

DOI: 10.5846/stxb201605070881

曹世雄, 刘冠楚, 马华. 我国三北地区植被变化的动因分析. 生态学报, 2017, 37(15): 5023-5030.

Cao S X, Liu G C, Ma H. Dynamic analysis of vegetation change in north China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5023-5030.

我国三北地区植被变化的动因分析

曹世雄^{1,2,*}, 刘冠楚², 马 华³

1 延安大学经济管理学院, 延安 716000

2 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

3 南宁市水利局, 南宁 530001

摘要: 地表植被变化是气候变化、人类活动等多种因素共同作用的结果。然而, 以往的研究要么集中在与气候变化有关的气象因素, 要么集中在与人类活动有关的人为因素, 鲜有基于长期数据监测下对自然与社会因素之间相互作用的定量评估。因此, 气候变化和人为因素对地表植被变化的相互作用并不明确, 各个因素对植被变化影响的量化贡献仍然不确定。为了评价生态修复项目对荒漠化防治的效果, 以及在土地荒漠化防治中自然与社会因素对我国植被变化的影响, 及其复杂的相互作用机理, 该研究应用卫星遥感影像资料, 通过面板数据混合回归模型大数据分析, 计算了 1983 年至 2012 年气候变化和人类活动对我国北方地区植被变化的贡献率。结果表明, 气候变化和人类活动对 NDVI 变化均有重要作用, 其中人类活动对植被覆盖度变化的影响占 58.2%—90.4%、气候变化占 9.6%—41.8%; 不同地区表现出不同的地理分异特征, 并存在时滞效应。由此可见, 荒漠化防治必须充分考虑不同因素的综合作用和地域特征, 才能取得事半功倍的效果。研究结果较好地体现了卫星遥感影像资料在大尺度(省域尺度)下与社会经济统计指标的融合, 为进一步中尺度(县域尺度)研究提供了方法借鉴。

关键词: 气候变化; 荒漠化; 生态恢复; 人类活动; 植被变化

Dynamic analysis of vegetation change in north China

CAO Shixiong^{1,2,*}, LIU Guanchu², MA Hua³

1 College of Economic Management, Yan'an University, Yan'an 716000, China

2 College of Economic Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Nanning Water Conservancy Bureau, Nanning 530001, China

Abstract: Drylands cover approximately 54 million km², which accounts for 40% of the global land area, and is inhabited by 20% of the human population; however, these areas are increasingly affected by desertification. Desertification is concentrated in the northwestern, northern, and northeastern parts of China (the so-called "Three Norths"): an estimated 3.3 million km² have been affected by desertification, accounting for 34% of China's total land area. Desertification has become a crucial environmental problem at a global scale, and has begun to affect the survival and socioeconomic development of humankind. Research has suggested that both climate and human activities play important roles in the process of desertification, which is complicated and includes complex interactions between human and natural factors (e.g., climate). However, previous research generally focused on either meteorological factors associated with climate change or factors associated with human activities, and lacked quantitative assessments of their long-term interaction. Thus, the roles of climate change and human factors in vegetation cover change and desertification are uncertain. This creates a high risk of misunderstanding the current situation and adopting ineffective policies and programs to combat desertification. It is, therefore, urgently necessary to comprehensively study the interacting effects. To understand the factors that determine

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501002)

收稿日期: 2016-05-07; 网络出版日期: 2017-03-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shixiongcao@126.com

whether mitigation programs can contribute to desertification control and vegetation cover improvement in desertified areas of China, and the complex interactions that affect their success, we used a pooled regression model based on panel data to calculate the relative roles of climate change and human activities on the desertified area and vegetation cover. We used the 1983 to 2012 normalized-difference vegetation index, NDVI, which decreases with increasing desertification. We found similar effect magnitudes for climate change and human activity factors for NDVI; human activity factors were the dominant factor that affected vegetation change, accounting for 58.2%—90.4% of the effects. Climate change accounted for 9.6%—41.8% of the effects on NDVI. Therefore, desertification control programs must account for the integrated effects of both socioeconomic and natural factors. Although humans are clearly part of nature, we are qualitatively different from other parts of nature; our actions have more rapid and disruptive consequences than those of most natural phenomena. Therefore, we must be careful to avoid the adoption of extreme approaches to change natural ecosystems because our changes may occur more rapidly than it is possible for the ecosystems to adapt, and the resulting problems may not be evident immediately but have long-term consequences. Our method for identifying the contributions of each driving factor was defensible for providing a broad overview. This method should be identified in future research to improve the ability of this research to support restoration planning.

Key Words: climate change; desertification; ecological restoration; human activities; vegetation cover change

土地退化也被称作土地荒漠化,严重威胁着人类的生存和发展,是制约现代社会可持续发展的重大问题^[1-2]。目前,全球受荒漠化影响的土地面积约为 5400 万 km²,约占全球陆地面积的 40%^[3]。这些地区水文变化无常、气候条件恶劣、植被组成多样、水土流失和土地荒漠化严重^[4]。包括我国西北地区、非洲、中东、美国西部、澳大利亚等地,沙尘暴不断威胁着人类的生存与发展^[5]。在干旱、半干旱、以及半湿润地区,土地退化的成因包括气候变化和人类活动,所引发的直接生态后果就是植被减少^[1-2]。随着荒漠化面积日益增加,人类栖息地面积日趋减少,贫困化问题也在不断加剧^[6]。土地荒漠化已经成为全人类共同面临的严重环境问题和难题,影响人类生存和人类文明的进一步发展。

研究表明,气候变化和人类活动对土地荒漠化进程均有重要影响,地表植被变化也会影响气候变化^[7-8]和人类活动^[9-10]。一些研究结果证明人类活动比气候因子的作用大^[11],而另一些结果表明气候因素的作用更明显^[12],更多的结果表明人类活动和气候变化之间存在复杂的交互作用^[13-14]。然而,过去的研究工作要么只关注气候因素,要么只关注人类活动,鲜有学者在研究中同时考虑以上两类因素的相互作用。自然学科的一些学者认为,气候变化影响土壤质量、植被覆盖、物种组成、水文循环,因此导致荒漠化面积增加^[15-16];人文学科一些学者认为,不可持续的传统人类活动(如过度放牧、过度采伐、地下水开采等)对生态系统施加了巨大压力,进而导致水土流失,加剧了土地荒漠化^[17-18]。由于自然学科和人文学科的长期分离,科学家并不清楚上述因素是如何相互作用的,也不清楚这些因素在荒漠化形成和防治过程中孰轻孰重,不同研究成果之间的分歧无法调和,进一步增加了荒漠化防治的难度和风险^[19-20]。

土地退化不仅属于自然科学研究范畴、也属于人文科学研究领域^[21]。影响荒漠化的动力因素之间存在着复杂的相互关系,为了预测这些相互作用的最终效果,有必要了解他们之间复杂的相互作用和因果关系。这些因果关系通常是非线性的,在达到极限后会出现剧烈变化,而且他们的影响往往具有时间上的滞后效应^[22]。传统生态系统恢复的工作重点是重新建立生态干扰机制或者非生物条件、并依靠生态系统演替过程,促进生物群落恢复。不过,生物因素和自然环境之间强烈的相互作用可以改变以生态系统演替为基础的环境工程管理的结果^[23-24]。历史上的这类研究热衷于理论分析和概念描述,鲜有量化研究的成果报道^[4]。庆幸的是,大数据分析使不同尺度下的跨学科研究成为可能。

在我国三北(西北、华北、东北)地区,土地荒漠化严重制约当地的人类活动和社会发展^[25]。为控制荒漠化,我国政府实施了一系列大型治理工程,包括退耕还林项目、天然林保护工程、三北防护林工程、防沙治沙工

程等等^[26-27]。然而,由于自然因素和人为因素的相互作用尚不明晰,荒漠化的成因和治理成果的动力机理并不明确;同时,一些地区的荒漠化面积已显著下降,但另一些地区的荒漠化仍在不断扩大^[28]。因此,我国荒漠化防治的政策成效也不断引起争议^[20, 29-30]。由此可见,全面开展荒漠化形成和防治的动力机制研究,有的放矢地建立有效应对机制,仍然是我国乃至全球荒漠化防治的重要课题。

为了评价生态修复项目对荒漠化防治的效果、以及在土地荒漠化防治中气候变化和人类活动对我国植被变化的影响、及其复杂的相互作用机理,该研究应用卫星遥感影像资料,通过面板数据混合回归模型,计算了1983年至2012年30年间气候变化和人类活动对我国北方地区植被变化的贡献率。研究结果较好地体现了卫星遥感影像资料在大尺度(省域尺度)下与人类活动统计指标的融合,为进一步中尺度(县域尺度)研究摸索经验。

1 研究方法

为了全面认识气候变化和人类活动对荒漠化形成和防治的影响,该研究通过 $8 \times 8 \text{ km}$ 空间分辨率下的 AVHRR GIMMS 卫星遥感数据,以归一化差分植被指数值 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index,一般应用于检测植被生长状态、植被覆盖度)代替植被变化,获取了各个省、市、自治区的各个年度植被变化的平均值。考虑到湿润地区云雾的阻挡作用,该研究的研究区域局限于三北地区15个省市自治区。由于该卫星2012年以后停止使用,因此,该研究的所有数据均选取1983—2012年同一颗卫星工作时段影像资料。并从统计年鉴中获得可能影响植被变化的所有气候变化和人类活动指标的年度统计数据。

统计指标 (1)农村社会发展指标:农村人口、农业劳动力、公路绿化里程、铁路绿化里程、矿区绿化面积;(2)农村经济发展指标:农业GDP、农业收入、农村人均收入、农村人均纯收入、耕地面积、播种面积、复种指数、基本农田面积、粮食产量、粮食单产、各种家畜存栏量;(3)环境政策指标:封山禁牧面积、封山育林面积、人工造林面积、人工种草面积、退耕面积、生态项目投资;(4)气候环境指标:年均温度、年均降水量、极端温度、 $>0^\circ\text{C}$ 和 $>10^\circ\text{C}$ 积温、太阳辐射、地下水位、地表水量30个统计监测指标为主要研究指标。

为了去除统计单位不同造成的影响,该研究使用每个指标的年度变化率面板数据去识别关键因素,并且比较他们对NDVI的贡献。为了避免重叠因素对结果的影响,该研究应用2011版本的STATA软件的回归分析模型(<http://www.stata.com>)计算所有双驱动因素之间关系的回归系数。最后确定了农村人口、农村人均纯收入、耕地面积、封山禁牧与封山育林面积、造林面积、公路和铁路里程(绿化)、年平均温度、年均降水量为主要指标。面板数据模型如下:

$$y_{it} = a + bx_{it} + u_{it} \quad (1)$$

式中, y_{it} 是指在 t 年 i 地区的NDVI值, x_{it} 是相应的影响因素, u_{it} 是误差, a 和 b 是回归系数。

为了解释在回归分析中变量因素自相关的可能性,进行了Breusch-Godfrey LM测试,最终得到辅助回归系数 R 。依据 $(n-1)R$ 近似服从自由度为1的卡方分布来确定有没有出现显著自相关。然后将原始数据 x_{it} 减去 x_{it} 的均数 $\bar{x}_{it}$ 的标准差,从而得到标准化的 a 和 b 。并依据气候与地理差异把三北地区分为6个区域,计算研究区中不同变量对NDVI变化的贡献。计算的模型如下:

$$\text{Con}_i = \frac{|\text{SCV}_i|}{\sum_i |\text{SCV}_i|} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Con_i 是变量 i 对NDVI的贡献, $|\text{SCV}_i|$ 是变量 i 标准化系数值的绝对值、通过系数 b 来计算。

区域划分如下:青藏高原地区(西藏和青海)、西北地区(新疆、甘肃、宁夏)、内蒙古自治区、黄土高原地区(陕西和山西)、东北地区(黑龙江、吉林、辽宁)、华北地区(河北、河南、山东、北京、天津)。

2 结果

结果显示(表1),农村人口变化和耕地面积变化与NDVI变化呈显著负相关关系,对当年NDVI变化的贡

献率分别为 9.5% 和 27.6%; 农民纯收入增加、人工造林、道路与矿区绿化、气候变暖、降水增加与 NDVI 变化呈显著正相关关系, 这些因素对当年 NDVI 变化的贡献率分别为 9.1%、3.4%、6.3%、19.8%、22.0%。

各因素变化对 NDVI 变化的影响存在时滞效应, 其中生态移民和城市化发展引起农村人口减少、封山禁牧自然植被修复、以及道路与矿区绿化对植被变化的贡献在第 3 年表现最为突出, 贡献率分别达到 32.4%、19.0% 和 23.8%。气候变化的时滞效应不明显。

表 1 各因素对 1983 至 2012 年间我国三北地区 NDVI 变化的相对贡献

Table 1 The relative contribution of each factor to the changes in NDVI from 1983 to 2012 in Northern China

	2012		2013		2014	
	R^2	贡献率 Contribution/%	R^2	贡献率 Contribution/%	R^2	贡献率 Contribution/%
农村人口 Rural population	-0.559 **	9.48	-0.573 **	13.71	-0.600 **	32.37
农民纯收入 Rural net income	0.660 **	9.07	0.632 **	9.31	0.675 **	2.54
耕地面积 Farmland area	-0.622 **	27.57	-0.504 **	9.49	-0.429 *	11.12
封禁面积 Forbidden area	0.207	2.46	0.177	13.89	0.328 *	18.97
造林面积 Afforestation area	0.352 **	3.37	0.261 *	0.58	0.183	1.51
公路铁路里程 Length of roads and railways	0.638 **	6.29	0.650 **	34.11	0.706 **	23.84
年平均温度 Mean annual temperature	0.429 *	19.79	0.359 *	4.61	0.416 *	4.53
降水 Precipitation	0.314 *	21.97	0.153	14.30	-0.169	5.11

显著性水平 Significance levels: * * 1%, * 5%

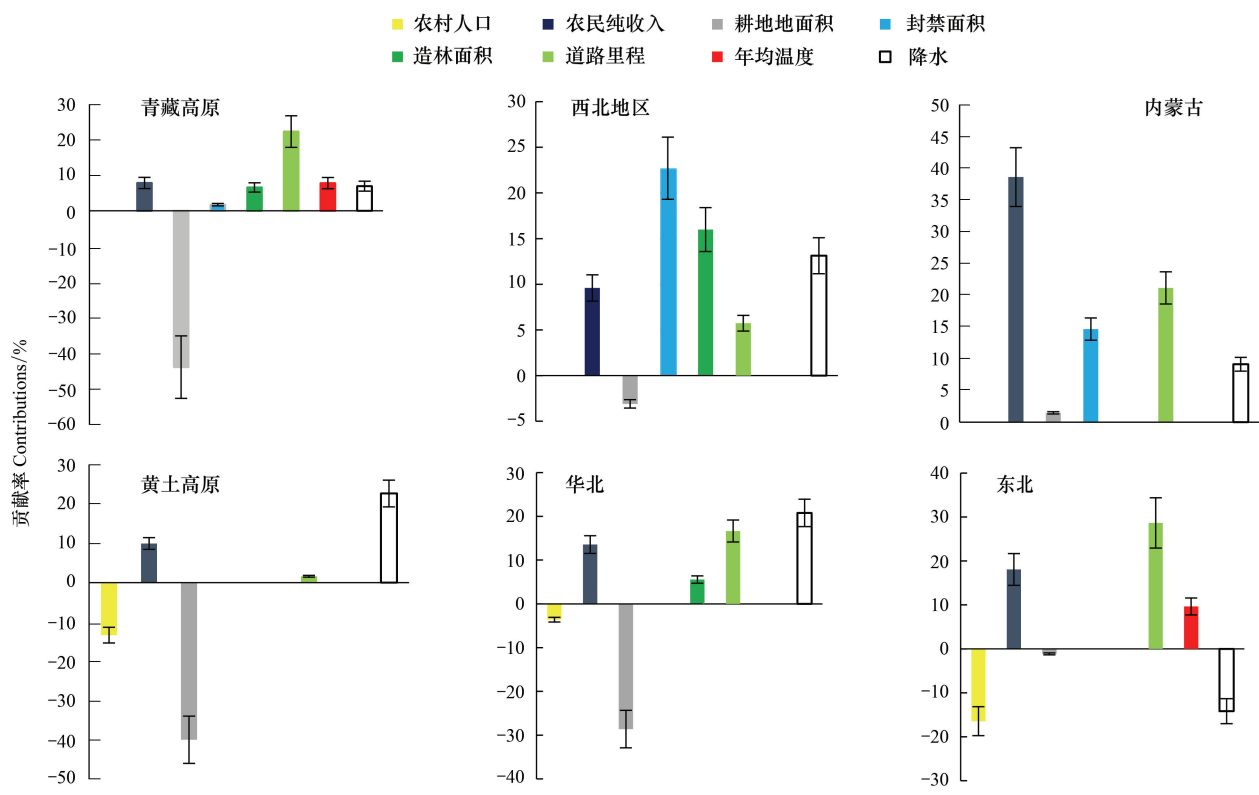


图 1 各因素对不同地区本年度植被变化的影响力

Fig.1 Contributions of the driving factors to vegetation cover changes at current year

研究结果表明, 植被修复过程受地理因素的影响, 地理分异特征明显。如图 1 显示, 各个因素在不同地区对 NDVI 的影响是不同的。降水对寒冷的东北地区当年的 NDVI 变化造成了负面影响, 而对其他地区的影响是正面的 ($P < 0.05$); 封山禁牧对西部的青藏高原、西北干旱地区、以及内蒙古牧区植被变化的影响是正面的

($P<0.05$),对其他地区的影响并不显著;气候变暖对寒冷的青藏高原和东北地区本年度植被变化的影响是正面的($P<0.05$),对其他地区的影响并不显著。同时,各地区的主导因素也不同,退耕是青藏高原、黄土高原、华北平原本年度植被修复的第一要素;封山禁牧、农牧民收入增长、道路与矿区绿化分别是西部干旱地区、内蒙古草原、东北地区本年度植被修复的最大贡献者。

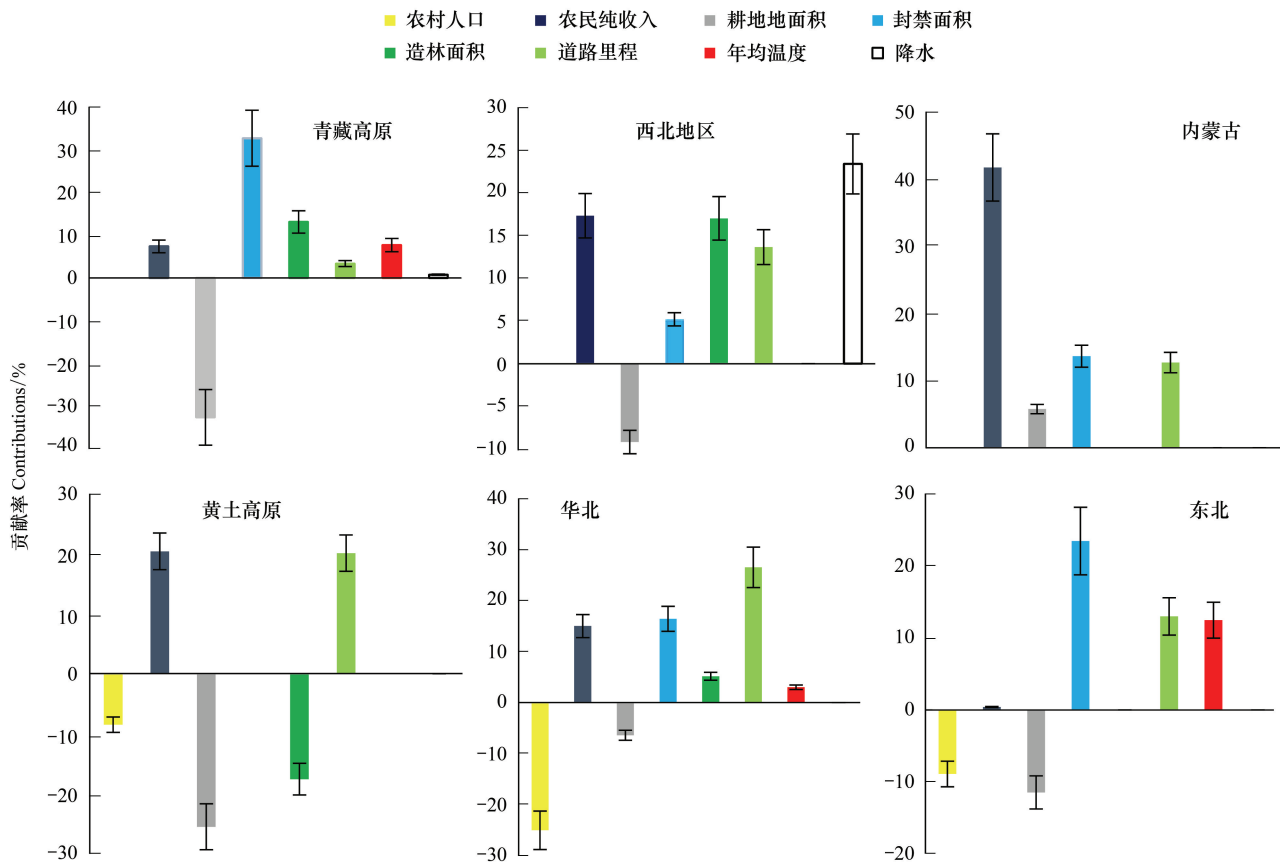


图2 各因素对不同地区第2年植被变化的影响力

Fig.2 Contributions of the driving factors to vegetation cover changes at second year

图2和图3结果显示,时滞效应是普遍现象,并且地理差异显著。气候因素对植被变化的时滞效应在寒冷地区和干旱地区表现突出($P<0.05$),其他地域的时滞效应不明显;社会因素的时滞效应持续时间长,其中封山禁牧自然修复政策的时滞效应最为突出($P<0.01$),是西部草原区植被修复的主导因素;对华北和东北地区来说,城市化和生态移民对植被修复的贡献在第3年后逐步显现($P<0.05$)。

4 讨论

长期研究结果表明,消除贫困与生态修复同等重要^[31]。对于生态脆弱地区的农民而言,环境恶化与贫困化相互促进,形成的“贫困陷阱(即越穷越垦,越垦越穷)”像魔咒一样困扰着这类地区的人类活动发展^[32]。通过消除贫困、改善当地居民生计,从而实现保护环境的目的,是可持续发展的长期策略^[33]。荒漠化地区生态系统的脆弱性、现代技术缺乏、自然灾害频繁,所有这些因素导致了极低的资本投入、落后的技术和不完善的教育,进一步加剧了环境退化^[34-35]。正如研究结果所示(表1),我国三北地区人类活动因素对NDVI所产生的影响比气候因素更强,对当年植被修复的贡献为58.2%,对第3年植被修复的贡献为90.4%。气候因素的直接作用与植物生长,对当年植被变化的贡献高达41.8%,对以后年度的影响有限(也就是说,今年的气候变化,对明年和后年植被的影响不显著);而农村人口变化的影响会渐渐地反映在自然生态系统的演替中,人口迁移了,以后就不再扰动土地了,所以对第2、第3年植被恢复更有帮助。因此,当年人口减少会对第3年

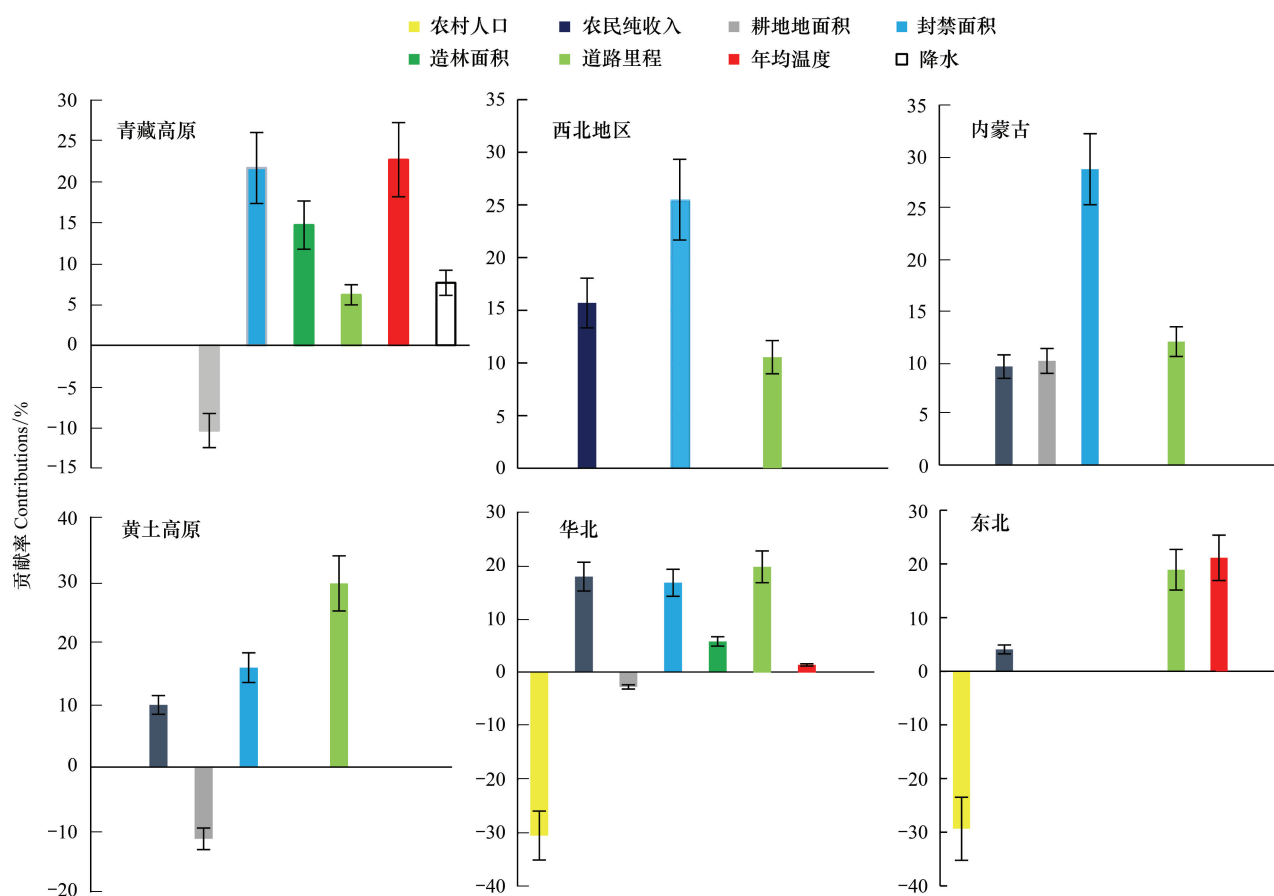


图3 各因素对不同地区第3年植被变化的影响力

Fig.3 Contributions of the driving factors to vegetation cover changes at third year

NDVI 的增长做出较大贡献,从第1年不足10%到第3年的32%。由此可见,基于成本效益分析的生态政策模式必须同时具有消除贫困和改善环境的双重功效^[36]。政府在开展生态修复项目时,必须充分考虑当地居民的人类活动诉求,必须提供足够的补偿或向其提供其他可行的就业方案^[37],如果不能采取有效措施解决当地居民的生计问题,那么保护环境也就只是一句空话。

植被变化是多种因素共同作用的结果,耕作、放牧、采伐、人工造林、以及其他各种人类活动、气候变化均会产生影响^[7-9, 38]。农村人口减少、耕地减少等因素无疑减少了人类对自然环境的扰动,给植被恢复提供了机会(表1)。这也在一定程度上解释了为什么退耕是青藏高原、黄土高原、华北平原本年度植被修复的第一要素(图1)。同时,农村人口的变化意味着劳动力供给的变化,农村劳动力是农作、造林、绿化、放牧的直接参与者^[39]。因此,农村人口的贡献会因为不同地区的环保策略不同表现出不同的效果。在西部干旱地区,过度放牧是植被退化的主要因素,封山禁牧是地该区本年度植被修复的最大贡献者(图1);寒冷和干旱的气候条件影响植物的生产效率,也必然制约生态系统的修复进程,这些地区的植被对气候因素变化的响应迟钝,时滞效应比其他地区明显(图2—图3)。

生态系统复杂多变,荒漠化地区的植被变化是多种因素交互作用的结果^[40-41]。如降水对于干旱少雨的西部干旱地区无疑是植被修复的甘露,但对积温不足的东北地区,降水增加会减少光照,影响植物的光和作用,这就是为什么降水对寒冷的东北地区当年的NDVI变化造成了负面影响,而对其他地区的影响是正面的(图2)。对整个三北地区来说,人工造林措施对NDVI的影响力仅为0.6%—3.4%(表1),这意味着人工造林这种过于简单化的解决方案对面积广大人口稀少的干旱地区退化生态系统修复的作用是有限的。干旱地区的植树造林通常需要灌溉才能存活^[39],树木的蒸散发进一步增加了土壤水分消耗,这使本来就有限的水资源更加

紧张^[19]。短期内造林所产生的积极作用会被水资源的长期消耗带来的消极作用所抵消^[42-43]。不同地区之间的巨大差异有力证明了地理差异对生态修复的巨大影响。因此,尊重地方差异,在不同地区采取因地制宜的差异性策略是未来环境政策研究和制定的重要方向。只有这样,才有可找到行之有效的解决方案。

植物需要时间进行光合作用,土壤需要时间积累养分供植物生长发育。相对于自然因素(如降水、光照)直接作用于植物的生长发育,人工措施对生态系统的影响是渐渐的,需要较长时间的响应过程,这很好地说明了人类活动的时滞效应。正因为存在时滞效应,政策制定和土地管理需要有足够耐心监测和研究不同措施的效果^[25]。在全球气候变化、环境退化、自然与社会生态系统日益脆弱化的大背景下,人类更加需要负有弹性的解决方案^[44]。这进一步说明生态修复需要全面了解气候变化和人类活动之间的交互作用,从而针对这些因素的交互作用制定出切实可行的政策措施。环境修复只有将人类行为和环境条件紧密联系在一起才能获得成功。因此,生态项目应该能够达到生态修复和社会进步的双重目标,并且不折中其中任何一个目标。

5 结束语

生态系统的表现是气候变化和人类活动共同作用的结果,这就要求相关研究的方法必须具备跨学科研究的能力。大数据分析为跨学科量化研究提供了可能,是环境政策学研究的重要方向。该研究以省、市、自治区为计量单位,并按照自然条件进行区域划分,满足了大样本分析的数据要求,并获得了容易解释的结果。如果能将尺度缩小到县级尺度,不仅可以增加样本数量,同时可以进行更加合理的区域划分,理论上讲应该更加科学。这样做存在的问题是数据获取困难,研究成本高。该研究首次尝试把两个彼此分离的学科用数学方法进行融合,探索大数据分析方法在生态政策评价中应用可行性,由于资料有限,研究结果不免有些粗糙。开展县域尺度的量化是未来研究的重要方向。

参考文献 (References):

- [1] Fernández R J. Do humans create deserts? *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, 17(1): 6-7.
- [2] Liu J G, Ouyang Z Y, Pimm S L, Raven P H, Wang X K, Miao H, Han N Y. Protecting China's biodiversity. *Science*, 2003, 300(5623): 1240-1241.
- [3] Sivakumar M V K. Interactions between climate and desertification. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2/4): 143-155.
- [4] D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, Ravib S, Runyan C W. Global desertification: drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 326-344.
- [5] Cyranoski D. Asian nations unite to fight dust storms. *Nature*, 2009, doi: 10.1038/news.2009.371.
- [6] Olukoye G A, Kinyamario J I. Community participation in the rehabilitation of a sand dune environment in Kenya. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(4): 397-409.
- [7] 石正国, 延晓冬, 尹崇华, 王召民. 人类土地利用的历史变化对气候的影响. *科学通报*, 2007, 52(12): 1436-1444.
- [8] 马迪, 刘征宇, 吕世华, Notaro M, 容新尧, 陈广善, 王富瑶. 东亚季风区植被变化对局地气候的短期影响. *科学通报*, 2013, 58(17): 1661-1669.
- [9] 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. *山地学报*, 2014, 32(1): 38-45.
- [10] 孙晓鹏, 王天明, 寇小军, 葛剑平. 黄土高原泾河流域长时间序列的归一化植被指数动态变化及其驱动因素分析. *植物生态学报*, 2012, 36(6): 511-521.
- [11] 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. *生态学报*, 2014, 34(12): 3425-3434.
- [12] 韦振锋, 王德光, 张翀, 刘宪锋, 张晗. 1999-2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1665-1670.
- [13] Ma H, Lv Y, Li H X. Complexity of ecological restoration in China. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 75-78.
- [14] 高冠龙, 张小由, 鱼腾飞, 李小琴. 1987-2008 年额济纳绿洲土地覆被变化及其驱动机制. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 821-829.
- [15] Marland G, Pielke R A Sr, Apps M, Avissar R, Betts R A, Davis K J, Frumhoff P C, Jackson S T, Joyce L A, Kauppi P, Katzenberger J, MacDicken K G, Neilson R P, Niles J O, Niyogi D S, Norby R J, Pena N, Sampson N, Xue Y K. The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy. *Climate Policy*, 2003, 3(2): 149-157.
- [16] Zhou H J, Van Rompaey A, Wang J A. Detecting the impact of the "Grain for Green" program on the mean annual vegetation cover in the Shaanxi province, China using SPOT-VGT NDVI data. *Land Use Policy*, 2009, 26(4): 954-960.

- [17] Zhao H L, Zhao X Y, Zhou R L, Zhang T H, Drake S. Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(2): 309-319.
- [18] Zheng Y R, Xie Z X, Robert C, Jiang L H, Shimizu H. Did climate drive ecosystem change and induce desertification in Otindag sandy land, China over the past 40 years? *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(3): 523-541.
- [19] Wang X M, Chen F H, Hasi E, Li J C. Desertification in China: an assessment. *Earth-Science Reviews*, 2008, 88(3/4): 188-206.
- [20] Wang X M, Zhang C X, Hasi E, Dong Z B. Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China? *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 13-22.
- [21] 温亚利, 陈丽荣. 退耕还林政策的经济理论分析. *林业经济*, 2003, (9): 32-34.
- [22] Liu J G. China's road to sustainability. *Science*, 2010, 328(5974): 50-50.
- [23] Suding K N, Gross K L, Houseman G R. Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends in Ecology Evolution*, 2004, 19(1): 46-53.
- [24] 吕一河, 傅伯杰, 陈利顶. 生态建设的理论分析. *生态学报*, 2006, 26(11): 3891-3897.
- [25] Cao S X. Impact of China's large-scale ecological restoration program on the environment and society in arid and semiarid areas of China: achievements, problems, synthesis, and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(4): 317-335.
- [26] Runnström M C. Is northern China winning the battle against desertification? Satellite remote sensing as a tool to study biomass trends on the Ordos plateau in semiarid China. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(8): 468-476.
- [27] Wang G Y, Innes J L, Lei J F, Dai S Y, Wu S W. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318(5856): 1556-1557.
- [28] 国家林业局. 中国林业统计年鉴. 北京: 国家林业出版社, 2014.
- [29] McVicar T R, Li L T, Van Niel T G, Zhang L, Li R, Yang Q K, Zhang X P, Mu X M, Wen Z M, Liu W Z, Zhao Y A, Gao P. Developing a decision support tool for China's re-vegetation program: simulating regional impacts of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1/2): 65-81.
- [30] Wang X H, Lu C H, Fang J F, Shen Y C. Implications for development of grain-for-green policy based on cropland suitability evaluation in desertification-affected north China. *Land Use Policy*, 2007, 24(2): 417-424.
- [31] Tallis H, Kareiva P, Marvier M, Chang A. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9457-9464.
- [32] Cao S X, Zhong B L, Yue H, Zheng H S, Zeng J H. Development and testing of a sustainable environmental restoration policy on eradicating the poverty trap in China's Changting County. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(26): 10712-10716.
- [33] 毛锋, 曾香. 生态补偿的机理与准则. *生态学报*, 2006, 26(11): 3841-3846.
- [34] Kates R W, Dasgupta P. African poverty: A grand challenge for sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(43): 16747-16750.
- [35] 许端阳, 佟贺丰, 李春蕾, 任红艳, 胡云锋. 耦合自然——人文因素的沙漠化动态系统动力学模型. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 267-275.
- [36] Agudelo C, Rivera B, Tapasco J, Estrada R. Designing policies to reduce rural poverty and environmental degradation in a hillside zone of the Colombian Andes. *World Development*, 2003, 31(11): 1921-1931.
- [37] Gong C, Xu C G, Chen L, Cao S X. Cost-effective compensation payments: a model based on buying green cover to sustain ecological restoration. *Forest Policy and Economics*, 2012, 14(1): 143-147.
- [38] Yang H. Land conservation campaign in China: integrated management, local participation and food supply option. *Geoforum*, 2004, 35(4): 507-518.
- [39] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, Pockman W T, Wall D H. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, 418(6898): 623-625.
- [40] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [41] Zeng N, Ding Y H, Pan J H, Wang H J, Gregg J. Climate change--the Chinese challenge. *Science*, 2008, 319(5864): 730-731.
- [42] Qu J J, Cao S X, Li G S, Niu Q H, Feng Q. Conservation of natural and cultural heritage in Dunhuang, China. *Gondwana Research*, 2014, 26(3/4): 1216-1221.
- [43] Cao S X, Zhang J Z. Political Risks arising from the impacts of large-scale afforestation on water resources of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 2015, 28(2): 898-903.
- [44] Harris S E. Cyprus as a degraded landscape or resilient environment in the wake of colonial intrusion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(10): 3670-3675.