

The Review of Current Distribution of Vegetation Resources in Yunnan-Guizhou Plateau and the Mechanism Research of Its Effects on Rocky Desertification Process

Xirui Ruan*, Bentian Mo*, Peijie Ma, Leilei Ding, Wen Zhang, Wei Chen, Xia Lei, Fang Sun, Zhiwei Wang

Guizhou Institute of Prataculture, Academy of Agricultural Sciences of Guizhou Province, Guiyang Guizhou
Email: *nsayn@qq.com, *gzcymbt163@sohu.com

Received: Sep. 30th, 2017; accepted: Oct. 19th, 2017; published: Oct. 31st, 2017

Abstract

Yunnan-Guizhou Plateau is the core area of the rocky desertification in the Chinese southwest karst regions. Previous studies are very limited to describe the process of rocky desertification quantitatively. The vegetation resources are applied as the key indicators to quantitatively study the degree of rocky desertification by many researchers. With the remote sensing datasets, previous methods are not competent to distinguish the detailed information of vegetation type, coverage and patch fragmentation on a large scale. Our previous researches show that the technology of unmanned aerial vehicle and the estimation software of fraction vegetation coverages and patches could be accurately and rapidly to exploit vegetation resource information. In this project, current distribution of vegetation resources in Yunnan-Guizhou Plateau will be clarified to reveal the influence mechanism of the rocky desertification. The control factors of rocky desertification distribution and the driving reasons of its dynamic changes will be explained by the data of terrain, climate, population, economics and policy. In this way, current distribution of vegetation resources in Yunnan-Guizhou Plateau will be provided, especially the grassland resources will be updated. The finding of this research may have significant implications for resolving rocky desertification. Furthermore, the results of this study will be the background information for the programs of restoring ecological environment and enriching local people in Yunnan-Guizhou Plateau.

Keywords

Natural Grassland, Artificial Grassland, Soil Degradation, Vegetation Restoration, Grass-Farmland Interface

*通讯作者。

云贵高原植被资源分布现状及其对石漠化进程研究进展

阮玺睿*, 莫本田*, 马培杰, 丁磊磊, 张 文, 陈 伟, 雷 霞, 孙 方, 王志伟

贵州省农业科学院草业研究所, 贵州 贵阳

Email: nsayn@qq.com, gzcymbt163@sohu.com

收稿日期: 2017年9月30日; 录用日期: 2017年10月19日; 发布日期: 2017年10月31日

摘 要

云贵高原是西南喀斯特石漠化的核心区域, 现有研究存在难以定量描述石漠化进程这一关键科学问题的缺陷。因此许多学者采用植被资源作为定量化描述石漠化危害程度的重要指标, 早期的方法仅使用遥感影像难以准确区分大范围的植被类型、覆盖度和斑块破碎度等精细信息。前期研究表明, 利用当前日益成熟的无人机技术和研究成员早期开发的盖度、斑块估算软件, 结合多源遥感数据, 可以准确、快速地反演植被资源信息。在云贵高原研究植被资源信息的空间分布现状, 阐明其对石漠化进程的影响机制, 通过对地形、气候、人口、经济和政策资料进行分析, 揭示导致石漠化时空分布格局差异的控制因子及其动态变化的驱动因素。可望摸清云贵高原的植被资源分布现状, 特别是实现对草地资源的更新, 不仅为解决石漠化这一严重地域环境问题提供研究基础和科学依据, 也为山地草牧业修复云贵高原生态环境、提高当地人民收入的规划提供宝贵的本底资料。

关键词

天然草地, 人工草地, 土壤退化, 植被恢复, 草地 - 农田界面

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国西南喀斯特地区是世界上面积最大的喀斯特连续带, 包括云南、贵州、广西、广东、湖南、湖北、重庆和四川 8 个省, 面积超过 $0.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ [1]。喀斯特地貌特征不同于其他地貌类型, 具有土层浅薄、土被不连续、岩石裸露率高、土壤富钙而偏碱性的特点[1]。同时, 该区域大量的碳酸盐岩渗透性很强, 导致其持水能力低, 特别是近一个世纪以来人类活动干扰频繁, 造成喀斯特地区的生态系统发生大面积退化, 乃至在许多地方形成了石漠化的自然现象[2]。其中, 云贵高原的石漠化分布最为广泛、最为集中, 其石漠化程度也最为强烈[3]。作为喀斯特地区土壤侵蚀的终极状态, 石漠化正逐渐演变为继北方沙漠化和黄土高原地区水土流失后的中国第三大土地退化问题[4]。石漠化发生后, 因土地缺少植被而不能有效地涵养水源, 导致水土资源不断流失, 还会引发洪涝、滑坡、泥石流等多种地质灾害, 进而动摇农业生产和生态环境基础, 造成人畜饮水困难, 威胁到居民的生命财产安全[5]。因此, 需要加强对云贵

高原地区石漠化发展动态监测研究, 揭示该区域生态退化的主导因子, 从而提出因地制宜的应对措施。

2. 综述

地表植被的退化与丧失是石漠化过程中最为直观和敏感的现象[5], 被认为是反映生态环境变化的敏感指示器[6] [7]。植被是陆地生态系统的主体, 为人类的生存和发展提供重要的物质基础, 对植被资源的有效监测是研究陆地生态系统健康程度的重要途径。因此, 合理选择反映植被变化状况的指标, 可以有效地阐明石漠化动态变化规律和影响机制。植被类型划分(简称植被分类)是研究植被资源空间分布现状的一种直观方法, 也是植被资源监测体系中的基础和关键环节[8]。植被分类不仅关系到不同植物生长的面积、空间位置和群落组成结构等定性监测指标精度, 同样还直接作用到植被的生物量、生态恢复能力和生态服务功能等多种定量研究的精度[9]。植被盖度是植株叶、茎、枝等绿色植物部分垂直投影面积占整个统计面积的百分比, 是探测陆地表面植被生长状况的一个重要指标[10], 能够定量化的反映生态系统的现状和区域生态环境的动态变化[11]。同时, 借助卫星遥感数据可以对植被盖度进行大面积、实时、精准地反演[10]。斑块的破碎化是人类活动或环境变化共同作用, 造成的一种植被形态破碎化和生态功能破碎化现象[12]。石漠化程度越严重, 植被的破碎化程度越明显。在石漠化的研究中, 植被破碎度也可以同植被覆盖度[13]一样, 作为划分石漠化强度等级的一项重要指标。

当前模拟植被类型和计算植被盖度、斑块破碎度的方法主要包括野外植被调查和遥感解译方法。野外调查方法存在显著的时空异质性, 因此较难应用到区域尺度的植被覆盖度评估中[14]。遥感影像在解译植被盖度时主要是利用高分辨率遥感影像(High Spatial Resolution Imagery, HSRI)来实现高精度的反演[14] [15]。但是, 高分影像不仅价格昂贵、覆盖范围小, 同时还极大的受制于天气状况, 特别是在晴天较少的云贵高原区域。因此, 急切需要一种方法, 使野外调查的结果能够更加合理、有效地反映粗分辨率遥感影像在像元尺度上的实际状况。当前, 日益成熟的无人机技术(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)正是解决这一现状的有效方法。一方面, 无人机航拍相片可以作为一种廉价、快速, 采集时间可以人为操作的“高分影像替代品”, 有效反演植被盖度; 另一方面, 相比传统地面调查中 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方框, 航拍相片也是一种大面积的地面调查方法, “样方”可以设置为几米乃至几十米、几百米, 在尺度上恰好匹配各类遥感影像像元的空间分辨率(Spatial Resolution, SR), 相比传统的“样方”法对像元具有更好的表达性。

目前, 针对植被与石漠化的关系及其动态变化已受到了众多学者关注[5] [11] [16]。然而在喀斯特地区云贵高原利用无人机航拍技术, 针对精细植被资源分布现状及其对石漠化进程影响的研究尚属空白。因此, 利用精细植被资源分布信息揭示植被动态变化, 并分析其对石漠化进程的作用机制, 具有以下三方面的重要意义:

1) 拓宽了遥感研究的方法。本研究试图利用无人机航拍弥补样方无法准确表达像元实际状况的问题, 率先开展喀斯特地区石漠化区域无人机方法反演植被类型和盖度、斑块破碎度的研究。

2) 本研究产出的喀斯特地区植被资源空间信息(主要包括植被分类、盖度和斑块破碎度), 为喀斯特地区石漠化区域植被现状监测提供实时、可更新的研究方法, 进而科学、有效地分析植被变化对石漠化进程的作用。

3) 本项目获取的云贵高原植被资源信息, 特别是对草地资源的更新, 可以为“既要青山绿水, 又要金山银山”的重要举措提供宝贵的本底资料, 既保护生态环境, 又满足人民的生产、生活需求。

3. 反演方法研究

3.1. 植被类型分类研究

早期对植被类型的划分主要是利用人工方法进行实地调查。不过, 自然界的植被类型繁多, 其生长

环境状况又复杂多样,仅依靠传统方法完成植被分类,需要耗费大量人力和物力,而且许多环境恶劣及交通不便的区域又是人类难以到达的[17]。近年来随着遥感、地理信息系统和全球定位系统的发展,基于遥感影像的植被分类经历了目视解译、监督分类与非监督分类、人工神经网络、模糊数学、专家系统分类、决策树和面向对象等发展阶段,这些技术方法都为当今的植被制图提供了一种全新的途径[18]。当今,决策树分类的方法因其灵活性和快速性的优点在植被分类中较为常用[19],将重庆市区东北部的渝北区(面积为 1452 km²)分为水体、建设用地、林地、草地、耕地五种类型,其最优分类结果总精度为 88.42%,Kappa 系数为 0.8547; [20]在青藏高原的温泉地区(面积约为 1000 km²)划分植被类型为高寒草甸、高寒草原、高寒灌丛、高寒沼泽草甸和非植被五种类型,分类结果总精度为 72%,Kappa 系数为 0.6。

全球模型对青藏高原多年冻土区植被类型分布的模拟结果很多[21]。植被分布状况多来源于植被模型,如基于生物地理学的 BIOME1 [22],基于生物地球化学的 TEM [23]和 CENTURY [24],耦合二者的 MAPSS [25]、BIOME3 [26]和 BIOME4 [27],以及基于生态系统过程的动态模型 IBIS [28]和 LPJ [29],此外还有任继周依据水、热的客观过程提出的综合顺序分类法[30]等。同时,各种土地利用分类产品也被广泛应用于有关植被类型的研究中[31] [32],如 MODIS 的 MCD12 产品。还有一种是根据野外调查和多种资料汇总后绘制植被类型图的方法[33]。

现有针对云贵高原植被类型制图的结果较少,早期的研究多是从全国植被类型图中提取[34],该结果完成于 2000 年以前,因此迫切需要更新云贵高原的植被类型分布状况。

3.2. 植被盖度估算研究

植被盖度是衡量地表植被状况的综合量化参数,而且也是描述生态系统的基本指标,在对区域生态系统的研究中极为关键[35] [36]。该参数广泛应用于有关植被退化的荒漠化研究中[37] [38]。

最早的植被盖度研究方法是野外植被调查,早在 20 世纪 70 年代初就有科学家系统的提出了植被盖度地面调查法。之后[39]使用数码相机(Digital Camera, DC)获取彩色数字影像计算植被盖度,借助一些图像处理软件(如 Photoshop、ArcGIS、ENVI 和 ERDAS 等),使植被盖度的计算变得更加简单、快速,也更加准确[40]。虽然通过数码相机法计算植被盖度比传统植被调查更加方便、准确,不过该方法局限于小区域的研究,对大区域乃至全球尺度的植被盖度进行监测时却需要借助遥感影像完成。利用遥感影像研究植被盖度的机理是因为植被和其他地物类型在可见光和近红外波段内存在明显的反射率差异[41]。一般而言,利用遥感影像反演植被盖度的方法主要包括经验法(Empirical Methods, EM)和植被指数法(Vegetation Index, VI)。例如,在半酸性土壤区[42],使用 Landsat TM 5 资料估算了植被盖度;在蒙古和日本[39],通过 4 种线性回归模型拟合了植被盖度;此外[43],利用 ERS-2 的 ATSR-2 (Along Track Scanning Radiometer, ATSR)数据的 4 个波段(555 nm、670 nm、870 nm 和 1630 nm)构建了线性回归关系研究植被盖度与叶面积指数之间的关系,并指出利用 4 个波段的线性混合模型估算植被盖度比简单的植被指数更有效。以上几种经验法极大地依赖特定区域的野外调查数据,而且植被盖度的反演结果在某一个特定的小区域内具有较高精度,但是当将其应用于其他地区或者大区域监测植被状况时会存在许多限制,导致其准确率下降。植被指数法主要是建立植被盖度同各种植被指数之间的关系,最终用以反演研究区的植被盖度。现有的植被指数不少于 40 种,例如,归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、垂直植被指数(Perpendicular Vegetation Index, PVI)、土壤调节植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)等,所有的这些植被指数都在生态、环境和农业等领域中有着广泛的应用[44] [45] [46]。相比经验法,植被指数法是一种更符合实际状况的算法,而且在大区域尺度进行反演时并不需要借助地面调查资料。同时,一旦有大量的野外调查数据作为支持,植被指数法就能够作为一种可以推广到更多地区的通用方法反演植被盖度。尽管如此,在特定的区域植被指数法的准

确率要低于经验法,因为植被盖度同植被指数之间的关系依然难以精确量化。

因此,不得不寻求一种新的方法,既能保证野外调查的样本数量,又能通过样本合理的表达像元内植被的实际分布状况。近年来,无人机技术正因兼具以上两项研究需求,在生态、环境、地质等工作领域得到广泛应用[47][48][49]。该技术不仅能够有效的提供大量野外调查样本数据,又能全面展现遥感影像中像元所包含的地表下垫面特征。

3.3. 植被斑块破碎化研究

植被破碎化是植被中各物种之间的空间联系断裂或连接性减少的现象[50]。不同斑块具有不同的性状、面积大小和数量差异,这些性质会显著影响水分、物质、能量和养分在斑块系统中的分布[51]。斑块破碎化是由于人为因素或环境变化而导致景观中面积较大的自然栖息地不断被分隔或生态功能降低而形成的[52],其严重程度由气候[53]、动物[54]或人类活动[52]的多种因素作用所决定。植被斑块的破碎化会引起斑块性状、数目,以及内生环境 3 个方面的变化,严重时不仅会造成外来物种入侵、降低生物多样性、改变生态系统结构,还会影响植被系统的稳定性,减弱生态系统的干扰阻抗与恢复能力[55]。

喀斯特石漠化区域,由于人类不合理活动的干扰,加剧了脆弱岩溶山区的石漠化进程[56]。在山地条件限制下,人为干扰越来越多的影响到环境,使得石漠化斑块日益扩张[57]。利用植被斑块指标来认知石漠化的成因,可以揭示岩溶景观格局特征与植被之间的关系,还可以合理调节岩溶山区的人地关系从而规范未来人类行为[57]。

3.4. 石漠化空间格局及成因研究

石漠化指在湿润、亚湿润气候环境和喀斯特地质环境的基础上,受人类社会经济活动的干扰破坏和气候变化因素的叠加影响,造成植被减少,水土流失状况严重,基岩大面积裸露,土地生产力丧失,形成的类似石质荒漠景观[5]。喀斯特地貌类型覆盖全球面积的 10%左右[14],其脆弱的生态环境已成为当前学术界的研究热点[58]。大量的研究在欧洲地中海盆地[59]和第纳尔喀斯特[60]展开,此外在伯利兹、危地马拉、墨西哥、以色列和琉球群岛也有相关研究进行[58]。

目前,国内的工作主要从环境地质、地理地貌、地表作用过程及人地关系等角度展开对喀斯特石漠化的研究,并尝试揭示其演化的驱动机制[4][61]。有关石漠化空间格局的研究主要通过遥感影像和地面调查资料结合,提取石漠化分布现状,然后通过统计方法分析石漠化的驱动机制[62]。在贵州喀斯特地区将石漠化划分为 6 个等级[63]。利用相关分析、因子分析及多元回归分析方法反演了广西的石漠化状况。中国地质科学院岩溶地质研究所于 2003~2005 年利用遥感技术探查了西南地区石漠化分布现状。国家林业局于 2004~2005 年采用地面调查与遥感技术相结合、以地面调查为主的技术方法,摸清了西南喀斯特石漠化的分布状况[64]。探讨了粤北典型岩溶山区的土地石漠化类型变化及其景观格局时空动态特征[65]。利用 3 期石漠化数据(1986、1995、2000 年),借助空间分析和转移矩阵方法,评价了贵州省石漠化的时空演变过程[66]。在广西大化县利用线性光谱分离方法和高光谱影像对不同石漠化程度区域的面积进行了反演。

在石漠化驱动机制的定量研究方面,针对自然因素的定量化研究发展较快,通过统计不同岩性、不同坡度等级和不同地貌类型中各级石漠化强度所占的比重,来定量描述自然因素对石漠化的影响[62][63];相比之下,人文因素方面的定量化研究则一直比较薄弱,主要是按照行政单元采集人文影响因子,通过统计学分析方法来研究石漠化与人文因素的关系[62][63];不过,也有一部分研究从人地关系的角度探讨喀斯特地区环境退化问题,系统研究了土地利用/土地覆盖状况对土壤侵蚀、土地退化及生态重建的影响[4][67][68]。在长顺县揭示了人类活动对石漠化程度的驱动作用,得出结论在 2000~2010 年期间,人类

活动减缓了石漠化进程,并提出一种可以有效的定量计算人类活动对石漠化影响的模型(SOI) [1]。分析西南 8 个省 153 个气象站点温度和降水数据后指出气候对石漠化进程的作用同样不容忽视[14]。得出相似的结论,气候变化对喀斯特区域产生的退化作用明显大于非喀斯特区域。

4. 结论与展望

石漠化的进程直接关系到我国西南众多人口的生活、生产,因此近年来国家颁布了多种石漠化治理政策。通过“退耕还林还草”、“坡耕地整治”、“生态扶贫”、“天保”、“石漠化综合治理”等以植被恢复为主的宏观生态工程的实施,涌现出了广西环江和马山、贵州毕节和贞丰、湖南龙山和永州等一些成功的石漠化治理模式,石漠化治理与生态恢复初见成效[69]。不过,虽然人类活动的作用对石漠化进行了一定程度遏制,但是近年来因气候变化频繁引发干旱和粮食减产,越来越大地影响到石漠化治理进程[58]。

综上所述,云贵高原地区作为一个石漠化灾害频发的区域,亟需保障其生态安全,目前利用无人机技术精准监测生态系统中重要组成部分植被资源的动态变化研究极度缺乏,直接制约着我们对云贵高原地区尤其是气候变暖背景下植被资源和石漠化主导因素的准确提取。因此,通过精准的方法和技术手段反演植被类型、盖度和斑块破碎度,并结合多源遥感时间序列资料,揭示云贵高原植被资源分布和动态变化规律是本项目的核心内容;确定植被资源对石漠化进程的作用程度是本项目迫切需要解决的关键科学问题,也是本项目研究所面临的关键技术难题。由此可见,本项目研究对科学认识云贵高原植被资源现状和石漠化动态变化具有重要的科学理论依据和现实意义。

参考文献 (References)

- [1] Liu, B., Chen, C., Lian, Y., Chen, J. and Chen, X. (2015) Long-Term Change of Wet and Dry Climatic Conditions in the Southwest Karst Area of China. *Global Planet Change*, **127**, 1-11.
- [2] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理[J]. 植物生态学报 2011, 10: 991-999.
- [3] 薛治国, 陈许, 李晓娜, 王仙攀. 云贵高原石漠化与古气候演变分析[J]. 安徽农业科学 2010, 23(38): 12303-12305.
- [4] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望[J]. 地理科学进展 2014, 01 (33):76-84.
- [5] 马华, 王云琦, 王力, 王益坤. 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[J]. 山地学报 2014, 1(32): 38-45.
- [6] Wang, Z., Wang, Q., Wu, X., Zhao, L., Yue, G., Nan, Z., Wang, P., Yi, S., Zou, D., Qin, Y., *et al.* (2017) Vegetation Changes in the Permafrost Regions of the Qinghai-Tibetan Plateau from 1982-2012: Different Responses Related to Geographical Locations and Vegetation Types in High-Altitude Areas. *PLOS ONE*, **1**, e0169732. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169732>
- [7] 陈君颖, 田庆久. 高分辨率遥感植被分类研究[J]. 遥感学报, 2007, 2(11): 221-227.
- [8] 刘旭升, 张晓丽. 森林植被遥感分类研究进展与对策[J]. 林业资源管理 2004, 1: 61-64.
- [9] Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D. and Liu, M. (2002) Characterization of Forest Types in Northeastern China, Using Multi-Temporal SPOT-4 VEGETATION Sensor Data. *Remote Sensing of Environment*, **2**, 335-348.
- [10] Jia, K., Liang, S., Gu, X., Baret, F. and Wei, X. (2016) Fractional Vegetation Cover Estimation Algorithm for Chinese GF-1 Wide Field View Data. *Remote Sensing of Environment*, **177**, 184-191.
- [11] 李丽, 童立强, 李小慧. 基于植被覆盖度的石漠化遥感信息提取方法研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 2: 59-62.
- [12] Forman (1995) *Land Mosaic: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [13] 黄秋昊, 蔡运龙, 王秀春. 我国西南部喀斯特地区石漠化研究进展[J]. 自然灾害学报, 2007, 2(16): 106-111.
- [14] Liu, M., Xu, X., Wang, D., Sun, A.Y. and Wang, K. (2016) Karst Catchments Exhibited Higher Degradation Stress from Climate Change than the Non-Karst Catchments in Southwest China: An Ecohydrological Perspective. *Journal of Hydrology*, No. 535, 173-180.

- [15] Bartholomeus, H., Kooistra, L., Stevens, A., Leeuwen, M.V. and Wesemael, B.V. (2011) Soil Organic Carbon Mapping of Partially Vegetated Agricultural Fields with Imaging Spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation*, **13**, 81-88.
- [16] 徐圣旺, 孙凡, 姚小华, 何丙辉, 任华东, 李生. 滇东喀斯特地区季节性石漠化与植被盖度的动态关系研究[J]. 水土保持学报, 2010, 1(24): 128-133.
- [17] Wang, Z.W., Wang, Q., Zhao, L., Xiao-Dong, W.U. and Yue, G.Y. (2016) Mapping the Vegetation Distribution of the Permafrost Zone on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, **13**, 1035-1046.
- [18] 王志伟, 史健宗, 岳广阳, 赵林, 南卓铜, 吴晓东, 乔永平, 吴通华, 邹德福. 玉树地区融合决策树方法的面向对象植被分类[J]. 草业学报, 2013, 5(22): 62-71.
- [19] 翁中银, 何政伟, 于欢. 基于决策树分类的地表覆盖遥感信息提取[J]. 地理空间信息, 2012, 2(10): 110-112.
- [20] 张秀敏, 盛煜, 南卓铜, 赵林, 周国英, 岳广阳. 基于决策树方法的青藏高原温泉区域高寒草地植被分类研究[J]. 草业科学, 2011, 12: 2074-2083.
- [21] Ni, J. (2000) A Simulation of Biomes on the Tibetan Plateau and Their Responses to Global Climate Change. *Mountain Research and Development*, **20**, 80-89. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0080:ASOBOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0080:ASOBOT]2.0.CO;2)
- [22] Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A. and Solomon, A.M. (1992) Special Paper: A Global Biome Model Based on Plant Physiology and Dominance. *Soil Properties and Climate*, **2**, 117-134.
- [23] Melillo, J.M., McGuire, A.D., Kicklighter, D.W., Moore, B. and Vorosmarty, C.J. (1993) Global Climate Change and Terrestrial Net Primary Production. *Nature*, **363**, 234-240. <https://doi.org/10.1038/363234a0>
- [24] Parton, W.J., Scurlock, J., Ojima, D.S., Gilmanov, T.G. and Scholes, R.J. (1993) Observations and Modeling of Biomass and Soil Organic Matter Dynamics for the Grassland Biome Worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**, 785-809. <https://doi.org/10.1029/93GB02042>
- [25] Neilson, R.P. and Marks, D. (1994) A Global Perspective of Regional Vegetation and Hydrologic Sensitivities from Climatic Change. *Journal of Vegetation Science*. <https://doi.org/10.2307/3235885>
- [26] Haxeltine, A. and Prentice, I.C. (1996) BIOME3: An Equilibrium Terrestrial Biosphere Model Based on Ecophysiological Constraints, Resource Availability, and Competition among Plant Functional Types. *Global Biogeochemical Cycles*, **4**, 693-709. <https://doi.org/10.1029/96GB02344>
- [27] Kaplan, J.O. (2003) Climate Change and Arctic Ecosystems: 2. Modeling, Paleodata-Model Comparisons, and Future Projections. *Journal of Geophysical Research*, **D19**, 8171. <https://doi.org/10.1029/2002JD002559>
- [28] Foley, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S. and Haxeltine, A. (1996) An Integrated Biosphere Model of Land Surface Processes, Terrestrial Carbon Balance, and Vegetation Dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, **4**, 603-628. <https://doi.org/10.1029/96GB02692>
- [29] Sitch, S., Huntingford, C., Gedney, N., Levy, P.E., Lomas, M., Piao, S.L., Betts, R., Ciais, P., Cox, P., Friedlingstein, P., et al. (2008) Evaluation of the Terrestrial Carbon Cycle, Future Plant Geography and Climate-Carbon Cycle Feedbacks using Five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology*, **9**, 2015-2039.
- [30] 梁天刚, 冯琦琨, 黄晓东, 任继周. 草原综合顺序分类系统研究进展[J]. 草业学报, 2011, 5: 252-258.
- [31] 杨依天, 郑度, 张雪芹, 刘羽. 1980-2010 年和田绿洲土地利用变化空间耦合及其环境效应[J]. 地理学报, 2013, 6(68): 813-824.
- [32] 张景华, 封志明, 姜鲁光. 土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J]. 资源科学, 2011, 6(33): 1195-1203.
- [33] 张翠萍, 牛建明, 董建军, 刘朋涛, 李秀萍, 贾晋峰. 植被制图的发展与现状[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, S2(44): 245-249.
- [34] 王志伟, 王茜, 李世歌, 王普昶, 刘秀峰, 谢彩云, 史健宗, 吴佳海, 王小利, 陆瑞霞, 等. 贵州喀斯特近 30 年植被生长特征分析[J]. 草业科学, 2016, 11: 2180-2188.
- [35] Zhang, C., Lu, D., Chen, X., Zhang, Y., Maisupova, B. and Tao, Y. (2016) The Spatiotemporal Patterns of Vegetation Coverage and Biomass of the Temperate Deserts in Central Asia and Their Relationships with Climate Controls. *Remote Sensing of Environment*, No. 175, 271-281.
- [36] Roberts, D.A., Dennison, P.E., Roth, K.L., Dudley, K. and Hulley, G. (2015) Relationships between Dominant Plant Species, Fractional Cover and Land Surface Temperature in a Mediterranean Ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, No. 167, 152-167.
- [37] Jiapaer, G., Chen, X. and Bao, A. (2011) A Comparison of Methods for Estimating Fractional Vegetation Cover in Arid Regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**, 1698-1710.
- [38] Wen, Z.M., Lees, B.G., Feng, J., Lei, W.N. and Shi, H.J. (2010) Stratified Vegetation Cover Index: A New Way to Assess Vegetation Impact on Soil Erosion. *Catena*, **83**, 87-93.

- [39] Purevdorj, T., Tateishi, R., Ishiyama, T. and Honda, Y. (1998) Relationships between Percent Vegetation Cover and Vegetation Indices. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 3519-3535.
<https://doi.org/10.1080/014311698213795>
- [40] Zhang, X., Liao, C., Li, J. and Sun, Q. (2013) Fractional Vegetation Cover Estimation in Arid and Semi-Arid Environments using HJ-1 Satellite Hyperspectral Data. *International Journal of Applied Earth Observation*, **21**, 506-512.
- [41] Tucker, C.J. (1979) Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**, 127-150.
- [42] Graetz, R.D., Pech, R.P. and Davis, A.W. (1988) The Assessment and Monitoring of Sparsely Vegetated Rangelands using Calibrated Landsat Data. *International Journal of Remote Sensing*, **9**, 1201-1222.
- [43] North, P.R.J. (2002) Estimation of fAPAR, LAI, and Vegetation Fractional Cover from ATSR-2 Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **1**, 114-121.
- [44] Tian, H., Cao, C., Chen, W., Bao, S., Yang, B. and Myneni, R.B. (2015) Response of Vegetation Activity Dynamic to Climatic Change and Ecological Restoration Programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012. *Ecological Engineering*, No. 82, 276-289.
- [45] Yi, S., Zhou, Z., Ren, S., Xu, M., Qin, Y., Chen, S. and Ye, B. (2011) Effects of Permafrost Degradation on Alpine Grassland in a Semi-Arid Basin on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, **4**, Article ID: 045403. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045403>
- [46] Jordan, C.F. (1969) Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, **50**, 663-666.
<https://doi.org/10.2307/1936256>
- [47] Bhardwaj, A., Sam, L., Akanksha, Martín-Torres, F.J., Kumar, R., Universitet, L.T. and Rymdteknik, I.F.R.S. (2016) UAVs as Remote Sensing Platform in Glaciology: Present Applications and Future Prospects. *Remote Sensing of Environment*, No. 175, 196-204.
- [48] Wdwz Peng, Z.R. (2015) A Study of Vertical Distribution Patterns of PM_{2.5} Concentrations Based on Ambient Monitoring with Unmanned Aerial Vehicles: A Case in Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **123**, 357-369.
- [49] Colomina, I. and Molina, P. (2014) Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 92, 79-97.
- [50] 丰炳财, 徐高福, 胡锦生, 董飞岳, 徐高翔, 李秀平, 贾荣兵. 千岛湖区新型多功能景观游憩林建设研究[J]. 浙江林业科技, 2000, 5(20): 64-70.
- [51] 傅伯杰, 陈利顶. 景观多样性的类型及其生态意义[J]. 地理学报, 1996, 5: 454-462.
- [52] 田育红, 刘鸿雁. 草地景观生态研究的几个热点问题及其进展[J]. 应用生态学报, 2003, 3: 427-433.
- [53] Klein, J.A., Harte, J. and Zhao, X.Q. (2004) Experimental Warming Causes Large and Rapid Species Loss, Dampened by Simulated Grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecology Letters*, **7**, 1170-1179.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00677.x>
- [54] Li, X.L., Gao, J., Brierley, G., Qiao, Y.M., Zhang, J. and Yang, Y.W. (2013) Rangeland Degradation on the Qinghai-Tibet Plateau: Implications for Rehabilitation. *Land Degradation & Development*, **1**, 72-80.
<https://doi.org/10.1002/ldr.1108>
- [55] 陶陶, 罗其友. 农业的多功能性与农业功能分区[J]. 中国农业资源与区划, 2004, 1(25): 45-49.
- [56] 李阳兵, 白晓永, 周国富, 兰安军, 龙健, 安裕伦, 梅再美. 中国典型石漠化地区土地利用与石漠化的关系[J]. 地理学报, 2006, 6: 624-632.
- [57] 邵景安, 李阳兵, 王世杰, 魏朝富, 谢德体. 岩溶山区不同岩性和地貌类型下景观斑块分布与多样性分析[J]. 自然资源学报, 2007, 3(22): 478-485.
- [58] Jiang, Z., Lian, Y. and Qin, X. (2014) Rocky Desertification in Southwest China: Impacts, Causes, and Restoration. *Earth-Science Reviews*, No. 132, 1-12.
- [59] Eris, E. and Wittenberg, H. (2015) Estimation of Baseflow and Water Transfer in Karst Catchments in Mediterranean Turkey by Nonlinear Recession Analysis. *Journal of Hydrology*, **530**, 500-507.
- [60] Žebre, M., Stepišnik, U., Colucci, R.R., Forte, E. and Monegato, G. (2016) Evolution of a Karst Polje Influenced by Glaciation: The Gomance Piedmont Polje (Northern Dinaric Alps). *Geomorphology*, No. 257, 143-154.
- [61] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, 4(16): 461-466.
- [62] 熊康宁, 黎平, 周忠发. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究: 以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [63] 胡宝清, 严志强, 廖亦眉, 韦小妮, 覃开贤. 喀斯特石漠化与地质-生态环境背景的空间相关性分析——以广西都安瑶族自治县为例[J]. 热带地理, 2004, 3: 226-230.

- [64] 王兮之, 李森, 王金华. 粤北典型岩溶山区土地石漠化景观格局动态分析[J]. 中国沙漠, 2007, 5(27): 758-764.
- [65] 白晓永, 白晓永, 白晓永, 王世杰, 王世杰, 陈起伟, 程安云, 程安云, 倪雪波, 倪雪波. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价[J]. 地理学报, 2009, 5: 609-618.
- [66] Zhang, X., Shang, K., Cen, Y., Shuai, T. and Sun, Y. (2014) Estimating Ecological Indicators of Karst Rocky Desertification by Linear Spectral Unmixing Method. *International Journal of Applied Earth Observation*, **31**, 86-94.
- [67] 王磊, 蔡运龙. 人口密度的空间降尺度分析与模拟——以贵州猫跳河流域为例[J]. 地理科学进展, 2011, 5(30): 635-640.
- [68] Xu, E., Zhang, H. and Li, M. (2013) Mining Spatial Information to Investigate the Evolution of Karst Rocky Desertification and Its Human Driving Forces in Changshun, China. *Science of the Total Environment*, No. 458-460, 419-426.
- [69] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 18: 5328-5341.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sd@hanspub.org