



DOI: 10.5846/stxb202105111233

陈珊珊, 温兆飞, 马茂华, 廖桃, 周旭, 吴胜军. 气候变化背景下定量解析生态工程对植被动态的影响研究方法概述. 生态学报, 2022, 42(15): 6439-6449.

# 气候变化背景下定量解析生态工程对植被动态的影响研究方法概述

陈珊珊<sup>1,2</sup>, 温兆飞<sup>2,\*</sup>, 马茂华<sup>2</sup>, 廖桃<sup>2,3</sup>, 周旭<sup>2,3</sup>, 吴胜军<sup>2</sup>

1 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074

2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714

3 重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074

**摘要:** 植被动态变化受气候和人类活动双重作用力的驱动。在气候变化的背景下, 如何定量剖析人类活动在植被动态变化中的作用力, 对增加植被生态系统碳储量和缓解气候变化具有重要意义。随着生态文明建设和环境保护意识的加强, 就植被生态系统而言, 生态工程作为一项巨大的人类活动, 对植被影响的广度和深度日益加强。系统分析气候变化背景下生态工程对植被的生态效应影响, 对后期生态恢复措施的制定和实施具有十分重要的理论指导意义。虽已有一些生态工程对植被影响的量化研究方法, 但不同方法之间的结果难以进行比较研究。比较探讨各定量研究方法的优缺点有利于推动植被驱动机制的研究, 有助于恢复生态学 and 人类生态学的应用和发展。系统梳理了定量研究生态工程对植被动态的影响主要研究方法: 回归分析、残差趋势分析、基于生物物理过程模型方法和阈值分割方法。对比发现, 基于生物物理过程模型方法具有较高的应用潜力, 趋势分析方法和阈值分割方法仍需进一步完善。目前, 定量剖析生态工程对植被变化的影响研究主要侧重于模型模拟, 野外实证研究和模型验证较为缺乏, 是恢复生态学未来研究的重点和难点之一。

**关键词:** 定量研究; 生态工程; 植被变化; 气候变化; 人类活动

陆地植被是大气圈、岩石圈、土壤圈、水圈和生物圈相互作用的产物<sup>[1-2]</sup>。它是连接气候变化、人类活动和生态系统的重要环节, 在调节气候系统和陆地碳平衡方面发挥着重要作用, 植被变化能够反映生态环境的总体状况<sup>[3]</sup>。归一化差值植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI)、植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 和植被覆盖度等指标是表征生态系统功能的重要参数, 此外, 植被净初级生产力也是陆地生态系统碳循环和生态系统质量的重要指标。在量化气候变化和人类活动对植被影响的研究中, 它们被广泛应用<sup>[4-6]</sup>。

气候变化和人类活动对植被动态和影响机制的研究是生态学研究热点问题。植被动态变化是气候变化、人类活动及其两者交互作用的结果<sup>[7]</sup>。人类活动是控制和影响植被时空分布及其变化的基本驱动力之一。就植被生态系统而言, 生态工程是一项巨大的人类活动, 是植被恢复和生态环境友好型转变的重要推动力。随着生态工程实施范围的扩大和力度的加强, 及生态工程期限的延长, 生态工程对植被动态正面或负面影响具有很大的不确定性, 和在气候变化背景下生态工程对植被影响的主要驱动机制是不清楚的, 使得学者越来越关注生态工程在植被动态变化中机制作用和效应。更为重要的是, 全球的气候变化如何影响着流域尺

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项 A 美丽中国子课题 (XDA23040303); 国家自然科学基金项目 (51779241); 三峡库区消落区 (重庆段) 生态环境调查及生态恢复技术示范项目 (5000002021BF40001)

收稿日期: 2021-05-11; 网络出版日期: 2022-04-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenzhaofei@cigit.ac.cn

度、区域尺度和全球尺度上的生态工程对植被动态变化效应<sup>[8-10]</sup>。对气候因素和人为因素进行剥离,定量地厘清长期的大规模的生态工程在植被动态变化中的作用显得尤其重要。

当前关于定量的分析生态工程对植被动态变化影响的研究方法大致有 4 类<sup>[11-14]</sup>,这对进一步深化理解生态工程在植被变化过程中作用的具有重要意义<sup>[11,15]</sup>。然而,不同研究方法得出的结果差异较大,且难以进行研究间对比分析。为了后期更好的研究人类活动对植被动态的影响,有必要对已有的定量研究方法进行系统化的梳理和综述,而目前还没有系统的研究。此外,系统性的比较探讨各研究方法的优缺点有利于推动植被驱动机制的研究,也有助于这些定量研究方法的应用和发展。本文旨在通过梳理国内外研究生态工程对植被变化影响所运用的研究方法,分析这些方法中存在的问题,以期为进一步系统评价生态工程在植被变化过程中的相对作用提供理论参考,为后期有效开展生态恢复提供科学意见。

## 1 数据收集和处理

对中文文献的统计,在中国知网(CNKI)检索中国期刊学术期全文数据库,以高级检索的形式进行检索,首先以“主题”为检索项,以“植被”,“NDVI”,“NPP”,“EVI”,“森林”,“草原”为检索词,搜索的时间范围限制在 1980 到 2020 年。其次在搜索出来的结果中进行筛选,筛选的检索条件为:摘要中是否有生态工程(退耕还林、天然林保护、三北防护林等)or 生态恢复 and 气候,共检索到 246 篇。最后根据摘要是否出现生态工程和气候因素分别对植被影响的定量数据进行筛选,符合条件的有 34 篇。

外文文献的搜集,在 Web of science 平台中以 SCI 数据库为数据源,根据主题词“human AND climate AND vegetation”;“human AND climate AND EVI”;“human AND climate AND net primary productivity”;“human AND climate AND grassland”;“human AND climatic AND NDVI”共检索到 193 篇,根据摘要是否出现生态工程和气候因素分别对植被影响的定量数据进行筛选,符合条件的有 40 篇<sup>[1,8,10,12]</sup>。中英文文献检索及引用信息查询的截止时间是 2020 年 9 月。

## 2 研究区分类

根据生态脆弱区、敏感区、生态工程区,对研究区进行统计分析(图 1),发现研究多集中于黄土高原区<sup>[4,10,16-20]</sup>,三江源区<sup>[21-24]</sup>,岩溶喀斯特地貌区<sup>[12,25-26]</sup>和长江流域<sup>[8,27]</sup>等区域,其中黄土高原和三江源研究频次最高,其次是西南喀斯特地貌区、长江流域和以全国为尺度的研究。研究区集中于这些地区主要是因为它们的生态脆弱性和生态敏感性,同时这些地区都是生态工程重点实施区域。

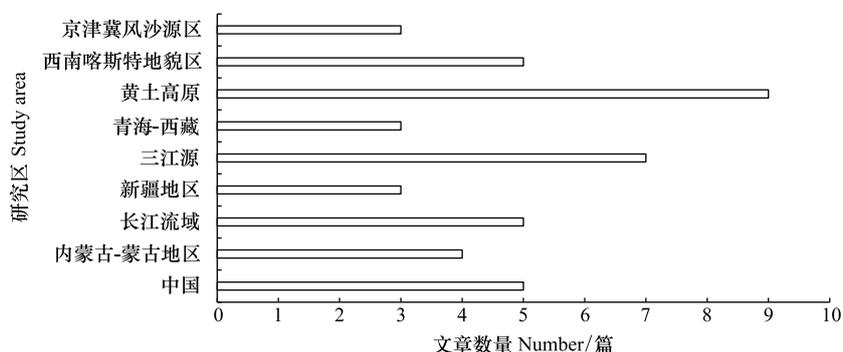


图 1 研究区统计分布图

Fig.1 Study area statistics

## 3 定量的研究方法进展

大量研究阐明了以气候为导向或以人类活动为导向的植被动态变化<sup>[16-17]</sup>,并量化了气候和生态工程对

特定区域植被生态系统的影响<sup>[18]</sup>。定量分析指的是将人类活动作为自变量,植被指标(NDVI, NPP 和 EVI 等)作为因变量,建立两者之间的函数关系式,定量分析人类活动对植被变化的贡献。目前定量分析气候和生态工程因素对植被动态影响的方法有四大类:(1)基于回归模型的方法;(2)基于残差趋势分析方法;(3)基于生物物理模型的方法;(4)阈值分割方法。

### 3.1 回归模型

回归分析方法是数理统计上常规的一种分析方法,分别建立植被指标与各气候因子(气温、降水)或人为因素指标(土地利用、植被面积和人口)之间的相关关系,从而分析各要素的相对作用。如周锡饮等基于蒙古高原不同时期的土地利用转换率,利用回归模型方法定量分析的人类活动对植被变化的影响,得出在气候条件相似地区,人工造林等人类活动是导致植被时间序列变化趋势产生一定区域差异的原因<sup>[17]</sup>。王子玉等以人口、城镇化率和人工造林等指示人类活动对内蒙古地区的植被变化与人类活动和气候因素之间的关系进行分析,得出在植被显著减少区域主要受降水、风速、人工造林和农作物播种面积的共同影响<sup>[15]</sup>。

回归分析的优势在于数据易获取且操作简单,并能在一定程度空间化的表达气候因子(气温、降水、辐射)和人类活动(放牧、道路建设、生态工程建设、城镇化等)对植被变化的贡献,因此这一方法在分析植被变化原因时比较常用。但其不足在于它有两个前提假设:(1)影响植被各要素之间是相互独立的;(2)植被变化与各因子之间是简单的线性关系,然而植被对外界的响应是非线性和非稳态的,例如植被变化对时间具有相对滞后性。考虑到空间数据一般具有空间非平稳性特征,有学者在全局模型的基础上提出了地理加权回归。考虑样本空间地理位置的地理加权回归模型可以有效改进变量间相互关系的空间非平稳性,能有效克服地理要素具有显著的空间异质性问题<sup>[25]</sup>。地理加权回归改善自变量之间的空间非平稳性问题,但还是在因变量与自变量是线性关系的基础上进行的研究。

为了更好的揭示植被与环境要素的复杂关系,一些学者将能模拟输入、输出数据间复杂关系的 BP 人工神经网络(Back-propagation Neural Network, BPNN)和随机森林回归模型应用于分析生态工程对植被动态变化的影响<sup>[6,28-30]</sup>。其中,BPNN 能够模拟植被指标与影响因子之间的复杂关系,通过将研究时段划分为基准期和改变期,获取两个时期的模拟值,用差值法量化生态工程对植被 NDVI 变化的贡献率。

### 3.2 残差趋势分析

残差趋势分析方法是基于植被指标与气候因子之间具有相关关系的条件下,运用模型模拟无人人类活动干扰的情况下植被的变化状况与实际变化情况的差异表示人类活动对植被的影响,并通过残差趋势变化分析人类活动对植被的作用<sup>[12,31]</sup>。旨在从影响植被变化的综合因素中识别出人类活动影响的植被变化区域和厘清人类活动对植被变化的贡献。

残差趋势分析方法是运用 NDVI 指标分析气候和人类活动对植被动态变化影响最具代表性的研究方法,对分析人类活动对植被的影响具有里程碑式的意义。Evans 提出的残差趋势分析方法首先将区域内每个像元的 NDVI 与气温、降水等气候因子建立回归模型,并将 NDVI 与气候因子建立的模型称之为 NDVI-climate model,之后利用建立的回归模型得到像元尺度年 NDVI 最大值,进而得到真实值与预测值之间的残差序列值<sup>[20]</sup>。NDVI 残差序列值消除了气候变化对 NDVI 的影响,它的趋势变化能够反映人类活动对植被的影响。如果残差随时间序列无明显变化(残差近似为零),则认为植被变化是由气候要素引起的;残差序列的变化趋势是正的,则表明人类活动对区域植被起着改善和恢复作用;反之,残差序列的变化趋势是负的,则表明人类活动对区域植被起到破坏作用。

残差趋势分析方法的优势:一是可以将影响植被变化的气候因子与人类活动要素区分开来;二是证明基于单个像元建立的局部回归模型的相关系数普遍高于针对研究区所有像元建立的全局回归模型的相关系数,从单个像元出发的局部模型考虑了区域地理位置可能存在的地貌、水文、土壤和植被的空间异质性对 NDVI-气候关系的影响。三是获取长时间大范围植被变化的气候和人类活动的相对贡献。但它也存在不足之处,一是对气候要素的选取和植被对气候因子响应上的滞后效应考虑不足;二是未建立未退化时间段的 NDVI;三是

建立的前提假设是基于 NDVI 与气候要素之间是一种线性的稳态的关系,但实际上 NDVI 与气候因子之间是非线性非稳态关系<sup>[32]</sup>,需要考虑时间尺度效应和空间异质性。

自 Evans 提出残差趋势分析方法后,之后的学者对其进行了很大的改善。一是根据区域气候特征和区域植被生长的限制因子选取气候要素,在气候因子选取上进行了本地化处理<sup>[33-34]</sup>;且考虑了研究区植被是否对气候响应具有滞后效应<sup>[9,35]</sup>,选取相应月份的气候数据。二是对残差序列的分析,不再简单的使用差值法,而是对其进行线性回归分析,改进后的残差趋势分析方法旨在从受气候和人类活动双重作用的植被中分离出人类活动对其动态变化的贡献率<sup>[8, 12, 27]</sup>。例如,李辉霞等<sup>[21]</sup>、修丽娜等<sup>[4]</sup>和章维鑫等<sup>[2]</sup>是在栅格像元的基础上建立 NDVI 与气候因子之间的回归模型,运用残差值的正负表示生态工程对三江源地区、黄土高原和西南石漠化地区植被动态变化的影响。Li 等<sup>[24]</sup>和 Tong 等<sup>[12]</sup>运用改进的残差趋势分析方法探索以生态工程为主的人为因素在西南喀斯特地区生态恢复中的作用。三是针对长时间序列的植被变化,运用突变检验方法寻找 NDVI 发生突变的时间点,以该时间点划分参考期(用于建立 NDVI-climate model,认为人类活动对植被的影响可以忽略)和预测期<sup>[5, 8, 12, 21, 27]</sup>(表 1);或直接根据生态工程执行的时间点划分时期<sup>[2, 26]</sup>。另外,针对短时间序列的植被变化,将单个栅格像元一定时间内最大的 NDVI 值看作是受人类活动干扰最小的状态,以此为基准状态建立像元尺度的 NDVI-climate 模型。四是考虑了植被与气候之间非线性关系,运用集合经验模态分解,在多时间尺度上分析植被与气候要素之间的关系,在此基础上,运用残差趋势分析方法揭示人类活动对植被变化的贡献率<sup>[9]</sup>(表 1)。此外,NDVI-climate model 不再局限于一次回归方程,例如 Wang 等运用了二次回归方程构建 NDVI-climate model<sup>[36]</sup>和 Zhang 等对 NDVI-climate model 中的自变量降水进行了自然对数转换<sup>[40]</sup>,以便更为准确的描述植被与气候之间的非线性关系。

生态工程主要通过两种方式作用于植被生态系统,即直接的造林改变土地覆被和生态管理(封山育林、低效林改造和森林抚育)改善森林健康状况。洪辛茜从土地利用变化的角度分析生态工程区 NPP 转移变化量<sup>[41]</sup>,但对气候变化因素的考虑不足。在未来是否可以从土地利用覆盖变化角度出发,将植被划分为两大类:从耕地和荒地转入的植被和原有植被。人工造林形成的植被在初期主要受到生态工程影响,后期受气候和人类活动双重作用,而原有植被受到气候和人类活动双重影响,在此基础上运用残差趋势分析方法,在预测期输入的气候数据使用美国国家环境预报中心(NCEP)再分析气候数据,NCEP 数据没有考虑地表覆盖变化的,用实际值 NDVI 值减去预测 NDVI 值得到的时间序列残差进行线性分析,从而从气候因素中剥离出生态工程对植被变化的相对贡献。通过利用再分析气候数据和土地利用转移矩阵可以得到不同生态恢复方式对植被动态变化的贡献。

表 1 基于 NDVI-气候模型的残差趋势分析方法

Table 1 Residual analysis method based on NDVI-climate model

研究时间 Periods	研究区 Study area	模拟时间 Simulation time	预测时间 Predicted time	气候因子 Climate factors	植被指数 Vegetation indices	作者 Authors
1982—2015	长江流域	1982—1994	1995—2015	气温, 降水	NDVI (4—11 月)	Qu 等 <sup>[27]</sup>
1982—2015	丝绸之路经济带	1982—2015	1982—2015	气温, 降水	年 NDVI	Qi 等 <sup>[9]</sup>
2000—2010	南方丘陵区	2000—2010	2000—2010	气温, 降水, 日照	生长季 NDVI	Wang 等 <sup>[36]</sup>
1982—2014	京津冀风沙源区	1982—2014	1982—2014	气温, 降水, 蒸散	年 NDVI	于璐等 <sup>[37]</sup>
1990—2015	黄土高原	1990—2015	1990—2015	气温, 降水	NDVI>0.1 (4—10 月)	修丽娜等 <sup>[4]</sup>
2000—2016	贵州高原	2000—2004	2000—2016	气温, 降水	NDVI (5—9 月)	张继等 <sup>[5]</sup>
2001—2010	三江源	1998—2000	2001—2010	气温, 降水	年 NDVI	Li 等 <sup>[21]</sup>
1998—2008	西南喀斯特地貌区	1998—2001	2002—2008	气温, 降水	年 NDVI	李昊等 <sup>[26]</sup>
1986—2016	云南省	1986—2000	2000—2016	气温, 降水	NDVI (4—5 月)	章维鑫等 <sup>[2]</sup>
1982—2011	西南喀斯特地貌区	1982—2000	2001—2012	气温, 降水	NDVI (4—10 月)	Tong 等 <sup>[12]</sup>
2000—2010	河西走廊	2000—2010	2000—2010	气温, 降水	年 NDVI	Guan 等 <sup>[38]</sup>
2000—2015	重庆	2000—2015	2000—2015	气温, 降水	NDVI (4—11 月)	Liu 等 <sup>[39]</sup>

### 3.3 基于生物物理过程模型方法

NPP 是植物在单位时间和单位面积上,通过光合作用产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,通常以干质量表示<sup>[13,42]</sup>。分析生态工程对植被的影响,除了 NDVI 和 EVI 外,NPP 也可反映植被动态变化。因此在分析生态工程对植被变化的影响时,NPP 也成为常用的指示植被变化的指标。于是 NPP 指标也被用于分析生态工程对植被生态系统产生的影响,尤其是将 NPP 指标应用到草原生态系统中。基于 NPP 指标分析方法是各个驱动因子对植被变化的影响结果分别用 NPP 表示,能够直观、真实地反映生态环境中植被的变化情况,从而确定各因子的相对作用,目前这一方法是研究生态工程对植被变化驱动机制的新途径(图 2)。

运用 NPP 指标分析生态工程对植被的影响从最初的回归分析到后来的偏导分析(方法 2)、人类活动 NPP (方法 3—4)和阈值分割方法(方法 5)(图 2)。回归分析是最常见的统计分析方法之一,在这里重点阐述方法 2、方法 3 和方法 5。偏导分析是建立 NPP 与气候要素(气温、降水和太阳辐射)之间的导数关系,用偏相关函数的残差(*uf*)表示人类活动对植被的影响(见公式 1)<sup>[23,43—44]</sup>,从而得到各气候因子和人类活动对植被的贡献。与残差趋势分析方法相比,生物物理过程模型方法的优势在于对潜在 NPP 的模拟考虑了植被生长规律和对气候要素分析得更为深入。但也没有考虑气候因素与人类活动的交互作用。函数的残差中还可能包括函数的误差在内,用 *uf* 表示人类活动对植被的影响可能会高估人类活动对植被的作用。

$$\begin{aligned} \text{slope} &= C(\text{tem}) + C(\text{pre}) + C(\text{rad}) + uf \\ &= (\partial\text{NPP}/\partial\text{tem}) \times (\partial\text{tem}/\partial n) + (\partial\text{NPP}/\partial\text{pre}) \times (\partial\text{pre}/\partial n) + \\ &\quad (\partial\text{NPP}/\partial\text{rad}) \times (\partial\text{rad}/\partial n) + uf \end{aligned} \tag{1}$$

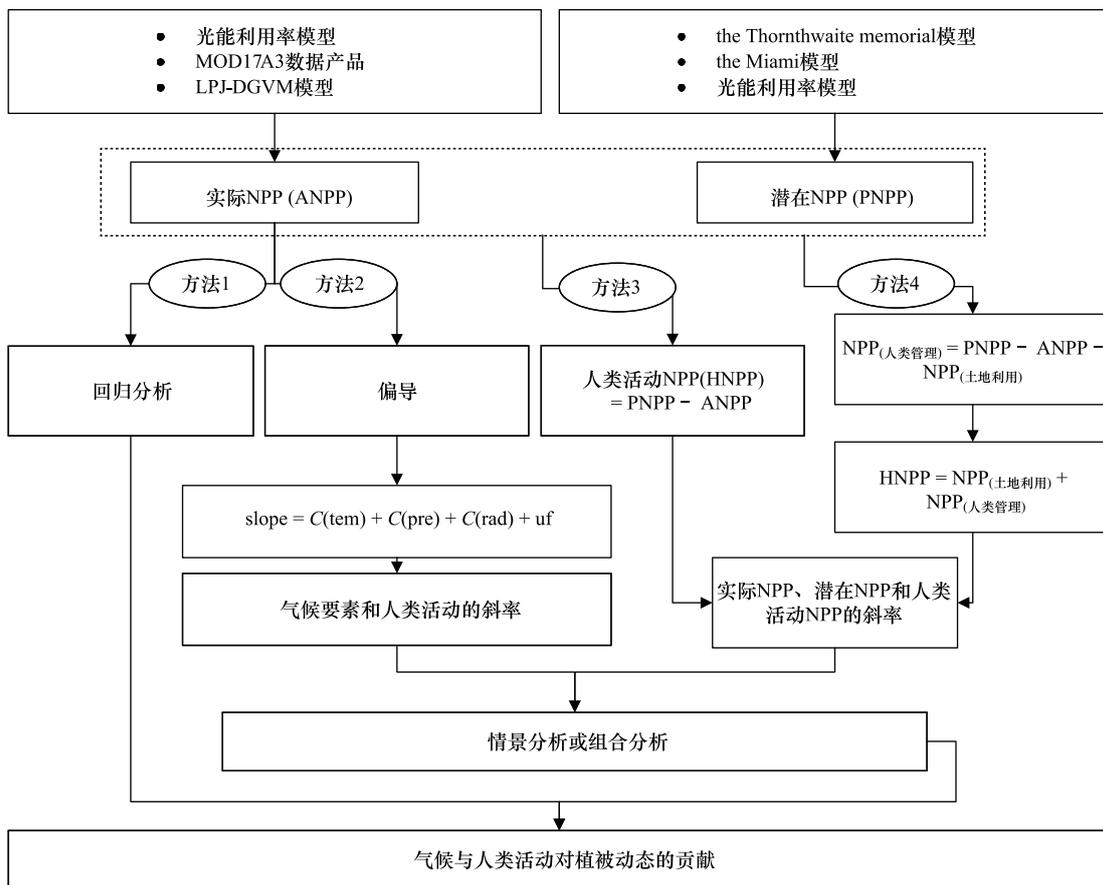


图 2 NPP 植被指数方法总结

Fig.2 NPP of methods summary

ANPP:实际植被净初级生产力 Actually net primary productivity;PNPP:潜在植被净初级生产力 Potential net primary productivity;HNPP:人类活动影响下的植被净初级生产力 Human activities dominated net primary productivity

slope 是实际 NPP 的年际变化率,  $C(\text{tem})$ ,  $C(\text{pre})$ ,  $C(\text{rad})$  分别为气温、降水和太阳辐射对 NPP 年际变化率的贡献,  $n$  是年数,  $\partial\text{NPP}/\partial\text{tem}$  是在不考虑降水和太阳辐射的情况, 运用偏相关分析得到 NPP 与 tem 的相关系数,  $\partial\text{tem}/\partial n$  表示气温随时间变化的系数。  $\partial\text{NPP}/\partial\text{pre}$  和  $\partial\text{NPP}/\partial\text{rad}$  与  $\partial\text{NPP}/\partial\text{tem}$  表示意思相似。  $uf$  为 NPP 变化率与气候因子贡献之间的残差, 表示未知因素对 NPP 贡献的变化率,  $uf$  既包含人为因素, 也包含一些不确定的自然因素(如自然灾害、病虫害等), 研究时一般假设前者占主导地位。

方法 3 是运用模型模拟只受气候变化影响下的植被变化 NPP, 以及用遥感产品数据或模型模拟实际变化状况下的植被变化 NPP, 用实际 NPP 减去潜在 NPP 的差值表示人类活动影响下的植被变化的 NPP, 之后对三种 NPP 进行趋势分析, 并设置情景分析, 区分气候要素、人类活动及气候要素和人类活动交互作用分别对植被变化的贡献(图 2)。实际 NPP 的计算主要采用的光能利用率模型(Carnegie-Ames-Stanford-Approach, CASA)<sup>[10,23,45]</sup>、基于过程的动态植被模型(Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model, LPJ-DGVM)<sup>[8]</sup>和遥感产品数据<sup>[46-48]</sup>; 潜在 NPP 主要运用模型进行估算, 大多采用 Miami 模型<sup>[18,49]</sup>及基于 Miami 模型优化的 Thornthwaite Memorial 模型<sup>[24,42,46-47]</sup>, 也有个别研究运用的是对 FPAR 参数进行修改的 CASA 模型<sup>[19,50]</sup>(表 2)。方法 3 是基于生物物理模型的方法, 它是一种广泛应用的精确方法, 利用基于过程的模拟模型计算潜在的和实际的净初级生产力, 以分离人类活动和气候变化对植被动态的影响<sup>[22,40,51]</sup>。但是, 该方法需要大量的植被生理参数和生态参数数据, 这可能会增加模型的不确定性。此外, 模型精度验证也受到限制, 现有的验证多采用通量塔数据、遥感产品数据和文献数据, 虽然对于木本植物而言, 年轮宽度和植株高度是指示新生生物量变化的常用方法, 但在研究森林生态系统生产力变化时, 很少用野外调查数据进行模型验证, 由于研究区域广泛, 获取野外监测数据难度大, 耗时费力。

表 2 基于 NPP 指标的研究方法

Table 2 Research methods based on NPP index

实际 NPP 模型 Actual NPP model	预测 NPP 模型 Predicted NPP Model	人类活动 NPP Human activities NPP	生态系统 Ecosystem	时间段 Periods	研究区 Study area	作者 Authors
CASA	-	uf	-	2000—2015	北方和青藏高原	Yan 等 <sup>[8]</sup>
LPJ-DGVM	-	uf	森林	1982—2013	长江流域	Zhang 等 <sup>[8]</sup>
CASA	-	uf	-	1982—2013	新疆	Jiang 等 <sup>[14]</sup>
CASA	TMD	PNPP-ANPP	草地	2000—2010	新疆北部	Yang 等 <sup>[51]</sup>
CASA	TMD	PNPP-ANPP	-	2001—2012	祁连山及周边地区	Teng 等 <sup>[52]</sup>
CASA	TMD	PNPP-ANPP	沙漠	2001—2014	青藏高原	Li 等 <sup>[24]</sup>
CASA	TMD	PNPP-ANPP	植被	1985—2015	中国	Naeem 等 <sup>[20]</sup>
MOD17A3	TMD	PNPP-ANPP	草地	2000—2013	中国	Yang 等 <sup>[25]</sup>
CASA	The Miami model	PNPP-ANPP	-	2000—2014	新疆	Zhang 等 <sup>[49]</sup>
MOD17A3	TMD	NPP <sub>(土地利用)</sub> +NPP <sub>(人类管理)</sub>	草地	2001—2014	蒙古高原	Zhang 等 <sup>[42]</sup>
CASA	TMD	PNPP-ANPP	-	2000—2015	生态脆弱区(5个)	Wang 等 <sup>[18]</sup>
MOD17A3	-	uf	-	2000—2015	中国喀斯特地区	Wu 等 <sup>[47]</sup>
CASA	TMD	PNPP-ANPP	-	2000—2015	横断山脉	Yin 等 <sup>[53]</sup>
CASA	-	uf	草地	1982—2012	三江源	Zhang 等 <sup>[23]</sup>
CASA	CASA (FPAR)	uf	植被	2001—2017	生态脆弱区	Shi 等 <sup>[19]</sup>
CASA	-	uf	草地	2000—2013	中国	Liu 等 <sup>[54]</sup>

TMD: Thornthwaite memorial 模型 The thornthwaite memorial model

另外, 就草原生态系统而言, 通常采用方法 4(图 3)定量分析生态工程对草地动态变化的影响。方法 4 原理和方法 3 基本一样, 和方法 3 的区别在于方法 4 将研究区的草原生态系统的 NPP 分为两大类: 发生土地利用类型转变的单元格的 NPP( $\text{NPP}_{\text{土地利用}}$ ), 未发生土地利用变化的单元格的 NPP( $\text{NPP}_{\text{人类管理}}$ ), 因此在方法 4 中将人类活动细分为人类管理的 NPP(如禁牧, 轮牧制度)和人类活动引起的土地利用变化的 NPP<sup>[36,42]</sup>(如

人工造林,人工种草)(图3)。与植被生态系统相比较而言,由于草原植被生物量年际变化大,时间跨度小,易获取等特点,使得获取草原生态系统的植被净初级生产力的验证数据相对容易,因此在分析生态工程对草原生态系统植被净初级生产力的影响时,学者可以将生态工程对草原动态的影响进行分类。现有研究草原生态系统植被变化的研究集中于内蒙古草原和青藏高原。

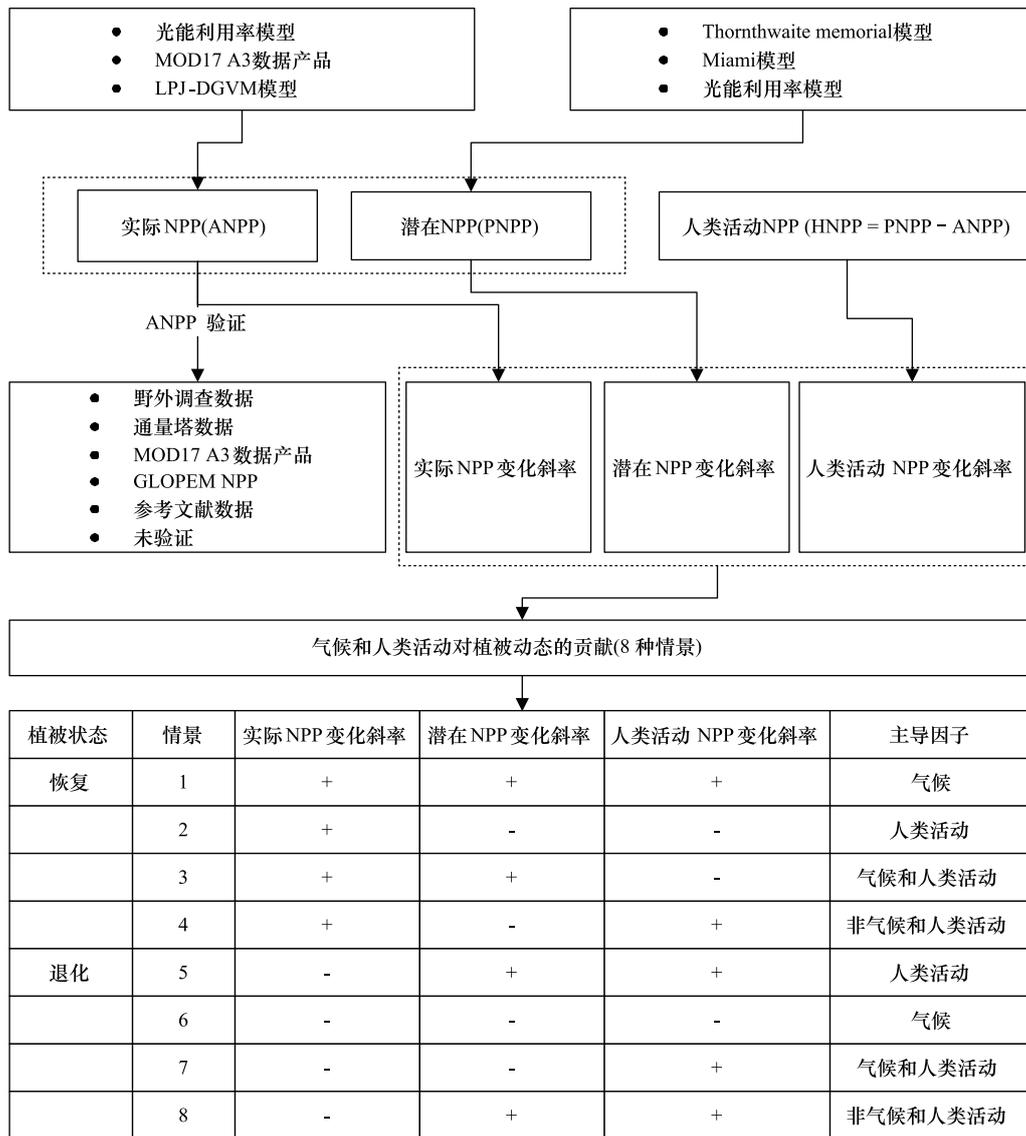


图3 方法流程图

Fig.3 Ideas of methods

### 3.4 阈值分割方法

尽管基于生物物理过程的模型方法可以准确反映植被动态和生态过程,但仍需要测量大量的植被生理和生态参数数据,模型验证困难<sup>[7]</sup>。阈值分割方法是运用统计相关分析去评估气候变化和生态工程对植被动态的相对贡献<sup>[14]</sup>的一种新方法,它已被用于检测干旱区的植被活动<sup>[55]</sup>。阈值分割方法的主要思想是根据植被指标的年变化速率的正负划分植被处于恢复状态,还是退化状态,然后再根据植被指标和气候因子的线性相关关系得出气候变化影响的NPP,气候和人类活动共同影响的NPP、人类活动影响的NPP以及生态工程影响的NPP(图4)。

阈值分割方法的优势和回归模型分析方法一样。这种方法虽然将生态工程对植被的影响与其它的人类

活动对植被的影响区分开来了,但这均以生态工程对植被变化起积极作用为前提。但是在实际上生态工程的实施效果和预想并不相统一。因为生态工程的效益还于执行区的立地条件、后期维护管理、投资和当地人民参与度相关。

综上所述,从影响植被的众多因素中,分解和剥离气候要素和人为要素对植被动态变化的贡献挑战在于:(1)植被和气候要素之间通常具有较大的年际变化;(2)气候要素和人为因素与植被生态过程的关系相当复杂,并不是简单的线性相关关系;(3)运用模型模拟气候和人类活动对植被的影响,模型验证很困难,尤其是验证森林生态系统的模拟值;(4)完善的分析方法仍然是缺乏的。

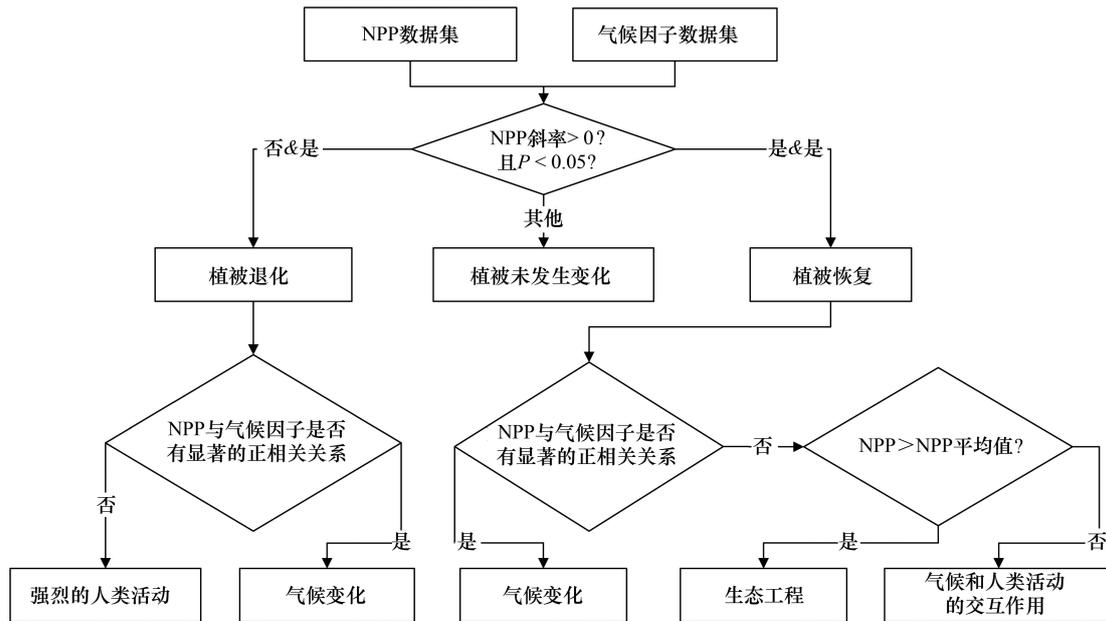


图4 阈值分割方法<sup>[20]</sup>(Jiang等,修改)

Fig.4 Threshold segmentation method<sup>[20]</sup>(Jiang et al., revised)

#### 4 展望

由于气候要素和人为要素具有交互作用,从气候要素中剥离出人类活动对植被的影响成为研究植被变化的热点。此外,人类活动是一个集合体,如何单独的分析生态工程对植被动态过程的影响成为了研究难点。针对现有研究方法提出了以下几点设想。

(1)研究大尺度的生态工程对植被变化的影响,需要长时间序列的遥感数据和长期的监测数据为支撑。因此,研究生态工程对植被生态系统的影响可以运用遥感科学与技术学科的遥感大数据和云计算平台处理海量的遥感影像数据。由于下载长时间序列高分辨的数据时间成本消耗大和数据处理对硬件要求很高。采用Google Earth Engine<sup>[31,56]</sup>遥感大数据平台进行处理分析,无需下载数据直接在云平台上快速高效的处理数据,可以节约下载数据和处理数据的时间成本和资源成本,可以加速全球尺度的快速分析应用。

(2)从生态学的角度来说,植被与环境要素之间存在复杂的相互作用关系。但现有大多数研究都有一个前提假设即植被与影响因子是线性关系,但实际上植被与其影响因子之间是非线性和非稳态的关系。在气候变化背景下定量分析生态工程对植被动态影响在模型的选择上应选用生理生态过程模型模拟植被在时间序列上变化过程。未来研究中可以将对植物生长机理表示清楚的生理生态过程模型与大气环流模式相耦合,有利于预测气候变化对植被净初级生产力的影响及土地覆被变化对气候的反馈作用,减少气候变化对植被生长的影响,更为精确的反映在气候变化和土地覆被变化情景下,生态工程对植被变化的贡献。

(3)随着生态文明建设步伐的推进和加快,以及生态工程大规模持久的实施,迫切的需要系统的科学的评价气候和人类活动对植被变化的影响,需要在目前研究方法上进一步量化它们在植被变化过程的作用。目前回归分析、残差趋势分析、基于生物物理过程的模型方法和阈值分割方法都是选用 NDVI、EVI 和 NPP 指标,而净生态系统生产力表征了生态系统的净固碳量,有着重要的生态学意义。在碳中和国家战略的背景下,分析生态工程对植被生态系统碳的影响具有重要的实际意义。

运用模型得到只受气候影响的植被模拟值和运用差值法得到人类活动对植被变化的影响值,这是当前学者分析人类活动对植被作用的主要思路。它们的缺点在于无法对模拟结果进行精度的验证。另外,由于研究区地理位置和气候的异质性及研究尺度上的问题,研究结果往往无法进行比较分析,未来的研究应予以关注。应用生态学控制实验的方法,以空间代替时间,寻找与生态工程实施区相近的自然植被斑块,以此对比研究生态工程在气候变化的背景下是否对植被产生影响,分析在气候变化下,生态工程对植被变化是增强作用还是减弱作用。另外,在流域尺度上结合生态工程区建立固定的长期和全要素的植被生态系统监测站点,形成监测网络,一方面为验证生理生态过程模型,提高模型的精度,更为精确的评估生态工程对植被的影响提供数据支撑,也为未来的决策提供科学合理的植被管理方案,形成健康可持续的植被生态系统。另一方面加强流域尺度的研究,可以为未来示范区建设提供科学的数据支撑和基地,实现科学技术的转化。

(4)运用 NPP 指标分析生态工程对森林生态系统产生的影响,可采用研究生态工程对草地生态系统影响的方法思路。在分析生态工程对森林生态系统影响前,运用土地利用转移矩阵,在像元尺度上将森林划分为未发生变化的森林(受气候影响),和变化的森林(受气候和人类活动双重影响)两种类型,利用景观斑块控制实验,探索生态工程在植被动态变化过程中的作用。生态工程对森林的作用方式主要包括造林、封育、抚育和管理,以此设置三种类型的景观斑块,斑块 1 为只受气候影响没有人类干扰的森林斑块,斑块 2 受到气候和人类管理双重影响的森林斑块(人类管理包括:森林病虫害去除,禁止森林采伐,封育等措施),斑块 3 为造林所形成的森林斑块,进行长期的监测,运用差值法分析三种类型森林景观斑块变化。定量分析生态工程对森林生态系统的影响,造林所形成的森林斑块运用土地利用分类得到,生态工程中通过森林抚育和封育形成的森林生态系统则通过景观控制实验对比分析生态工程在森林变化中的贡献。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Cai H Y, Yang X H, Xu X L. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: the effects of ecological protection and restoration projects. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 112-119.
- [ 2 ] 章维鑫,曹建华,吴秀芹.基于 Landsat 影像的石漠化区植被动态监测及治理效益研究. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 221-229.
- [ 3 ] 王姝,张艳芳,位贺杰,张宏运.生态恢复背景下陕甘宁地区 NPP 变化及其固碳释氧价值. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1421-1428.
- [ 4 ] 修丽娜,颜长珍,钱大文,幸赞品.生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 214-221, 228-228.
- [ 5 ] 张继,周旭,蒋啸,杨江州,牛潜.生态工程建设背景下贵州高原的植被变化及影响因素分析. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7): 1623-1633.
- [ 6 ] 唐见,曹慧群,陈进.生态保护工程和气候变化对长江源区植被变化的影响量化. *地理学报*, 2019, 74(1): 76-86.
- [ 7 ] Jiang H L, Xu X, Guan M X, Wang L F, Huang Y M, Liu Y H. Simulation of spatiotemporal land use changes for integrated model of socioeconomic and ecological processes in China. *Sustainability*, 2019, 11(13): 3627.
- [ 8 ] Zhang F Y, Zhang Z X, Kong R, Chang J, Tian J X, Zhu B, Jiang S S, Chen X, Xu C Y. Changes in forest net primary productivity in the Yangtze River Basin and its relationship with climate change and human activities. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1451.
- [ 9 ] Qi X Z, Jia J H, Liu H Y, Lin Z S. Relative importance of climate change and human activities for vegetation changes on China's silk road economic belt over multiple timescales. *Catena*, 2019, 180: 224-237.
- [ 10 ] Yan Y C, Liu X P, Wen Y Y, Ou J P. Quantitative analysis of the contributions of climatic and human factors to grassland productivity in northern China. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 542-553.
- [ 11 ] 周锡饮,师华定,王秀茹.气候变化和人类活动对蒙古高原植被覆盖变化的影响. *干旱区研究*, 2014, 31(4): 604-610.
- [ 12 ] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration

- projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [13] Zhou W, Gang C C, Zhou F C, Li J L, Dong X G, Zhao C Z. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 560-569.
- [14] Jiang H L, Xu X, Guan M X, Wang L F, Huang Y M, Jiang Y. Determining the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in agro-pastoral transitional zone of northern China from 2000 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 134871.
- [15] 王子玉, 许端阳, 杨华, 丁雪, 李达净. 1981-2010 年气候变化和人类活动对内蒙古地区植被动态影响的定量研究. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1025-1032.
- [16] Sun Y L, Yang Y L, Zhang L, Wang Z L. The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 87-88: 67-78.
- [17] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, Cheng H, Zhang X L, Huang F Q, Li F M, Ye J S. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 236-244.
- [18] Wang H, Liu G H, Li Z S, Wang P T, Wang Z Z. Comparative assessment of vegetation dynamics under the influence of climate change and human activities in five ecologically vulnerable regions of China from 2000 to 2015. *Forests*, 2019, 10(4): 317.
- [19] Shi W Y, Chen Y Z, Feng X M. Identifying the terrestrial carbon benefits from ecosystem restoration in ecologically fragile regions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 296: 106889.
- [20] Naeem S, Zhang Y Q, Tian J, Qamer F M, Latif A, Paul P K. Quantifying the impacts of anthropogenic activities and climate variations on vegetation productivity changes in China from 1985 to 2015. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1113.
- [21] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [22] Chen C, Li T J, Sivakumar B, Li J Y, Wang G Q. Attribution of growing season vegetation activity to climate change and human activities in the Three-River Headwaters Region, China. *Journal of Hydroinformatics*, 2020, 22(1): 186-204.
- [23] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, Chen Y Z, Gang C C, An R, Li J L. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012. *Science of the Total Environment*, 2016, 563-564: 210-220.
- [24] Li Q, Zhang C L, Shen Y P, Jia W R, Li J. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity. *Catena*, 2016, 147: 789-796.
- [25] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 童晓伟, 廖楚杰, 张明阳, 姜岩. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性. *生态学报*, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [26] 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.
- [27] Qu S, Wang L C, Lin A W, Zhu H J, Yuan M X. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: climate change or anthropogenic factors?. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 438-450.
- [28] 朱丽君, 蒙吉军, 李江风. 河北省植被覆盖变化及对生态建设工程的响应. *北京大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(4): 755-764.
- [29] Jiang M C, He Y X, Song C H, Pan Y P, Qiu T, Tian S F. Disaggregating climatic and anthropogenic influences on vegetation changes in Beijing-Tianjin-Hebei region of China. *Science of the Total Environment*, 2021, 786: 147574.
- [30] Shi Y, Jin N, Ma X L, Wu B Y, He Q S, Yue C, Yu Q. Attribution of climate and human activities to vegetation change in China using machine learning techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 294: 108146.
- [31] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [32] Sun G, Mu M. Nonlinearly combined impacts of initial perturbation from human activities and parameter perturbation from climate change on the grassland ecosystem. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, 18(6): 883-893.
- [33] Yu L, Wu Z T, Du Z Q, Zhang H, Liu Y. Insights on the roles of climate and human activities to vegetation degradation and restoration in Beijing-Tianjin sandstorm source region. *Ecological Engineering*, 2021, 159(2): 106105.
- [34] Yu X, Yang H B, Li S E, Yang D W. An improved conceptual model quantifying the effect of climate change and anthropogenic activities on vegetation change in arid regions. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2110.
- [35] Mu S J, Zhou S X, Chen Y Z, Li J L, Ju W M, Odeh I O A. Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland, China. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 29-41.
- [36] Wang J, Wang K L, Zhang M Y, Zhang C H. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 451-461.
- [37] Zhang Y H, Ye A Z. Quantitatively distinguishing the impact of climate change and human activities on vegetation in mainland China with the

- improved residual method. *GIScience & Remote Sensing*, 2021, 58(2): 235-260.
- [38] 洪辛茜, 黄勇, 孙涛. 我国西南喀斯特地区 2001-2018 年植被净初级生产力时空演变研究. *生态学报*, 2021, 41(24): 1-11.
- [39] 于璐, 武志涛, 杜自强, 张红, 刘勇. 气候变化背景下京津风沙源区人类活动对植被影响的量化分析. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2007-2014.
- [40] Guan Q Y, Yang L Q, Guan W Q, Wang F F, Liu Z Y, Xu C Q. Assessing vegetation response to climatic variations and human activities: spatiotemporal NDVI variations in the Hexi Corridor and surrounding areas from 2000 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 135(3): 1179-1193.
- [41] Liu R, Xiao L L, Liu Z, Dai J C. Quantifying the relative impacts of climate and human activities on vegetation changes at the regional scale. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 91-99.
- [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] Wu L H, Wang S J, Bai X Y, Tian Y C, Luo G J, Wang J F, Li Q, Chen F, Deng Y H, Yang Y J, Hu Z Y. Climate change weakens the positive effect of human activities on karst vegetation productivity restoration in southern China. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106392.
- [44] Jiang Y L, Guo J, Peng Q, Guan Y L, Zhang Y, Zhang R P. The effects of climate factors and human activities on net primary productivity in Xinjiang. *International Journal of Biometeorology*, 2020, 64(2): 765-777.
- [45] Chen T T, Peng L, Liu S Q, Wang Q. Spatio-temporal pattern of net primary productivity in Hengduan Mountains area, China: impacts of climate change and human activities. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(6): 948-962.
- [46] 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.
- [47] 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 1982-2018. *Science of the Total Environment*, 2019, 653:1311-1325.
- [48] Liu Y Y, Zhang Z Y, Tong L J, Khalifa M, Wang Q, Gang C C, Wang Z Q, Li J L, Sun Z G. Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105504.
- [49] Zhang R P, Liang T G, Guo J, Xie H J, Feng Q S, Aimaiti Y. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2888.
- [50] Li C H, Wang Y T, Wu X D, Cao H J, Li W P, Wu T H. Reducing human activity promotes environmental restoration in arid and semi-arid regions: A case study in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144525.
- [51] Yang H F, Yao L, Wang Y B, Li J L. Relative contribution of climate change and human activities to vegetation degradation and restoration in North Xinjiang, China. *The Rangeland Journal*, 2017, 39(3): 289-302.
- [52] Teng M J, Zeng L X, Hu W J, Wang P C, Yan Z G, He W, Zhang Y, Huang Z L, Xiao W F. The impacts of climate changes and human activities on net primary productivity vary across an ecotone zone in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136691.
- [53] Yin L, Dai E F, Zheng D, Wang Y H, Ma L, Tong M. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, southwest China: climate change or human activity?. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106013.
- [54] 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.
- [55] Tian H J, Cao C X, Chen W, Bao S N, Yang B, Myneni R B. Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 276-289.
- [56] Liu X P, Hu G H, Chen Y M, Li X, Xu X C, Li S Y, Pei F S, Wang S J. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 227-239.