

DOI: 10.5846/stxb202007141833

颜亮,王金枝,张骁栋,陈槐,李勇,张克柔,闫钟清,李猛,吴海东,康恩泽,康晓明.草地生态系统植被变化的自然与人为因素定量区分方法.生态学报,2022,42(3):1098-1107.

Yan L, Wang J Z, Zhang X D, Chen H, Li Y, Zhang K R, Yan Z Q, Li M, Wu H D, Kang E Z, Kang X M. Methods for quantitatively assess the impacts of natural and anthropogenic factors on vegetation changes of grassland ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1098-1107.

草地生态系统植被变化的自然与人为因素定量区分方法

颜 亮^{1,2,3}, 王金枝^{1,2,3}, 张骁栋^{1,2,3}, 陈 槐^{4,5}, 李 勇^{1,2,3}, 张克柔^{1,2,3}, 闫钟清^{1,2,3}, 李 猛^{1,2,3}, 吴海东^{1,2,3}, 康恩泽^{1,2,3}, 康晓明^{1,2,3,*}

1 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091

2 湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091

3 四川若尔盖高寒湿地生态系统定位观测研究站, 阿坝藏族自治州 624500

4 中国科学院成都生物研究所山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 成都 610041

5 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

摘要:定量区分导致草地生态系统植被变化的自然和人为因素,是生态系统科学管理和保育的关键。因此,综述当前应用较为广泛的定量区分方法,包括主成分分析法、层次分析法、残差趋势法和模型差值法等,比较不同方法的计算原理、优势及误差来源,进而结合典型区域或典型生态系统,对不同方法进行对比和分析。总体而言,每种方法各有其优势和缺点,当前采用同一方法在不同区域或生态系统类型应用的研究较多,但针对方法本身改进或优化的研究较少。此外,针对同一区域开展的不同区分方法间的结果也存在差异。定量区分的结果除受方法本身算法的局限外,也受数据源的时空连续性及分辨率的影响。未来定量区分方法将强调:(1)在指标的选取上,要兼顾全面、多角度、不冗余等原则;(2)进行多源数据与多时空尺度融合,在更高时空分辨率定量区分自然与人为因素,从单一因子的贡献率区分到更多综合性指标的贡献率区分;(3)对定量区分方法本身的改进,这是当前的重点与难点。以期对生态系统适应性管理与关键生态功能的针对性保育提供科学依据和政策导向。

关键词:植被变化;自然因素;人为因素;定量区分

Methods for quantitatively assess the impacts of natural and anthropogenic factors on vegetation changes of grassland ecosystem

YAN Liang^{1,2,3}, WANG Jinzhi^{1,2,3}, ZHANG Xiaodong^{1,2,3}, CHEN Huai^{4,5}, LI Yong^{1,2,3}, ZHANG Kerou^{1,2,3}, YAN Zhongqing^{1,2,3}, LI Meng^{1,2,3}, WU Haidong^{1,2,3}, KANG Enze^{1,2,3}, KANG Xiaoming^{1,2,3,*}

1 Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Beijing 100091, China

3 Sichuan Zoige Wetland Ecosystem Research Station, Tibetan Autonomous Prefecture of Aba 624500, China

4 Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

5 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Quantitative assessment the impact of natural factors and anthropogenic factors on grassland ecosystem changes is vital to grassland scientific protection and restoration. Therefore, this paper reviewed and summarized the quantitative

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0501804)

收稿日期:2020-07-14; 网络出版日期:2021-08-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xmkang@ucas.ac.cn

assessment methods which are widely used at present, including principal component analysis (PCA), analytic hierarchy process (AHP), residual trend (RESTREND) method and ecosystem model method (difference between remote sensing model and process-based ecosystem model or climate-productivity model). We focused on comparing the algorithm, advantages and drawbacks of different methods. Furthermore, these methods were summarized and analyzed in combination with the typical region or typical ecosystems. In general, each method had its own advantages and disadvantages in data acquisition, temporal and spatial resolution. At present, many studies focused on the application of the same method in different regions or grassland types, but few studies focused on the improvement or optimization of the method itself. In addition, even in the same region and the same grassland type, the results of quantitative assessment of natural and anthropogenic factors on vegetation changes of grassland ecosystem varied in different methods. Besides the limitations of their own calculation methods, the results of quantitative assessment of natural and anthropogenic factors were also affected by the spatial and temporal resolution and continuity of the natural and anthropogenic data sources. In the future, we proposed that studies should focus on these aspects: (1) indicator selection was the first step of quantitative assessment, and it is particularly important to select indicators that can represent the changes of grassland ecosystem in different spatial and temporal scale from different perspectives. As for the selection of natural and anthropogenic factors indicators, we should also pay attention to the non-redundancy and non-correlation between indicators; (2) the data sources of natural and anthropogenic indicators were varied in different scales, it is vital to integrate multi-source of quantitative and qualitative data with different temporal and spatial scale to distinguish the contribution of single factor and the interaction between natural and anthropogenic factors in higher spatial and temporal resolution; (3) the improvement of quantitative assessment method itself, breaking through the limitations of existing methods, and developing new ideas and methods of quantitative assessment of natural and anthropogenic factors on vegetation changes of grassland ecosystem, which is also the key point and difficult point of the future research. For the purpose of providing scientific basis and policy guidance for adaptive management of ecosystem and targeted conservation of key ecological functions of ecosystems.

Key Words: vegetation changes; natural factors; anthropogenic factors; quantitative assessment

作为重要的陆地生态系统之一,草地可提供畜牧产品、水土保持、生物多样性维持等多种生态系统服务,是人类生存和可持续发展的基础^[1-4]。然而,在气候变化和不断增强的人类活动(如过度放牧)的双重影响下,草地生态系统的结构和功能发生变化^[5-8],表现为植被物候期、覆盖度和生产力的改变以及土壤系统的变化^[9-10]。草地生态系统的退化已成为当前最紧迫的环境和社会经济问题之一,定量区分草地生态系统变化中自然和人为因素的相对贡献率至关重要,可针对性选择不同的管理策略和技术手段来适应气候变化或抵消人类活动对草地生态系统的负面影响^[11-12]。已有学者围绕这一问题采用不同的方法开展相关研究和探索^[13-15],但由于气候变化和人类活动对生态系统影响的复杂性及其交互作用,定量评估自然和人为因素对草地生态系统变化的影响仍然是一个重要且有较大争议的研究课题^[16-18]。

据此,本文选取对气候变化和人类活动响应敏感的草地生态系统,以区域尺度上更易获取的植被变化相关指标为切入点^[19-20],综述国内外定量区分自然和人为因素对草地生态系统植被变化影响的不同方法,评估不同方法的优势及其不确定性来源,并对同一区域或围绕同一主题开展的不同方法所需的数据和结果进行比较,以期自然和人为贡献定量区分方法的选择、草地生态系统的保护与管理提供理论支撑和参考依据。

1 文献搜集与整理

文献搜集分为两步:(1)在中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)和 Web of Science 进行文献搜索,中、英文关键词包括:气候变化(climate change)、人类活动(human activities, non-climatic)、草地(grassland)、草原(steppe)、草甸(meadow)、自然因素(natural)、人为(anthropogenic)、定量(quantitative)、生态

系统(ecosystem)、贡献率(contributions)、植被(vegetation)、变化(variation, dynamic)、退化(degradation)、沙化(desertification)、恢复(restoration)。(2)对已搜集的文献进行筛选,仅保留同时具备自然因素与人为因素并且给出各自定量贡献率的文献,总结并归类当前用于定量区分自然因素和人为因素的方法,在此基础上针对归类后的每种方法的中英文关键词进行第二次搜索,包括:主成分分析法(principal component analysis, PCA)、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、残差趋势法(RESTREND)、模型差值方法(model, modelling)等。归纳每种方法的原理与计算方法,并从优势、不足及不确定性来源等方面进行比较。在此基础上,选取典型案例,对不同区分方法进行比较,并提出未来研究趋势。

2 自然与人为因素定量区分方法研究进展

2.1 方法简介

目前,用于定量区分草地生态系统植被变化的自然和人为因素相对贡献的方法主要有主成分分析法、层次分析法、残差趋势法和模型差值法等。

主成分分析法通过标准化原始指标值计算主成分因子的特征值和贡献率^[21-23],是数学上一种常用的降维方法。有学者将该方法应用在荒漠化和沙化过程中的自然和人为因素贡献率的区分中,通过选取研究区内特定时间范围的气象要素数据及农牧业社会经济统计数据,提取累积贡献率大于85%的主成分 X_1-X_n ,如果主成分 X_n 中自然因素指标均较大(>0.8),则该主成分因子看作是自然因素主导,其贡献率即为自然因素的相对贡献率,如人为因素指标较大,则是人为因素主导。如果主成分 X_n 上既有自然因素又有人为因素,则认为其受自然和人为共同影响^[24-25]。

残差趋势法由 Evans 和 Geerken 提出^[26],该方法通过长时间序列、区域尺度的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[27]、净初级生产力(Net Primary Production, NPP)或植被覆盖指数^[28-30]等指标定量区分研究区域内植被变化的自然与人为因素相对贡献率。通过建立研究区域内每个像元的植被指数与气象因子的回归模型,得到植被指数预测值(VI_i')的年时间序列;植被指数实际值(VI_i)与预测值之间的残差 σ_i ($\sigma_i = VI_i - VI_i'$),即为人为因素所贡献的部分。当 σ 的值为正时,人类活动对植被生长具有积极的影响,如果 σ 的值为负则认为人类活动对植被的作用是负面的,将加剧植被退化。Burrell 等结合时间序列分割(Time Series Segmentation, TSS)对此方法进行改进,提高了对生态系统结构重大变化的敏感度^[31]。

模型差值法是综合气候-生产力模型、生态系统过程模型和遥感模型进行植被变化的自然与人为因素定量区分的方法。生态系统模型包含了生态系统内部的许多复杂过程和机理,是认识、研究和预测生态系统过程、机制及影响因素的有效方法^[32],能够模拟预测自然因素对生态系统植被变化的影响。遥感模型则基于实测遥感数据,能够模拟预测自然和人为因素综合影响下的植被变化。该方法选取能够反映植被变化的 NDVI 或者 NPP 为评估指标,将其划分为3类:(1)仅受自然因素影响的潜在 NDVI($NDVI_p$)或 NPP(NPP_p),由气候生产力模型^[32](如 Thornthwaite 模型、Chikugo 模型)、生态系统过程模型(如 TEM 模型^[33]、IBIS 模型^[34]、LPJ 模型^[35]、OCHIDEE 模型^[36]等)计算得出;(2)受自然因素和人为因素共同影响的 NDVI($NDVI_A$)或实际 NPP(NPP_A),由遥感模型(如 CASA 模型^[37]、VPM 模型^[38]、EC-LUE 模型^[39])计算得出;(3)潜在情景与实际情景二者之差为仅受人为因素影响的 NDVI($NDVI_L$)或 NPP(NPP_L)^[40-42]。通过计算斜率,判断生态系统的状态以及是由自然因素还是人为因素主导,并基于 NPP 或 NDVI 的变化量来计算自然或人为因素的贡献率^[43-44]。

2.2 定量区分方法的比较与应用

在研究时段上,早期主成分分析法和层次分析法应用较多,20世纪90年代初董玉祥^[23]采用主成分分析法分析土地沙化的影响因子,选取年降雨量、风速、人口等10个自然与人为因子,得出人口压力下土地不合理利用是内蒙古商都县农牧交错区沙化的主要动因。这一方法也应用在鄂尔多斯高原^[25]和青海共和盆地^[45-46]的沙化和荒漠化过程的自然与人为因素的定量区分中,人为因素均是主导影响因子(46.8%—

53.8%)。主成分分析法主要基于长时间序列的统计数据,数据获取容易,计算方法简单,但方法的本质是一种降维方法,主成分提取与各因子间的相关性有关,因此其结果的解释其及生态学含义均比较模糊。层次分析法受数据的限制小,但研究结果受研究者构建的层次结构(如哪些自然因素和人为因素导致植被退化)及参与问卷调查与打分的受众的影响^[47—50]。

近十年来,残差趋势法、模型差值法应用逐渐增多,这两种方法的优势在于可以获取不同时段草地生态系统变化的定量区分比例及其空间格局。残差趋势法基于时空连续的遥感数据进行分析,但其假定植被指数与当年气候因子存在相关,更适用于干旱、半干旱区^[26—27]。这种方法没有建立一个未退化的参考,一些研究对该方法进行了改进,分时间段建立植被指数与气象因子的回归模型,同时考虑了温度对植被生长的影响^[51—52]。模型差值法适用于各种生态系统类型,验证后的模型具备较好的时空外推性,可模拟长时间尺度不同类型生态系统的动态变化,并以此为基础获取植被变化的自然和人为影响因素相对贡献率的时空格局。模型差值法中用于计算仅受气候因素影响的潜在 NPP 的气候-生产力模型和生态系统过程模型,它们的主要驱动要素之一是气象数据,因此存在气候因素与模型模拟结果的自相关^[30]。此外,由于过程模型和遥感模型的计算原理不同,不同模型的差值也包含了方法间的系统误差。

由此可见,用于生态系统植被变化自然和人为因素定量区分的几种方法数据获取难易程度不同、计算复杂度有差异,在计算原理和结果等方面各有其优势和局限(表 1)。

表 1 自然和人为因素相对贡献率的区分方法及比较

Table 1 Comparison between methods of quantitative assessment the contribution of climate and anthropogenic factors on ecosystem				
方法 Methods	所需数据 Required data	优势 Advantages	不足/误差来源 Disadvantages/Error sources	参考文献 References
主成分分析法 Principal component analysis	自然与人为因素的统计数据	(1) 数据容易获取; (2) 计算方法简单	降维过程与各因子间的相关性有关,对结果的解释其及生态学含义带有模糊性	[21—22]
层次分析法 Analytic hierarchy process	提供统计数据、气象数据等数据作参考,制定问卷并请相关人员打分	(1) 受数据限制低; (2) 定性定量相结合,将分析人员的经验判断给予量化	研究结果受构建的层次结构的专家及参与调查的受众的影响	[47—50]
残差趋势法 Residual trend	遥感数据、气象数据	可获取长时间序列、空间上区域大范围的植被变化的气候与人为因素的相对贡献	(1) 适用于植被指数与当年气候因子有显著相关的干旱、半干旱区的草地生态系统; (2) 基于同一个时间序列的趋势分析本身可能包含了无法确知的不同程度的退化; (3) 无法获取自然和人为因素中单个指标的贡献率	[51—54]
基于气候生产力模型、生态系统过程模型和遥感模型的模型差值法 Differences between models	模型驱动所需要的气候数据、植被类型数据、土壤数据等	具备较好的时空外推性,可获取植被变化的自然和人为影响因素相对贡献率的时空格局	(1) 气候因素和 NPP 的变化存在自相关; (2) 过程模型和遥感模型的原理不同,存在系统误差,这部分误差来源会传递到自然因素和人为因素定量区分的计算中; (3) 无法细分人为因素中各个类型的贡献率	[6,55]

已有较多研究在不同区域开展草地生态系统退化或沙化的自然和人为因素的定量区分,计算各自的比例(表 2)。

表 2 陆地生态系统变化自然和人为因素定量区分案例
Table 2 Samples of quantitative assessment the contribution of climate and anthropogenic factors on terrestrial ecosystems

区域 Region	生态系统 Ecosystems	区分方法 Methods	时间 Period	数据来源 Data source	主要结论 Conclusions	参考文献 References
中亚(哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦、土库曼斯坦和吉尔吉斯斯坦) Central Asia (Kazakhstan, Uzbekistan, Tajikistan, Turkmenistan and Kyrgyzstan)	草地(未分类)	模型差值法 (Thornthwaite 和 CASA 模型)	1982—1999; 1999—2015	NDVI 数据 (GIMMS 产品)、气 象数据(来自 CRU)、土地覆盖 数据(来自 MODIS)	在时间上: 1982—1999 年草地退化(面积 84.7%)是自然因素主导(53.5%); 草地 NPP 增加(面积 15.3%)是自然因素主导(51%); 1999—2015 年草地退化(面积 58.4%), 自然因素和人为因素分别可解释 45.3% 和 41.8%; 草地 NPP 增加(面积 41.6%)是自然因素主导(56.7%); 在空间上: 乌兹别克斯坦、土库曼斯坦的草地退化是人为因素主导, 吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦在 1982—1999 年草地 NPP 的增加是自然因素主导; 1999—2015 年塔吉克斯坦草地 NPP 增加是人为因素主导(99.4%), 其他四国 NPP 的增加是自然因素主导	[40]
					草地退化: 蒙古和巴基斯坦是人为因素主导(分别为 65% 和 79.1%), 乌兹别克斯坦是自然因素主导(67.4%); 草地恢复: 蒙古和巴基斯坦是自然因素主导(分别为 83.9% 和 85.1%), 乌兹别克斯坦是人为因素主导(86.7%)	
					MODIS 和 TRMM 遥感资料、降水、载畜量、人口数	
蒙古、巴基斯坦、乌兹别克斯坦 Mongolia, Pakistan and Uzbekistan	包含典型草原、荒漠草原、草甸草原、高寒草原等各草地类型	模型差值法 (Thornthwaite 和 Biome-BGC 模型)	2000—2013	气象数据(来自 NOAA)、牲畜数据(来自 FAO)	草地分布数据(来自 MODIS)、气象数据(来自 NOAA)、牲畜数据(来自 FAO)	[56]
蒙古、内蒙古 Mongolia, Inner Mongolia	草甸草原、典型草原、荒漠草原	残差趋势法	1981—2010	MODIS 数据 NPP 产品 (MOD17A3)、气象数据、土壤数据	草地退化是人为因素主导(载畜量、山羊和绵羊的种群密度), 草地恢复也是人为因素主导(保护政策)	[57]
非洲 Africa	植被大类, 包括草地、灌丛等	差值法 (Thornthwaite 和 MOD17A3)	2000—2014	MODIS 数据 NPP 产品 (MOD17A3)、土地覆盖数据 (MCD12Q1)、气象数据、土壤数据	自然因素主导: 马里、布基纳法索和中非地区; 人为因素主导: 埃塞俄比亚和南非的部分地区	[58]
非洲苏丹的北科尔多凡 North Kordofan in Sudan, Africa	植被大类, 包括草地、灌丛等	差值法 (Thornthwaite 和 MOD17A3)	2000—2008	MODIS 数据 NPP 产品 (MOD17A3)、土地覆盖数据 (MCD12Q1)、气象数据、土壤数据	荒漠化: 人为因素主导(67.32%); 荒漠化逆转: 自然因素主导(97.7%)	[59]
青海共和 Gonghe, Qinghai	荒漠化草原	主成分分析法	1961—2007	共 47 年的 15 个自然与社会经济统计因子	人为因素主导(46.8%)	[45]
藏北 Northern Qinghai-Tibet Plateau	高寒灌丛、高寒草原、高寒草甸	层次分析法	1953—2008	植被覆盖数据、气象数据、牲畜总数量、人口等数据; 问卷对象: 牧民、专家和当地相关部门管理人员与技术人员	人为因素主导(53.7%)	[46]
					人为因素主导(75%), 超载过牧、鼠虫害对藏北草地退化的贡献率分别为 28.6% 和 17.1%	
					实地咨询牧民获取草场面积、牲畜数量种类、鼠虫害杂草等情况; 问卷对象: 专家和政府相关部门的主管人员	
藏北 Northern Qinghai-Tibet Plateau	高寒灌丛、高寒草原、高寒草甸	层次分析法	1990—2015	-	人为因素主导, 超载放牧、气候异常对藏北草地退化的贡献率分别为 45.6% 和 30.4%	[47]

续表

区域 Region	生态系统 Ecosystems	区分方法 Methods	时间 Period	数据来源 Data source	主要结论 Conclusions	参考文献 References
青藏高原 Qinghai-Tibet Plateau	高寒草原、高寒草甸	残差趋势法	2000—2015	温度、降水等自然因子;人口密度、放牧强度等人为因子	自然因素主导,降水和温度的交互作用可解释植被变化的 44.6%	[53]
		模型差值法 (TEM 和 CASA 模型)	1982—2011	NDVI 数据、气象数据、2009—2011 年共采集 108 个围栏内外地上及地下生物量用于验证模型模拟结果	1982—2000 年:自然因素主导 (79.62%); 2001—2011 年:自然因素主导 (56.59%)	[6]
		优化的模型差值法	1990—2013	气象数据、统计年鉴数据、遥感数据	1990—1999 年:人为因素主导 (60.1%); 2000—2013 年:人为因素主导 (84.6%)	[55]
内蒙古、新疆、西藏、青海和甘肃 Inner Mongolia, Xinjiang, Tibet, Qinghai and Gansu	包含典型草原、荒漠草原、草甸草原、高寒草甸、高寒草原等各草地类型	模型差值法 (Thornthwaite 和 Biome-BGC 模型)	2000—2013	草地恢复 (面积 29.6%); 自然因素主导 (38.5%)	[56]	
		模型差值法 (Thornthwaite 和 CASA 模型)	2001—2010	NDVI 数据、2001—2010 年气象数据 (来自中国气象数据共享服务网)、2009 年共 63 个点的野外调查数据	草地恢复 (面积 38.51%); 自然因素主导 (56.56%); 草地退化 (面积 61.49%); 人为因素主导 (65.75%)	[44]
		层次分析法	-	草地退化面积、鼠虫害、气象数据等;问卷对象:牧民、专家、相关部门管理与技术人员	高寒草甸退化;长期超载过牧和气候暖干化主导 (66%)	[14]
黄河源和长江源区 The source of the Yellow River and the Yangtze River	高寒草原、高寒草甸	层次分析法	1978, 1990, 2000, 2008	气象数据、人口、放牧等数据, CBERS-02B 和 Landsat TM/ETM 影像;问卷对象:各地区农牧局、草原站相关人员	人为因素主导,超载过牧、挖沟排水贡献率分别为 38.0% 和 15.7%	[49]
		残差趋势法	2000—2012	MODIS 和 TRMM 遥感资料、气温和降水	人为因素主导 (60.6%—62.1%)	[54]

GIMMS; 全球建模与制图研究清单 Global Inventory Modelling and Mapping Studies; CRU; 英国东英格利亚大学气候研究所 Climatic Research Unit; MODIS; 中分辨率成像光谱仪 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer; NOAA; 美国国家海洋和大气管理局 National Oceanic and Atmospheric Administration; FAO; 联合国粮食及农业组织 Food and Agriculture Organization of the United Nations; TRMM; 热带降雨测量任务卫星 Tropical Rainfall Measuring Mission; CBERS-02B; 中巴地球资源卫星 02B 星 China-brazil earth resource satellite-02B; Landsat; 美国陆地探测卫星计划 Land Satellites Program

采用模型差值法发现近三十年乌兹别克斯坦和土库曼斯坦的草地退化是人为因素主导,而哈萨克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦、蒙古和巴基斯坦草地 NPP 的增加均是自然因素主导^[40,56]。非洲植被 NPP 变化的驱动力存在空间差异,马里、布基纳法索和中非地区为自然因素主导,埃塞俄比亚和南非的部分地区则是人为因素主导^[58]。而位于非洲东北部的苏丹共和国的北科尔多凡,2000—2008 年该地区荒漠化是人为因素主导(67.32%),自然因素影响了 32.03%,自然因素和人为因素共同影响 0.65%,荒漠化逆转则是自然因素主导(97.7%)^[59]。

尽管很多研究工作在同一区域开展,然而因研究方法不同,研究结果也存在很大差异,甚至结论相反:以我国藏北区域为例,利用层次分析法研究发现,该区域在 1990—2015 年间是人为因素主导,超载过牧、鼠虫害对藏北草地退化的贡献率分别为 28.6%和 17.1%^[54]。而采用残差趋势法对该区域研究发现,2000—2015 年间藏北区域的植被变化不是人为因素主导,而是自然因素主导,并且因子之间的交互作用大于任何单一因子,降水和温度的交互作用可解释藏北区域草地植被变化的 44.6%^[53]。针对我国青藏高原区域的研究结果也有较大差异,采用生态系统过程模型(TEM 模型)和遥感模型(CASA 模型)的差值结果发现,1982—2010 年间是自然因素主导(56.59%—79.62%)^[6];而陈槐等^[55]基于优化的模型差值法则表明 1990—2013 年间青藏高原草地生态系统净初级生产力的变化是人为因素主导(74%);采用广义线性模型计算潜在 NDVI 与实际 NDVI 的比较结果揭示 1980—2010 年间植被变化是人为因素主导(66.07%),人为因素中“退耕还草”等生态项目可改善草地质量、有效的减缓由于土地利用变化和持续干旱引起的草地退化^[43]。

3 结论与展望

本文综述了当前用于区分自然和人为因素贡献的方法,对不同方法的数据来源、计算过程、优劣势和应用进行了梳理与比较,目前,已有研究将同一方法应用在不同区域的研究较多,但针对方法本身的局限而优化或提升的方法类研究较少,研究指标的选取上较为单一,在定量区分的方法和指标的选取上仍需优化和突破。

不论是早期采用较多的主成分分析法和层次分析法,还是近年来应用较多的残差趋势法和模型差值方法等,每种方法均有其各自优势及局限性。另一方面,当前研究也受限于所需数据的时空尺度及连续性。例如,基于遥感影像数据的残差趋势法和模型法,不能对没有遥感图像的较早时段进行分析。因此,在开展定量区分的研究时可依据不同目标 and 数据情况选择相应的方法(图 1)。

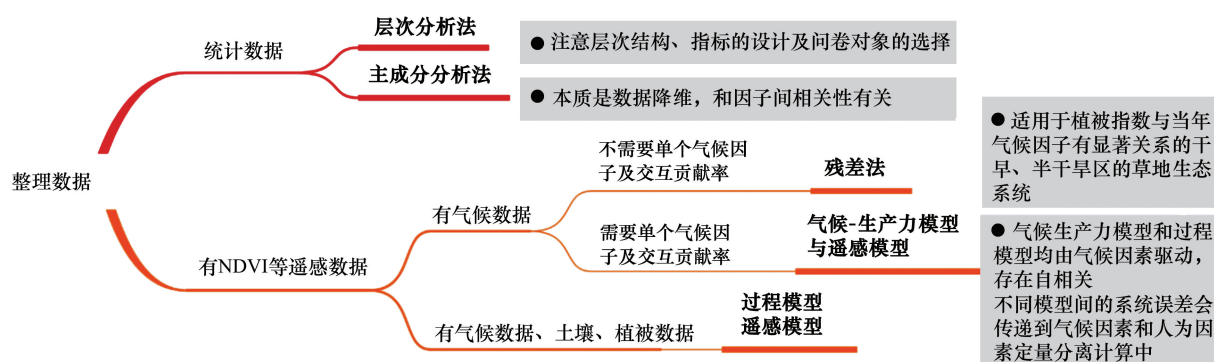


图 1 依研究目标和数据情况进行方法选择的思维导图

Fig.1 A mind map of method selection based on research objectives and data

为更全面、清晰地厘清生态系统的变化及归因,为陆地生态系统的保护与管理提供更为科学、细致的理论支撑和参考依据,未来研究应关注以下几方面:

(1) 指标选取是开展定量区分的第一步,如何选取能够代表不同时空尺度的生态系统变化的指标尤为关键;关于自然和人为因素的指标筛选,既要考虑全面,也要关注指标间是否冗余、是否相关或相互影响,如何用

科学的方法识别和筛选指标。例如,当前残差趋势法和模型差值法主要以易获取且能反映植被变化的 NDVI 或 NPP 作为评估的指标,而总初级生产力 (Gross primary productivity, GPP) 和净生态系统生产力 (Net ecosystem productivity, NEP) 分别表征了生态系统的总第一性生产和净固碳量,有着重要的生态学意义,未来研究中也应予以关注。

(2) 数据为定量区分提供支持,自然和人为因素各指标的不同数据源的时间、空间分辨率不匹配,如区域的气象数据多为插值后以一定面积格点为单位的时空连续数据,而人为因素的一部分数据如人口数量、放牧强度等来自于统计年鉴,空间上一般以县域尺度为主;另一部分为定性数据,如政策等。因此,如何将不同时间、空间分辨率,定量、定性数据相结合,是未来研究中需要关注和解决的问题。

(3) 由于导致生态系统变化的各因素通常是协同作用的 (图 2), 因此生态系统的退化归因、有效保护、恢复与管理除需要定量区分特定时段内某一区域自然 ($X\%$) 与人为因素 ($Y\%$) 各自的贡献率,以及自然和人为因素下每个因子各自的贡献率外,还需要关注组内因子交互作用 ($x_1x_n\%$ 或 $y_1y_n\%$) 和组间因子交互作用的贡献率 ($x_1y_n\%\cdots y_1x_n\%$)。

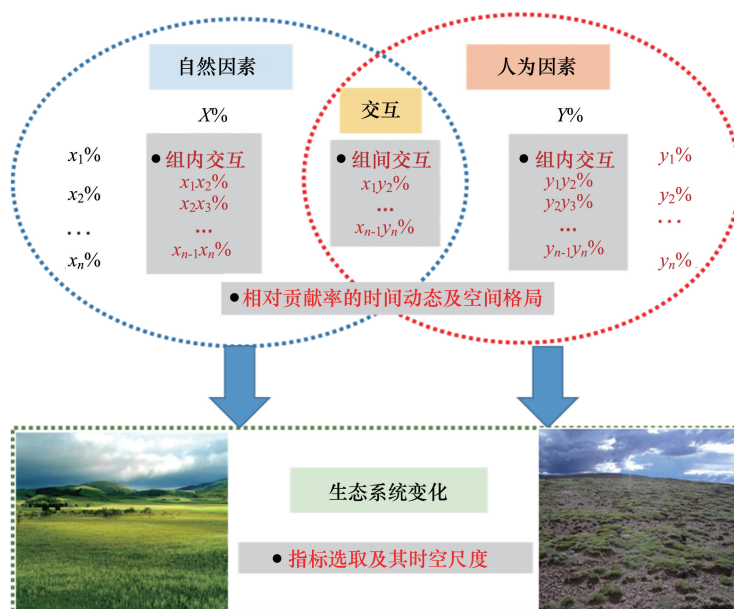


图 2 生态系统变化的自然与人为因素定量区分方法中暂未解决的问题及研究展望

Fig.2 The prospects in quantitative assessment the impacts of climate factors and anthropogenic factors on terrestrial ecosystem changes

(4) 迫切需要针对自然与人为因素定量区分方法本身开展研究,突破现有方法的局限,发展定量区分的新思路与新方法,这也是未来研究的重点与难点所在。

参考文献 (References):

- [1] Ewers R M, Banks-Leite C. Fragmentation impairs the microclimate buffering effect of tropical forests. PLoS One, 2013, 8(3): e58093.
- [2] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1385-1390.
- [3] Beier C, Knapp A, Briske D. Climate change and precipitation-Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009, 6: 292023.
- [4] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.
- [5] Esser G. Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1987, 39(3): 245-260.
- [6] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 11-18.

- [7] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179-1186.
- [8] 张琴琴, 摆万奇, 张懿锂, 刘林山. 黄河源地区牧民对草地退化的感知——以达日县为例. *资源科学*, 2011, 33(5): 942-949.
- [9] Jentsch A, Kreyling J, Elmer M, Gellesch E, Glaser B, Grant K, Hein R, Lara M, Mirzae H, Nadler S E, Nagy L, Otieno D, Pritsch K, Rascher U, Schädler M, Schloter M, Singh B K, Stadler J, Walter J, Wellstein C, Wöllecke J, Beierkuhnlein C. Climate extremes initiate ecosystem-regulating functions while maintaining productivity. *Journal of Ecology*, 2011, 99(3): 689-702.
- [10] Ploughe L W, Jacobs E M, Frank G S, Greenler S M, Smith M D, Dukes J S. Community Response to Extreme Drought (CRED): a framework for drought-induced shifts in plant-plant interactions. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 52-69.
- [11] 黄磊, 王长科, 巢清尘. IPCC《气候变化与土地特别报告》解读. *气候变化研究进展*, 2020, 16(1): 1-8.
- [12] Vignola R, Locatelli B, Martinez C, Imbach P. Ecosystem-based adaptation to climate change; what role for policy-makers, society and scientists? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2009, 14(8): 691-696.
- [13] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, Small J, Frost P E, VanZyl D. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(2): 271-297.
- [14] 周华坤, 赵新全, 周立, 唐艳鸿, 刘伟, 师燕. 层次分析法在江河源区高寒草地退化研究中的应用. *资源科学*, 2005, 27(4): 63-70.
- [15] Lv M X, Ma Z G, Li M X, Zheng Z Y. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the grain for green program in the Yellow River basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(3): 1336-1351.
- [16] 张懿锂, 祁威, 周才平, 丁明军, 刘林山, 高俊刚, 摆万奇, 王兆锋, 郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. *地理学报*, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [17] Rothacker L, Dosseto A, Francke A, Chivas A R, Vigier N, Kotarba-Morley A M, Menozzi D. Impact of climate change and human activity on soil landscapes over the past 12,300 years. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 247.
- [18] Yan J J, Zhang G P, Deng X Y, Ling H B, Xu H L, Guo B. Does climate change or human activity lead to the degradation in the grassland ecosystem in a mountain-basin system in an arid region of China? *Sustainability*, 2019, 11(9): 2618.
- [19] Pasut C, Tang F H M, Maggi F. A mechanistic analysis of wetland biogeochemistry in response to temperature, vegetation, and nutrient input changes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(4): e2019JG005437.
- [20] 刘可, 杜灵通, 侯静, 胡悦, 朱玉果, 官菲. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征. *生态学报*, 2018, 38(6): 1885-1896.
- [21] 苏键, 陈军, 何洁. 主成分分析法及其应用. *轻工科技*, 2012, (9): 12-13, 16-16.
- [22] 王嗣超, 张丰, 关明雨. 一种结合层次分析法的改进型主成分评价法及其应用. *西安文理学院学报: 自然科学版*, 2014, (3): 27-29, 44-44.
- [23] 董玉祥. 土地沙漠化影响因子的定量分析. *干旱区研究*, 1989, (4): 34-42.
- [24] 董玉祥. 人文因子在荒漠化中的作用. *中国沙漠*, 1992, 12(1): 16-26.
- [25] 贾宝全, 高志刚, 张红旗, 慈龙骏. 鄂尔多斯高原土地沙化过程中自然与人为因素的定量分析. *林业科学*, 2003, 39(6): 15-20.
- [26] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [27] Li A, Wu J G, Huang J H. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in inner Mongolia. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 969-982.
- [28] Fensholt R, Rasmussen K, Kaspersen P, Huber S, Horion S, Swinnen E. Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-term earth observation based primary productivity and precipitation relationships. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 664-686.
- [29] Lehnert L W, Wesche K, Trachte K, Reudenbach C, Bendix J. Climate variability rather than overstocking causes recent large scale cover changes of Tibetan pastures. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24367.
- [30] Li X S, Wang H Y, Zhou S F, Sun B, Gao Z H. Did ecological engineering projects have a significant effect on large-scale vegetation restoration in Beijing-Tianjin Sand Source Region, China? A remote sensing approach. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(2): 216-228.
- [31] Burrell A L, Evans J P, Liu Y. Detecting dryland degradation using time series segmentation and residual trend analysis (TSS-RESTREND). *Remote Sensing of Environment*, 2017, 197: 43-57.
- [32] 周广胜, 王玉辉. *全球生态学*. 北京: 气象出版社, 2003.
- [33] McGuire A D, Melillo J M, Joyce L A, Kicklighter D W, Grace A L, Moore III B, Vorosmarty C J. Interactions between carbon and nitrogen dynamics in estimating net primary productivity for potential vegetation in North America. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6(2): 101-124.
- [34] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [35] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change*

- Biology, 2003, 9(2), 161-185.
- [36] Druel A, Peylin P, Krinner G, Ciais P, Viovy N, Peregon A, Bastrikov V, Kosykh N, Mironycheva-Tokareva N. Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0). *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(12): 4693-4722.
- [37] Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Prentice I C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1015.
- [38] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore III B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [39] 袁文平, 蔡文文, 刘丹, 董文杰. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 541-550.
- [40] Chen T, Bao A M, Jiapaer G, Guo H, Zheng G X, Jiang L L, Chang C, Tuerhanjiang L. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 1311-1325.
- [41] Liu Y Y, Wang Q, Zhang Z Y, Tong L J, Wang Z Q, Li J L. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 27-39.
- [42] Zhang Y Z, Wang Q, Wang Z Q, Yang Y, Li J L. Impact of human activities and climate change on the grassland dynamics under different regime policies in the Mongolian Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134304.
- [43] Pan T, Zou X T, Liu Y J, Wu S H, He G M. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 307-317.
- [44] Zhou W, Gang C C, Zhou L, Chen Y Z, Li J L, Ju W M, Odeh I. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the northwest China. *Acta Oecologica*, 2014, 55: 86-96.
- [45] 才保. 自然因素与人类活动对青海湖流域草原荒漠化的驱动分析. *草业与畜牧*, 2011, (8): 11-16.
- [46] 张东杰. 共和盆地近 50 年来草地荒漠化驱动因素定量研究. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 166-169.
- [47] 梁存利. 模糊层次分析法在西藏草地退化研究中的应用. *草地学报*, 2017, 25(1): 172-177.
- [48] 马立广, 曹彦荣, 李新通. 基于层次分析法的拉市海高原湿地生态系统健康评估. *地球信息科学学报*, 2011, 13(2): 234-239.
- [49] 王元云, 何奕忻, 鞠佩君, 朱求安, 刘建亮, 陈槐. 层次分析法在若尔盖湿地退化研究中的应用. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(1): 46-52.
- [50] 王金枝, 颜亮, 吴海东, 康晓明. 基于层次分析法研究藏北高寒草地退化的影响因素. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(1): 17-24.
- [51] 曹鑫, 辜智慧, 陈晋, 刘晋, 史培军. 基于遥感的草原退化人为因素影响趋势分析. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 268-277.
- [52] Wang H, Liu G H, Li Z S, Ye X, Fu B J, Lü Y H. Analysis of the driving forces in vegetation variation in the grain for green program region, China. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1853.
- [53] Ran Q W, Hao Y B, Xia A Q, Liu W J, Hu R H, Cui X Y, Xue K, Song X N, Xu C, Ding B Y, Wang Y F. Quantitative assessment of the impact of physical and anthropogenic factors on vegetation spatial-temporal variation in northern Tibet. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1183.
- [54] 何磊, 马文琰, 赵传燕. 人类活动和自然因素在阿拉善盟荒漠化过程中的相对作用. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2015, 51(3): 344-350.
- [55] 陈槐, 鞠佩君, 张江, 王元云, 朱求安, 颜亮, 康晓明, 何奕忻, 曾源, 郝彦斌, 王艳芬. 青藏高原高寒草地生态系统变化的归因分析. *科学通报*, 2020, 65(22): 2406-2418.
- [56] Yang Y, Wang Z Q, Li J L, Gang C C, Zhang Y Z, Zhang Y, Odeh I, Qi J G. Comparative assessment of grassland degradation dynamics in response to climate variation and human activities in China, Mongolia, Pakistan and Uzbekistan from 2000 to 2013. *Journal of Arid Environments*, 2016, 135: 164-172.
- [57] John R, Chen J Q, Kim Y, Ouyang Z T, Xiao J F, Park H, Shao C L, Zhang Y Q, Amarjargal A, Batkhshig Q, Qi J G. Differentiating anthropogenic modification and precipitation-driven change on vegetation productivity on the Mongolian Plateau. *Landscape Ecology*, 2016, 31(3): 547-566.
- [58] Ugbaje S U, Odeh I O A, Bishop T F A, Li J L. Assessing the spatio-temporal variability of vegetation productivity in Africa: quantifying the relative roles of climate variability and human activities. *International Journal of Digital Earth*, 2017, 10(9): 879-900.
- [59] Jahelnabi A E, Zhao J, Li C H, Fadoul S M, Shi Y F, Bsbeer A K, Yagoub Y E. Assessment of the contribution of climate change and human activities to desertification in Northern Kordofan-Province, Sudan using net primary productivity as an indicator. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, 9(6): 674-683.