对土壤肥力有较大影响^[6];而土壤的理化性质对植被的类型、生长态势具有关键作用,因此岩性控制着植被的生长变化情况。张志云等人研究土壤物理性质与杉木、马尾松生长关系后指出,不同母岩发育的土壤,其物理性质与林木生长相关性是有差异的^[7]。欧阳勋志等人研究认为成土岩石类型常常是决定森林稳定性和森林生产力的重要生态因子之一^[8]。因此岩石是影响森林立地质量的重要生态因子,岩性与区域植被类型的分布、植被的生长状况、植被覆盖度等都有着密切的联系。因此文章认为可以以不同岩性基底为统计单元,分析植被变化趋势的差异性及其影响因素,从而进一步理清喀斯特区域植被变化的规律。所以本文将贵州省近十年NDVI作为基础数据,以非喀斯特、亚喀斯特、纯喀斯特为统计单元,分析植被分布和变化趋势的差异性以及这种差异性的主导因素,以期从植被变化角度论证“纯喀斯特”与“亚喀斯特”的生态效应差异,进一步完善喀斯特发育理论并为岩溶区生态修复和可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况

贵州地处中国西南部,云贵高原东部(103°36′—109°35′E,24°37′—29°13′N)。属亚热带湿润季风气候区,气温和降水分布差异显著,西部威宁、水城等高海拔区域平均气温10.5℃,1月最低气温-1.6℃,年降水量为883.1 mm;中部、东部平均气温14.8℃,1月最低气温2.3℃,年降水量为1 200 mm。贵州属于喀斯特高原山区,地势西高东低,平均海拔1 100 m,山地和丘陵占区内总面积的92.5%,喀斯特面积占全

省国土面积的61.9%。喀斯特区域根据基础岩性可分为纯喀斯特(连续性灰岩、连续性白云岩、灰岩与白云岩互层)和亚喀斯特(含碎屑岩的灰岩和白岩、以及碳酸盐岩与非碳酸盐岩互层)。

2 研究数据与方法

2.1 NDVI 数据处理

本研究采用的NDVI数据为2000年1月—2013年12月SPOT VGT_NDVI数据,空间分辨率为1 000 m^[9],来源于全球SPOT_VGT NDVI数据免费分发网站(<http://www.vgt.vito.be>)。利用最大值合成方法(maximum value composition, MVC)将NDVI旬数据生成月NDVI。考虑到研究区植被类型包括常绿、落叶、针阔混交、草地等多种类型,为客观表达区域植被覆盖情况,将一年中12个月的NDVI取最大值^[10]。

2.2 气象数据处理

2000—2013年19个气象站的降水资料。气象站点选择时主要考虑均匀覆盖贵州省并且数据质量较高的站点。选择的站点中包括黔东南州2个、黔南州2个、铜仁市2个、遵义市4个、毕节市3个、贵阳市1个、安顺市2个、黔西南州和六盘水市3个,能够均匀覆盖贵州省各个区域;考虑到地形地貌对贵州省降水的影响,选择站点的时候保证站点对所处地貌区具有代表性,所以东部山地丘陵区(面积占全省18.5%)3个,中部丘原山地区(面积占全省65.7%)13个,西部高原山区(面积占全省15.8%)3个。文章对选择站点的数据质量进行了均一性验证。

2.3 方法

2.3.1 趋势法 趋势线是对一组随时间变化的变量进行回归分析,预测其变化的趋势。通过计算每个像元上14 a的NDVI值,用趋势线分析法模拟该像元NDVI的变化趋势,即植被覆盖的年际变化:

$$K = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

某像素点的趋势线是该像点 n 年的年NDVI最大值用一元线性回归模拟出来的一个总的变化趋势, K 即是这条趋势线的斜率。 $K > 0$,表示NDVI值在 n 年间的变化趋势是增加的,区域植被得到修复,反之表示植被退化^[11]。

2.3.2 变异系数 空间变异系数是衡量数据变异程度的统计量,可以很好地反映空间数据在时间序列上变化的差异程度,以变异系数 C_v 值来评价数据时间序列的稳定性。研究采用逐像元计算 C_v 系数,计算公式为:

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{\bar{X}} \quad (2)$$

式中： C_v 为变异系数； S 为样本序列标准差； \bar{X} 为样本序列平均值； X_i 为样本序列值； n 为样本序列长度。 C_v 值越大，表明数据分布越离散，NDVI 值年际变化越大；反之则表明数据分布较为紧凑，NDVI 值年际变化较小^[12]。

2.3.3 相关分析 对研究区 14 年 NDVI 数据与温度、降水量的空间插值数据进行逐像元相关分析；不同岩性基底上 NDVI 变化像元的比重与石漠化发生率进行相关分析。这样可以反映出气候因子与 NDVI 序列的相关程度和人为作用对不同岩性 NDVI 变化差异性的主导作用。相关系数计算公式：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中： x, y 表示两个要素的样本值； r_{xy} 表示要素 x 和 y 之间的相关系数^[11]。

3 结果与分析

3.1 不同岩性基底上植被 NDVI 的差异性分析

根据表 1 可以看出，不同岩性基底上的 NDVI 值存在一定的差异性。非喀斯特区域 NDVI 值为 0.6，喀斯特区域（纯喀斯特、亚喀斯特）NDVI 值在 0.52—0.55。喀斯特内部的纯喀斯特区域 NDVI 值与亚喀斯特区域相差不大，各类岩性 NDVI 值表现为：连续性白云岩=灰岩碎屑岩>连续性灰岩=灰岩白云岩互层>白云岩碎屑岩。

为分析不同岩性植被 NDVI 存在差异性的原因，分别计算不同岩性区 NDVI 与森林、灌丛、草地、农用地比重的相关系数。通过表 1 可以看出，非喀斯特区域生态性土地覆被面积（森林、灌丛、草地）占该岩性区总面积的 77%，远高于其他喀斯特岩性区；而裸地面积仅占 0.06%；喀斯特区域内部，各岩性 NDVI 值与森林、灌丛、草地、农用地的面积比重的相关关系分别为 0.91, 0.39, 0.51, -0.85，所以各岩性区内各种土地覆被类型的比重差异是造成植被 NDVI 值存在差异的主要原因，其中森林和农用地是贡献最大的两类。

3.2 不同岩性基底上植被 NDVI 值变化趋势分析

不同岩性基底上植被 NDVI 值的变异系数差异显著(图 1)。与喀斯特区域相比，非喀斯特区域轻度变异比重最大，中度和强度变异比重最小，说明非喀斯特区域 NDVI 值年际波动小。喀斯特区域各类岩性基底上，

植被 NDVI 变异系数都以中度为主，强度变异在各类岩性上的分布比重为：白云岩碎屑岩>灰岩碎屑岩>连续性灰岩>灰岩白云岩互层>连续性白云岩，其中尤以白云岩碎屑岩最为突出，达到 15.59%，远高于其他岩性，其次是灰岩碎屑岩，表明亚喀斯特区域植被 NDVI 值的年际波动大于纯喀斯特区域，可以进一步说明亚喀斯特区域生态环境对于干扰反映更敏感和迅速^[8]。

表 1 不同岩性区 NDVI 均值和土地覆被类型比重

岩性	NDVI	森林	灌丛	草地	农用地
连续性灰岩	0.54	23.77	29.53	18.77	26.04
连续性白云岩	0.55	30.75	23.42	15.35	27.77
灰岩白云岩互层	0.54	30.35	20.58	19.48	28.10
灰岩碎屑岩	0.55	29.38	17.97	19.83	30.54
白云岩碎屑岩	0.52	15.58	15.45	14.47	48.69
非喀斯特	0.6	49.40	9.82	17.70	21.12

研究区 NDVI 值的变化整体呈现轻度增加的趋势，不同岩性基底上植被 NDVI 值变化速率存在一定差异(图 2)。非喀斯特区域 NDVI 值的变化呈降低和不变趋势的比重分别占该岩性分布面积的 1.27%和 15.26%，远大于喀斯特区域，呈增加趋势的比重为 83.47%小于喀斯特区域。喀斯特区域内部，纯喀斯特区域与亚喀斯特区域 NDVI 值的变化速率都呈现出大范围增加趋势，但二者间差异不明显，呈增加趋势的像元占所在岩性区比重最大的为灰岩白云岩互层达到 95.59%，其次是白云岩碎屑岩、连续性灰岩、灰岩碎屑岩、连续性白云岩分别达到 95.17%，93.35%，92.95%，91.99%。

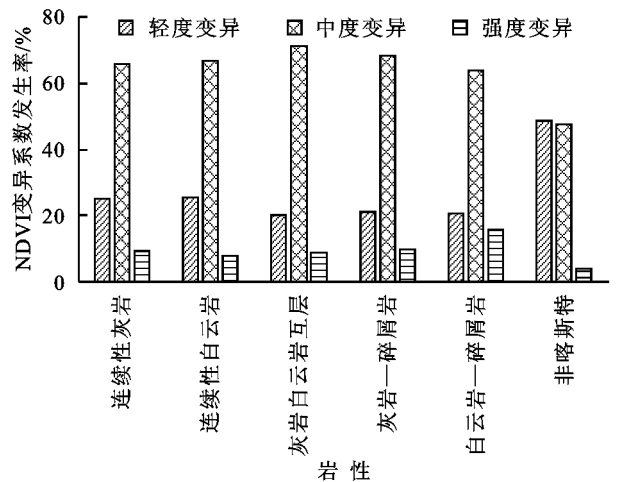


图 1 不同岩性区 NDVI 变异系数发生率

3.3 不同岩性基底上植被 NDVI 变化驱动分析

为系统的分析上述不同岩性基底上植被 NDVI 值的分布及变化趋势的原因，文章选取气候因子、2000 年和 2010 年土地利用以及石漠化数据分析不同岩性区的变化情况。

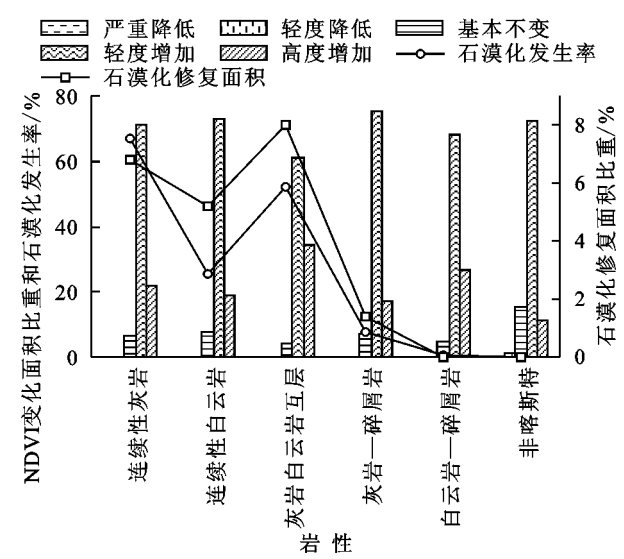


图 2 不同岩性区 NDVI 和石漠化变化情况

3.3.1 植被 NDVI 变化与气候变化关系分析 以研究区内所有像元(1 km×1 km)为分析样本,对 2000—2013 年 NDVI 值和年均温、年降水量插值数据进行逐像元相关分析,以 0.1 置信水平检验,相关系数绝对值大于 0.3 为相关,正负 0.3 之间为不相关。通过图 3 可以看出,各岩性基底上 NDVI 值与年降水量的相关性不强,不相关像元比重均超过 55%。对比各岩性上相关性的差异可以看出,连续性白云岩和灰岩碎屑岩分布区内 NDVI 值与年降水量呈负相关比重大于其他岩性;连续性灰岩、灰岩白云岩互层和非喀斯特区域 NDVI 值与年降水量呈正相关比重大。与年均温也未体现出显著的相关性,不相关的

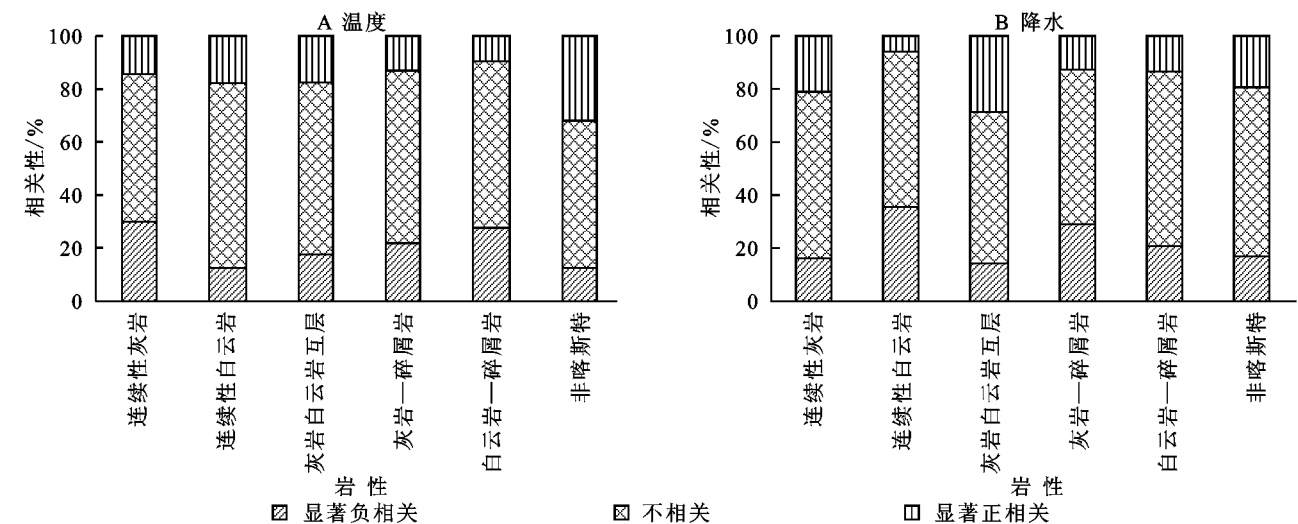


图 3 各岩性区 NDVI 与温度和降水相关性

为进一步说明人为作用对于不同岩性区 NDVI 值变化的影响,建立 2000—2010 年石漠化转移矩阵,将显著修复、轻度修复作为石漠化治理区域并统计各岩性区的分布数量(图 2,表 2)。发现连续性灰岩区轻度以上石漠化发生率最高达到 66.76%,治理面积

像元面积比重均超过 55%。各岩性分布区中,喀斯特区域的连续性灰岩呈负相关的比重明显大于正相关,其他岩性区随着碳酸盐岩比重的减少,负相关比重面积逐渐加大;非喀斯特区域显著正相关的比重大于负相关。综合对比可以看出,喀斯特区域不同岩性基底上 NDVI 变化对气候变化的响应未体现出明显的显著性和差异性,所以 10 a 的时间尺度上气候变化不是造成各岩性基底上 NDVI 变化差异的直接原因。

3.3.2 植被变化与人为作用的关系 在亚热带湿润地区脆弱的喀斯特生态环境下,由于人为的扰动导致土层变薄,土地生产力下降,地表逐渐形成荒漠化景观的土地退化过程,学术上称之为“石漠化”^[13]。所以人为作用是石漠化产生的直接因素,石漠化发生、演变可以直接反应出人类对于区域生态环境作用的影响程度。因此为研究喀斯特地区不同岩性基底 NDVI 变化与人为作用的关系,文章选用不同岩性基底石漠化发生率^[14]与 NDVI 值进行相关分析(图 2),结果显示:不同岩性基底上的石漠化发生率与 NDVI 值呈减少趋势的面积比重的相关系数为-0.93($\alpha < 0.001$),与 NDVI 值呈增加趋势的面积比重的相关系数为 0.89($\alpha < 0.005$)。说明石漠化越严重的岩性区 NDVI 值降低趋势越弱,增加趋势越明显。石漠化严重区域,生态环境极其脆弱,主要的生态功能为石漠化修复和土壤保持,区域内大范围采取退耕还林还草和工程治理等生态恢复措施,所以植被 NDVI 值增加趋势明显^[15]。

占该岩性区石漠化发生面积的 10.1%,连续性白云岩和灰岩白云岩互层石漠化发生率分别达到 25%和 52%,治理面积占发生总面积的比例分别为 20%和 15%。说明纯喀斯特地区,NDVI 值的变化与石漠化治理有很大关系,人为作用影响显著。值得注意的

是,亚喀斯特地区石漠化发生率明显低于纯喀斯特地区,灰岩碎屑岩分布区轻度以上石漠化面积占岩性区总面积的 7.95%,白云岩碎屑岩只占 0.53%,同时石漠化修复占石发生面积的 17%和 4%,但亚喀斯特区域 NDVI 值呈增长趋势的面积比重高达 92%和 95%,尤其是白云岩碎屑岩区域石漠化治理面积与 NDVI 值增长反差较大。通过分析不同岩性区各等级石漠化发生概率和 2000—2010 年土地利用转移矩阵可以看出,亚喀斯特的两个岩性区,潜在石漠化面积分别高达 91%和 98%,在退耕还林还草政策推动下,潜在石漠化区域内的不合理土地利用方式发生转换,灰岩碎屑岩和白云岩碎屑岩分布区内的农用地转为生态用地(森林、灌丛、草地)的面积占岩性分布区总面积比例分别达到 4%和 3.5%,土地利用发生转变但潜在石漠化等级没有发生变化,因此亚喀斯特区域 NDVI 值变化仍然是由于人为改变土地使用方式导致的。同时由于喀斯特区域潜在石漠化比重高、农用地分布广,因此具有较高的土地生产能力,但区域生态环境敏感性高,更易受到人为作用影响。

表 2 不同岩性区各石漠化等级面积占该岩性区面积比重 %

岩性	石漠化等级					
	极重度	重度	中度	轻度	潜在	无
连续性灰岩	1.51	11.38	36.77	17.10	32.43	0.80
连续性白云岩	0.00	0.03	6.18	19.52	73.93	0.35
灰岩白云岩互层	0.19	3.60	29.81	18.83	47.29	0.29
灰岩碎屑岩	0.01	0.08	0.89	6.97	91.35	0.70
白云岩碎屑岩	0.00	0.03	0.20	0.30	99.02	0.44
非喀斯特	—	—	—	—	—	—

4 结 论

(1) 不同岩性基底上植被 NDVI 值的差异表现为:非喀斯特>纯喀斯特≈亚喀斯特,这种差异性主要是由于不同岩性区地表覆被不同导致,其中主要受森林和农用地比重影响。

(2) 非喀斯特区域植被 NDVI 值略大于喀斯特地区,定量地证实了喀斯特区域较非喀斯特区域生态环境脆弱^[16]。喀斯特区域内部,虽然亚喀斯特区域特殊的地质环境导致溶洞、地下河等景观发育较弱,透水性相对较差,土层较厚,土壤质地黏重,土壤保水、保肥能力强于喀斯特区域^[3,17],但由于亚喀斯特区域的生态环境对人类活动的响应较为敏感,土地利用率更高,潜在石漠化和农用地比重较高,因此导致植被 NDVI 值在纯喀斯特区域和亚喀斯特区域的差异不显著。

(3) 不同岩性基底上植被 NDVI 值的变异系数

和变化速率存在一定差异:各岩性区轻度以上变异的比重:非喀斯特<纯喀斯特<亚喀斯特;变化速率呈增加趋势的像元比重:纯喀斯特>亚喀斯特>非喀斯特,减少趋势分布相反。

(4) 喀斯特区域不同岩性基底上 NDVI 变化对气候变化的响应不显著,所以 10 年时间尺度上气候变化不是造成各岩性基底上 NDVI 值分布和变化差异的直接原因。

(5) 10 a 时间尺度上,不同岩性基底上植被 NDVI 值变化的差异性主要是由人为作用导致。这种差异在亚喀斯特区域表现明显,由于亚喀斯特是一种过渡地貌形态,岩石含非碳酸质成分较高,溶蚀速率较典型喀斯特地区慢,土层较厚^[17],植被覆盖度和第一生产力都优于纯喀斯特地区,土地利用程度较高^[3]。导致该区域植被 NDVI 年际波动大于纯喀斯特和非喀斯特区域,但在退耕还林换草等生态修复措施实施下,亚喀斯特区域的潜在石漠化分布区上的不合理利用土地大面积转化,NDVI 值快速提高。因此可以进一步说明亚喀斯特区域更易受到人为作用的干扰,应作为重点生态保护区域。

在一定气候背景下,由于不同的岩性基底提供的矿物成分不同,导致发育的土壤类型存在差异,影响植被的分布与生长状况;而不同的植被类型对于自然条件变化及人类活动影响的响应模式存在差异,最终表现为不同岩性基底上植被 NDVI 值的分布和变化规律存在显著差异。文章以不同岩性基底为背景讨论了植被 NDVI 值的分布、变化以及对气候变化和人类作用的响应机制,从 NDVI 定量化的角度证明亚喀斯特区域的生态效应。证实十年时间尺度上,人为作用是对植被变化起关键性和决定性作用的因素。更进一步阐明“亚喀斯特”区域的生态敏感性较强,与纯喀斯特区域相比,更易受到人为因素干扰。因此虽然在林业建设、农业建设以及综合生态产业发展等方面,亚喀斯特都具有较强的环境基础优势,区域产业发展前景更为广阔^[3],但喀斯特区域发展过程中更应对其进行重点生态保护,以维护区域整体生态安全。

参考文献:

[1] Sweeting M M. Karst in China:it s geomorphology and environment[M]. New York:Springer, 1995.
[2] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究,1990,2(1):21-29.
[3] 许璟,安裕伦,胡锋,等. 基于植被覆盖与生产力视角的亚喀斯特区域生态环境特征研究:以黔中部分地区为例[J]. 地理研究,2015,34(4):644-654.

业,优化农业产业与资源系统链网结构,实现农业产业与农业资源良性互动。

通过对县南沟流域农业产业—资源系统链网结构的变化过程及组成的分析,可以明确农业产业—资源系统链网结构的表征体系,即通过资源环境、农业资源、农业产业、经济效益表征农业产业—资源系统链网结构,为实现对系统发展状态的定量研究和评价奠定基础。

参考文献:

- [1] 王继军,谢永生,卢宗凡,等. 退耕还林还草下生态农业发展模式初探[J]. 水土保持学报,2004,18(1):134-137.
- [2] 卢宗凡,梁一民,刘国彬. 中国黄土高原生态农业[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [3] 王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态经济系统耦合过程分析[J]. 应用生态学报,2009,20(11):2723-2729.
- [4] 高旺盛,董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价:以安塞县为例[J]. 自然资源学报,2003,18(2):182-188.
- [5] 蒋舟文,姜志德. 西北地区农业结构与资源环境协调发展水平分析[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2008(2):25-29.
- [6] 梁红梅,刘卫东,林育欣,等. 土地利用效益的耦合模型及其应用[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2008,34(2):230-236.
- [7] 王继军,姜志德,连坡,等. 70年来陕西省纸坊沟流域农业生态经济系统耦合态势[J]. 生态学报,2009,29(9):5130-5137.
- [8] 虎陈霞,傅伯杰,陈利顶. 黄土丘陵区农业生态经济系统耦合态势[J]. 生态学报,2009,29(9):5130-5137.
- [9] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. 1997,25(1):3-14.
- [10] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [11] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [12] 顾文. 基于 CDM 的县南沟流域商品型生态农业系统优化结构研究[D]. 陕西杨凌:水土保持与生态环境研究中心,2014.
- [13] 齐元静,杨宇,金凤君. 中国经济发展阶段及其时空格局演变特征[J]. 地理学报,2013,68(4):517-531.
- [14] 王正淑,王继军,刘佳. 退耕地林草植被碳汇及与农业生态经济系统的关系:以陕西省县南沟流域为例[J]. 草地学报,2016,24(2):263-269.
- [15] 李芬,王继军. 黄土丘陵区纸坊沟流域近 70 年农业生态安全评价[J]. 生态学报,2008,28(5):2380-2388.
- [16] 夏自兰,王继军. 基于水土保持下的纸坊沟流域农业产业—资源系统耦合效应评价[J]. 自然资源学报,2011,26(10):1647-1657.
- [17] 张楠,王继军,崔绍芳,等. 黄土丘陵区退耕林生态系统服务价值评估:以陕西省安塞县为例[J]. 水土保持研究,2013,20(2):176-180.
- [18] 任春燕,王继军. 黄土丘陵区农业生态经济效益评价指标体系的构建[J]. 水土保持通报,2009,29(1):155-159.

(上接第 206 页)

- [4] 李阳兵,王世杰,李瑞玲. 岩溶生态系统的土壤[J]. 生态环境,2004,13(3):434-438.
- [5] 袁道先. 论岩溶环境系统[J]. 中国岩溶,1988,7(3):179-186.
- [6] 杨珊,何寻阳,苏以荣,等. 岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1596-1602.
- [7] 张志云,蔡学林,黎祖尧. 土壤物理性质与林木生长关系的研究[J]. 江西农业大学学报,1992,14(6):64-68.
- [8] 欧阳勋志,张志云,蔡学林. 岩性、地形、土壤与林木生长关系[J]. 江西农业大学学报,2009,19(6):146-151.
- [9] Maisongrande P, Duchemin B, Dedieu G. VEGETATION/SPOT: An operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004,25(1):9-14.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome:FAO Irrigation and Drainage Paper56,1998.
- [11] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:93-94.
- [12] 夏军,欧春平. 基于 GIS 和差异信息测度的海河利于水温要素时空变异性分析[J]. 自然资源学报,2007,22(3):409-416.
- [13] 屠玉麟. 贵州土地石漠化现状及原因分析[M]//李菁. 石灰岩地区开发与治理. 贵阳:贵州人民出版社,1996.
- [14] 李瑞玲,王世杰,周德全,等. 贵州岩溶地区土地石漠化与岩性的相关分析[J]. 地理学报,2003,58(2):314-320.
- [15] 熊康宁,陈起伟. 基于生态综合治理的石漠化演变规律与趋势讨论[J]. 中国岩溶,2010,29(3):267-273.
- [16] 兰安军,张百平,熊康宁,等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. 地理研究,2003,22(6):733-740.
- [17] 胡锋,安裕伦,许璟. “亚喀斯特”概念与景观特征的初步探讨:以贵州为例[J]. 地理研究,2015,34(8):1569-1580.