

黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值

张琨¹, 吕一河^{2,3}, 傅伯杰^{2,4}, 尹礼唱^{2,5}, 于丹丹¹

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 5. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054)

摘要: 黄土高原是退耕还林工程的核心区域, 是中国生态恢复成效最显著的区域。明确黄土高原植被恢复对生态系统服务的影响, 识别植被影响的阈值效应, 是学术研究和实践管理共同的需求。然而, 目前相关研究仍存在研究空缺, 特别是在区域尺度对生态系统服务随植被变化阈值进行识别的研究较少。本文选择植被覆盖度(FVC)为指标表征2000—2015年黄土高原植被恢复情况, 以土壤保持服务、产水服务和碳固定服务为指标表征研究区生态系统服务情况, 对二者的时空变化及交互作用进行分析, 评估植被覆盖变化对生态系统服务的影响, 并对影响的阈值进行定量识别。结果显示: ① 2000—2015年黄土高原植被显著恢复; 生态系统服务变化差异明显, 碳固定服务明显增强, 土壤保持服务得到一定改善, 产水服务较为稳定。② 植被覆盖变化与生态系统服务变化的相关程度存在差异, 植被覆盖与碳固定服务的关联性最强, 其次为土壤保持服务。③ 植被覆盖增加能够促进区域生态系统服务总体提升, 但促进作用存在阈值效应。植被覆盖影响的阈值在林地区、林地—草地区、草地区和草地—沙漠区分别为44%、32%、34%和34%, 超过上述阈值, 植被覆盖增加的促进作用趋于减弱。

关键词: 植被覆盖度; 生态系统服务; 生态恢复; 阈值; 生物气候区; 黄土高原

DOI: 10.11821/dlxb202005005

1 引言

生态系统服务是人类从生态系统中获取的收益, 包括水源涵养、土壤保持、碳固定、生物多样性维护等多种类型。生态系统服务是生态系统功能向人类福祉转化的媒介^[1-2], 也是人类生存和发展的必要条件。目前, 生态系统服务已经成为学术界和管理者关注的焦点。生物多样性公约缔约方大会在《2011—2020年生物多样性战略计划》提出, 需要对产生重要服务的生态系统进行保护和恢复(目标14)。2012年生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)成立, 整合学术界和政府部门的资源并聚焦于生态系统服务相关研究。近年来, 中国政府以提升生态系统服务为导向全面实施生态保护红线政策, 表明生态系统服务已被纳入国家层面的生态管理目标之中。

收稿日期: 2019-03-22; 修订日期: 2020-02-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501601); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23070201) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0501601; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA23070201]

作者简介: 张琨(1988-), 男, 山东济南人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态恢复与生态系统服务研究。

E-mail: zhangkun@nies.org

通讯作者: 吕一河(1974-), 男, 河北保定人, 博士, 研究员, 主要从事景观生态与生态系统服务研究。E-mail: lyh@rcees.ac.cn

植被是影响生态系统服务的重要因素，二者的关系是学术界的研究热点^[3]。在生态管理实践中，管理者倾向于通过改善植被达到提升生态系统服务的目标。然而，生态系统服务对植被变化的响应是一个复杂的过程。在植被变化影响下，不同服务类型变化趋势各异，不同类型间存在权衡或协同关系，使得区域生态系统服务整体呈现高度非线性的变化趋势。明确此趋势能够为生态环境的科学管理提供支持。

阈值效应是生态系统服务非线性变化的重要特征。阈值状态下，影响因素的小幅变化可能引发生态系统服务出现明显改变。明确阈值存在与否并进一步进行识别是科学研究和管理实践的共同需求。目前，学术界已围绕该问题进行探索^[4]。Foudi等以马德里为研究区，分析绿色屋顶覆盖度对城市生态系统服务的影响，并强调该影响的非线性特征和阈值效应^[5]。Peng等整合土壤保持等4类生态系统服务获取总体生态系统服务（Total Ecosystem Service），分析城市化因素对生态系统服务的影响，定量识别人口城市化和经济城市化的影响阈值^[6]。此外，Zhang等提出应当统筹考虑生态阈值和经济阈值、Collins等所构建的“压力—脉冲动力学”框架（Press-Pulse Dynamics, PPD）等均为阈值效应分析提供了有益思路^[7-8]。具体到植被影响，已有研究表明，植被覆盖对生态系统服务的影响同样具有阈值效应，如Gao等发现，当植被覆盖低于特定阈值时，土壤保持、肥力维持等生态系统服务会明显减弱^[9]；Cao等进一步指出，植被影响的阈值在人工生态恢复过程中同样存在^[10]。然而，目前涉及植被影响阈值的研究多在样方尺度开展，在区域尺度进行分析的研究较少，难以满足大尺度生态管理的决策需求。

黄土高原是中国“两屏三带”生态安全格局的重要组成部分，对国家生态安全有重要影响。同时，该地区也是生态环境高度脆弱的农业区，水土流失严重，是世界土壤侵蚀最严重的地区之一^[11]。1999年中国政府启动退耕还林工程，旨在通过增加林地和草地来提升生态环境质量。黄土高原是退耕还林工程的重点区和示范区。多项研究显示，黄土高原的植被覆盖已得到明显改善，多项生态系统服务相应提升^[12-14]。然而也有学者持不同意见，质疑造林活动对生态系统的长期影响^[15-18]。另一方面，黄土高原的造林活动需要以大量人力物力投入为前提，需要对恢复目标和进程进行科学规划。因此，有必要评估黄土高原植被变化对生态系统服务的影响，定量分析植被变化影响的阈值，为区域生态管理提供支撑。

本文以黄土高原为研究区，综合土壤保持服务、产水服务、碳固定服务表征区域生态系统服务整体水平。将研究区植被覆盖与生态系统服务进行空间分析，确定植被变化对生态系统服务的影响，基于此对植被变化影响的阈值效应进行分析。本研究的结果能够为黄土高原生态环境的科学规划及合理恢复提供重要参考。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

黄土高原位于黄河中游流域，处于33°43'N~41°16'N、100°54'E~114°33'E范围内，总面积约为62.6万km²（图1）。该区域具有典型的黄土地貌，地形破碎，沟壑纵横^[18]。气候以半湿润和半干旱气候为主，受季风影响明显^[19]。黄土高原在行政区划上涉及山西、陕西等7个省（自治区）、44个地区（市、州、盟）、339个县（旗），总人口约1.08亿。高度聚集的人口和强烈的人类活动使得该区域生态环境面临沉重压力。黄土高原是世界上水土流失现象最为严重的区域之一，年均土壤侵蚀速率可达5000~10000 t/km²，年最大侵蚀速率则高达20000~30000 t/km²，土壤侵蚀主要发生在坡度为8°~35°的区域^[20]。该区

域还是黄河流域泥沙的最主要来源,黄河近90%入河泥沙来自于此^[21]。

根据黄土高原的植被及气候特征,将其自南向北划分为5个生物气候区(图1),即林地区、林地—草地区、草地区、草地—沙漠区以及沙漠区^[22]。

2.2 数据源

植被数据主要为归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),采用MODIS-NDVI产品,空间分辨率250 m,时间分辨率16 d;气象数据来自中国气象科学数据共享网(<http://www.esiience.gov.cn/metdata/page/index.html>);黄土高原2000年、2005年、2010年和2015年土地利用数据由中国科学院遥感与数字地球研究所提供,分辨率30 m。土壤属性数据来自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)中国土壤特征数据集(V1.1);DEM数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为90 m×90 m。为便于分析,通过重采样将各项数据的空间分辨率统一为250 m×250 m。

2.3 分析方法

2.3.1 植被覆盖变化分析

(1) 评价指标

采用植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)作为主要的植被指标。该指标能够有效降低无植被区域光谱特征带来的不确定性,提升分析精度,并得到广泛应用^[23-25]。FVC是采用像元二分法对NDVI数据进行处理所得^[26-27],方法如下:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中:NDVI为MODIS-NDVI数据产品经Savitzky-Golay滤波处理后结果^[28];NDVI_{soil}和NDVI_{veg}分别为纯裸土和纯植被对应的NDVI值,由土地利用数据结合野外实测数据确定。

(2) 变化趋势分析

线性回归是广为认可的趋势变化分析方法^[29-30]。本文采用线性回归方法对FVC变化情况进行逐像元定量分析,具体方法如下:

$$y = a \times t + b + \varepsilon \quad (2)$$

式中:y为像元对应FVC;a为线性趋势系数;t为时间序列;b为截距;ε为随机误差。当a>0时,表明植被覆盖度呈恢复趋势;反之,则表明其呈退化趋势。显著性检验置信度为95%。该方法亦用于生态系统服务变化趋势分析。

2.3.2 生态系统服务变化分析

(1) 土壤保持服务

土壤保持服务用土壤保持量作为指标。土壤保持量为土地在没有植被覆盖和人类管理条件下的潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差^[31]。土壤保持量基于USLE模型计算:

$$A = A_p - A_v = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中:A、A_p和A_v分别表示土壤保持量、潜在土壤侵蚀和实际土壤侵蚀;R表示降水侵蚀因子;K表示土壤侵蚀因子;L表示坡长因子;S表示坡度因子;C表示植被覆盖因子;P

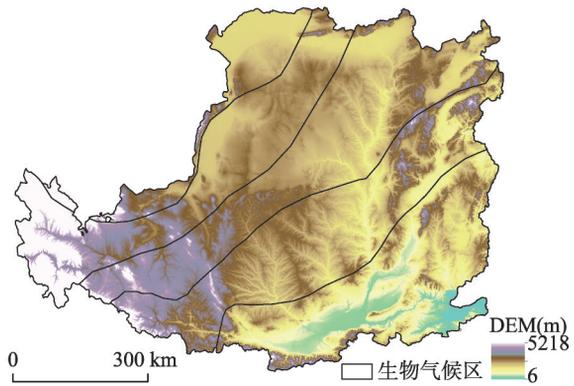


图1 黄土高原区域概况及生物气候区分区
Fig. 1 The general situation of the Loess Plateau and the division of the bioclimatic zones

表示管理因子。涉及土地利用数据时, 2000—2004年采用2000年数据, 2005—2009年采用2005年数据, 以此类推。各因子的计算方法详见参考文献^[32-35]。

(2) 产水服务

产水服务采用以下模型计算:

$$W = P - ET \quad (4)$$

式中: W 为产水 (mm); P 为降水 (mm); ET 为蒸散 (mm)。

由于产水服务的分析在年尺度上开展, 所以将蒸散定义为各月份实际蒸散量之和。各月份蒸散的计算是通过Zhang等提出的经验模型来实现^[36], 如下所示:

$$ET = \frac{P \left(1 + \omega \frac{PET}{P} \right)}{1 + \omega \frac{PET}{P} + \left(\frac{PET}{P} \right)^{-1}} \quad (5)$$

式中: ω 因子为植物水利用系数, 无量纲, 该因子取值在林地为2.0, 在灌木为1.0, 在草地为0.5, 在耕地为0.5, 在建设用和未利用地均为0.1^[36-37]; PET 因子为潜在蒸散 (mm), 基于Hamon等设计的模型来计算获取^[38-39]。

(3) 碳固定服务

选取植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 为表征碳固定服务指标^[22]。NPP计算基于CASA (Carnegie Ames-Stanford Approach) 模型实现, 该模型可以表示为:

$$\begin{aligned} NPP(x, t) &= APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \\ APAR(x, t) &= SOL(x, t) \times 0.5 \times FPAR(x, t) \\ \varepsilon(x, t) &= T\varepsilon(x, t) \times W\varepsilon(x, t) \times \varepsilon_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: NPP 为像元 x 于 t 时刻的净初级生产力, 单位为 $gC/m^2 \cdot a$; $APAR$ 为光合有效辐射, 单位为 $MJ/m^2 \cdot a$, 通过太阳总辐射量 (SOL)、光合有效辐射吸收比例 ($FPAR$) 估算获取; ε 为光合有效辐射转化为有机碳的效率, 单位为 gC/MJ^2 , 通过最大光能利用率 (ε_{\max} , 本文取 $0.389 gC/MJ^2$)、温度胁迫 ($T\varepsilon$) 以及水分胁迫 ($W\varepsilon$) 估算获取。

(4) 生态系统服务综合指数

对土壤保持服务、产水服务和碳固定服务进行标准化并累加, 获取生态系统服务综合指数 (以下简称综合指数), 表征区域生态系统服务的总体水平。将此处理应用于历年数据, 获取综合指数时间序列。具体处理方法如下:

$$\begin{aligned} ES_b &= \frac{ES - ES_{\min}}{ES_{\max} - ES_{\min}} \\ CIES &= \sum_{i=1}^n ES_{bi} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ES_b 为生态系统服务的标准化结果; ES 为生态系统服务初始值; ES_{\max} 为生态系统服务最大值; ES_{\min} 为生态系统服务最小值。为避免异常值的干扰, 将 ES_{\max} 与 ES_{\min} 分别取95%和5%分位数。 $CIES$ 为综合指数; ES_{bi} 为第 i 类生态系统服务的标准化结果; n 为3。

(5) 弹性系数

通过分析综合指数与植被覆盖度的弹性系数对植被覆盖影响的阈值进行识别。弹性系数指植被覆盖度每增加1单位带来的综合指数变化, 表征植被覆盖影响的强度和效率。弹性系数通过对植被覆盖度与综合指数的拟合函数进行求导获取。设 $CIES = f(FVC)$ 为综合指数和植被覆盖度之间的表达函数, 弹性系数 EC 为:

$$EC = \frac{d(CIES)}{d(FVC)} \quad (9)$$

3 结果分析

3.1 植被覆盖与生态系统服务时空变化

2000—2015年黄土高原植被覆盖显著恢复(图2a)。结果显示,黄土高原植被未发生显著变化的区域比例为35.8%,主要位于沙漠区和草地—沙漠区的中部及西部;植被显著退化区域约占2.2%;62%的区域植被呈现显著恢复态势,草地区和林地—草地区是植被覆盖度增加最明显的区域。总体来看,黄土高原植被表现为明显的净增加态势。

2000—2015年土壤保持服务、产水服务及碳固定服务变化趋势如图2b~图2d所示。根据空间分析结果,就土壤保持服务而言,2000年以来黄土高原土壤保持服务总体得到提升(图2b)。土壤保持量在大部分地区保持稳定而在小部分地区出现显著变化,呈现明显的空间聚集特征。具体而言,土壤保持量在76.5%的区域内未出现显著变化;土壤保持量显著增加($p < 0.05$)的区域比例为21.7%,大部分位于研究区中东部,在南部也有少量分布。草地区是土壤保持服务提升最明显的区域,其次为林地—草地区。就产水服务而言,产水服务总体保持稳定(图2c)。产水显著增加($p < 0.05$)的区域比例为8.2%,分布较为分散,位于研究区东北部和南部地区。各生物气候区中,产水显著增加的地区在草地区的所占比例最大,其次为草地—沙漠区。就碳固定服务而言,碳固定服务显著提升(图2d)。NPP显著增加($p < 0.05$)的区域所占比例达到47.7%。在空间上,NPP显著增加区域主要集中连片分布在黄土高原中部,沿西南—东北方向延展,另有少部分位于黄土高原北部以及东部地区。各生物气候区中,草地区的NPP增加趋势最明显,NPP显著增加区域在草地区占比达到66.8%,其次为林地—草地区,占比为62.8%。

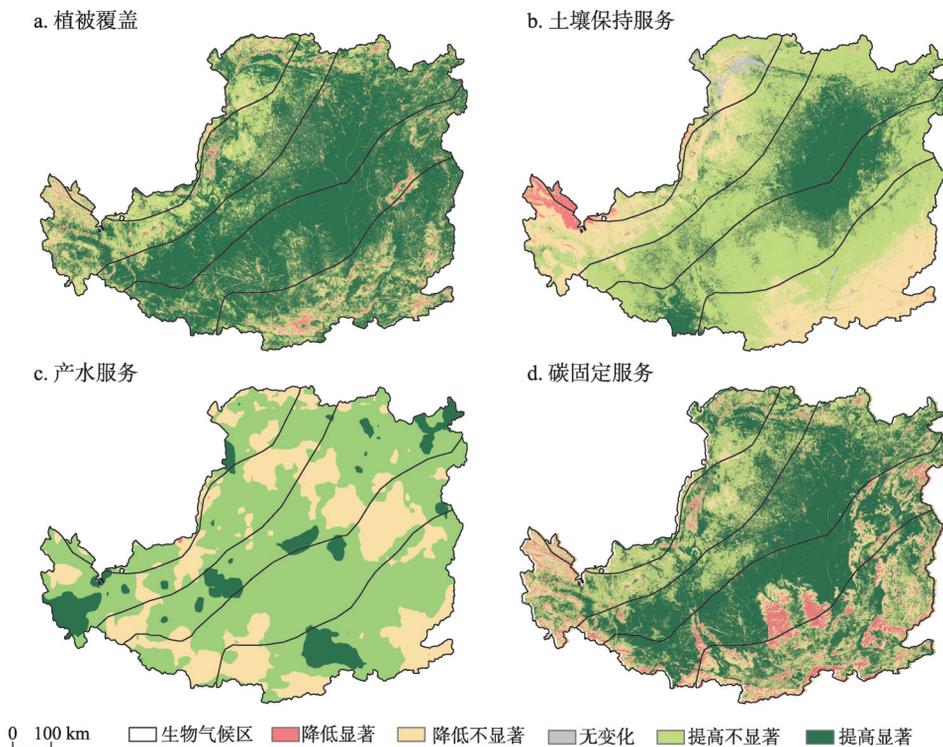


图2 2000—2015年黄土高原植被覆盖度及各类生态服务变化

Fig. 2 The changes of vegetation coverage and ecosystem services in the Loess Plateau in 2000-2015

3.2 植被覆盖对生态系统服务的影响

3.2.1 植被覆盖与生态系统服务的关系

(1) 植被覆盖与土壤保持服务。2000—2015年植被覆盖与土壤保持服务的关系如图3a所示。结果显示，FVC与土壤保持量呈显著正相关 ($p < 0.05$) 的区域占研究区总面积的53.1%，表明植被覆盖与土壤保持服务间具有高度相关性，近年来的植被改善能够有效促进土壤保持服务的提升。在空间上，二者显著相关的区域集中在黄土高原东北部，少量位于西南部。黄土高原中部的草地区是植被与土壤保持服务关联性最强的区域，其次为林地—草地区和草地—沙漠区。

(2) 植被覆盖与产水服务。2000—2015年植被覆盖与产水服务的关系如图3b所示。FVC与产水量的关联相对较弱。植被覆盖度与产水服务呈显著相关 ($p < 0.05$) 的区域占研究区总面积的10.7%。在空间格局方面，二者显著相关区域主要聚集于黄土高原西部，少量位于中部，另有部分在东北部零散分布，其范围内植被变化以显著增加为主。草地区是植被覆盖度与产水服务关系最明显的区域。

(3) 植被覆盖与碳固定服务。2000—2015年植被覆盖与碳固定服务的关系如图3c所示。结果显示，FVC与NPP呈显著正相关 ($p < 0.05$) 的区域占黄土高原总面积的87.6%。二者显著相关区域总体沿东北—西南方向分布，主要位于黄土高原西南部、中部、北部以及东北部，其范围内植被变化趋势以显著恢复为主。分析结果表明，植被覆盖与碳固定服务存在广泛且紧密的联系，植被覆盖度的增加能够明显促进碳固定服务的提升。结合前两组分析结果发现，植被与碳固定服务的关联强度远超出与其他服务类型的关系。在各生物气候区中，植被覆盖度与碳固定服务关系在草地区最为显著，同时在林地—草地区以及林地区表现得也较为明显。

a. 植被覆盖与土壤保持服务

b. 植被覆盖与产水服务

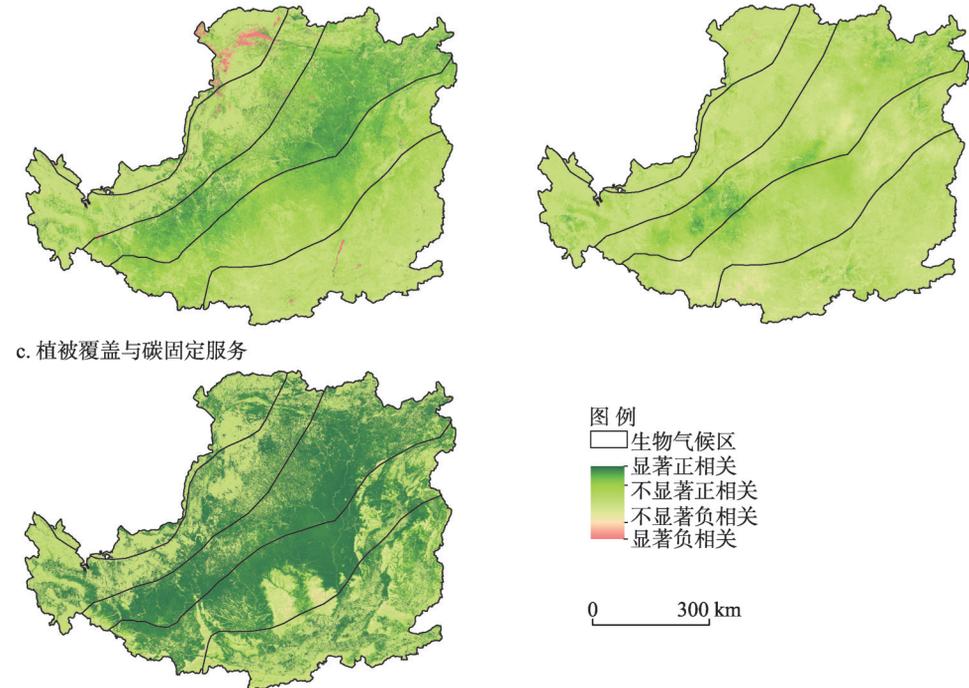


图3 黄土高原植被覆盖与生态系统服务关系

Fig. 3 The relationships between vegetation coverage and ecosystem services in the Loess Plateau

3.2.2 植被覆盖对生态系统服务的影响 整合土壤保持、产水、碳固定三项服务获取综合指数，结合FVC时间序列数据开展定量分析，以明确区域尺度植被覆盖对生态系统服务总体影响的趋势，识别影响的阈值。

(1) 林地区是黄土高原植被覆盖水平最高的区域，FVC与综合指数的关系如图4a所示。随着FVC的升高，综合指数相应增加，最大值为2.32（FVC为74%），但增速趋于减缓。分析弹性系数可以发现，此过程中弹性系数表现为一条为先升高后降低的曲线。在6% < FVC < 44%条件下，弹性系数呈增长态势，FVC升高带动综合指数的持续加速提升；在FVC达到44%的阈值时，弹性系数达到最大值0.025，FVC对生态系统服务的影响达到最大强度；超过阈值，FVC的影响强度降低，植被改善对生态系统服务的提升趋于减弱。

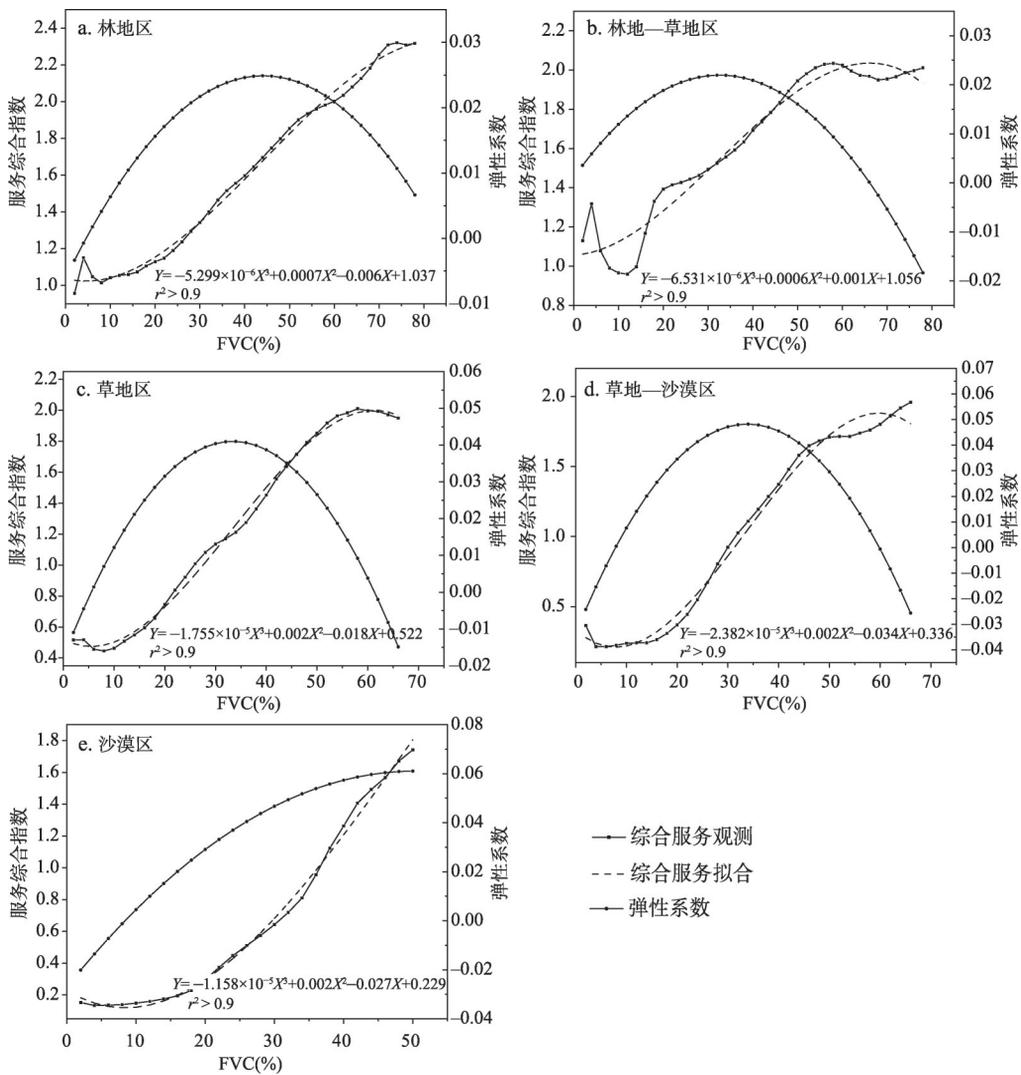


图4 各生物气候区综合指数及弹性系数随植被覆盖度的变化

Fig. 4 The changes of the comprehensive index of ecosystem service and the elasticity coefficient along with vegetation coverage change in each bioclimatic zone

(2) 林地—草地区FVC与综合指数的关系见图4b。结果表明,综合指数在FVC增加的带动下呈现明显提升,并在FVC为70%时达到峰值。对弹性系数的分析显示,FVC < 32%的条件下,弹性系数随着FVC的提高而递增,表明区域生态系统服务随着植被改善而持续加速提升;植被影响的阈值于FVC为32%处出现;FVC > 32%,弹性系数的变化趋势转为递减。

(3) 草地区FVC与综合指数的关系如图4c所示。可见,草地区综合指数随FVC变化表现为一条先增后减的曲线,最小值为0.47,最大值为2。在FVC较低时,综合指数随FVC增加而提升,FVC超过62%后,综合指数反而会出现小幅降低。弹性系数的变化表现为一条先上升后下降的曲线,表明植被覆盖对生态系统服务的影响强度先增强后减弱,阈值于FVC为34%的条件下出现。

(4) 草地—沙漠区的综合指数总体随FVC增加而提升(图4d)。弹性系数的变化显示,植被覆盖对生态系统服务的影响强度呈先增强后减弱的趋势,影响的阈值在FVC为34%的条件下出现;FVC超过阈值,植被覆盖增加对生态系统服务的促进作用逐渐弱化。

(5) 沙漠区的植被覆盖较低,综合指数与FVC的关系也相对简单(图4e)。结果表明,综合指数随FVC增加而持续提升,且提升速率未见减缓,即植被覆盖增加对生态系统服务的促进效果不断增强。但受环境条件所限,该区域脆弱的生态系统难以承受强度较高的生态恢复措施,因此植被覆盖和生态系统服务应以维持当前水平为宜。

4 讨论

本文通过模型模拟计算黄土高原土壤保持、产水和碳固定三类生态系统服务,并将其整合得到综合指数。基于此,分析植被覆盖对生态系统服务的影响,并对影响阈值进行定量识别。研究方法的局限性主要有两点:①仅选择三种服务类型可能难以充分表征区域生态系统服务状况,未来研究中可以考虑增加生态系统服务类型,如水质净化、粮食生产、木材生产等;②阈值识别的尺度依赖性^[6],随着空间尺度的不同,阈值的出现条件可能随之改变,可以在未来研究中开展多尺度分析予以验证。

退耕还林工程实施以来,黄土高原植被覆盖发生显著变化,继而引发生态系统服务相应改变。本研究结果表明,植被改善能够降低土壤侵蚀,促进土壤保持服务的提升。学者在黄土高原开展的野外试验和流域尺度土壤侵蚀评估均佐证了此结果^[31,40]。植被的促进作用主要体现在研究区东北部和西南部,多属于丘陵沟壑区。通过增加坡地植被覆盖,可以有效控制细沟和沟道侵蚀,降低土壤侵蚀速率,降幅可达90%^[41]。此外,植被还在降低坡面输沙能力、改善土壤结构等方面促进土壤保持服务^[35-36]。就产水服务而言,在区域尺度,其与植被覆盖的关系并不显著。但是有研究认为植被增加会导致黄土高原产水降低^[42]。考虑到水资源对于黄土高原的重要影响以及区域气候暖干化趋势^[43-44],有必要对产水服务继续予以关注。碳固定服务呈增长趋势且与植被覆盖高度相关。Feng等在研究中也发现了碳固定服务的显著提升,指出黄土高原生态系统已由碳源转变为碳汇,并明确植被恢复因素的主导作用^[22]。此外,植被覆盖增加对土壤侵蚀的控制也有助于降低生态系统碳流失,增强碳固定服务^[45]。植被覆盖与碳固定服务的相关性在草地区和林地—草地区表现较为明显。Wang等通过样地调查证实草地生态系统的固碳作用,并强调典型草原和森林草原在固碳方面的重要作用^[46]。

综合指数与植被覆盖的分析表明,区域生态系统服务与植被覆盖呈非线性关系,且

植被覆盖的影响具有阈值效应。定量识别阈值能够为生态管理实践提供重要参考^[47]。Martin等在研究中提出决策阈值(Decision Thresholds)的概念,即在此状态下,生态系统的小幅变化引发管理者的决策行为发生明显变化^[48]。本文确定的影响阈值可以作为界定决策阈值的参照。在生态恢复的规划与实施中,可以将阈值出现条件作为参考,在各生物气候区采用差异化的生态恢复规模和强度,同时采用“植被适度恢复以实现尽量高的生态系统服务”的思路对恢复进程和目标进行规划,促进资源的合理高效利用,降低水资源过度消耗等潜在风险^[17]。

5 结论

本文分析了2000—2015年黄土高原植被覆盖以及主要生态系统服务的时空变化,分析植被覆盖变化对生态系统服务的影响,并对植被覆盖影响阈值进行定量识别。研究的主要结论包括:

(1) 2000—2015年黄土高原植被净增加。生态系统服务变化差异明显,土壤保持服务总体提升,21.7%的区域出现土壤保持量显著增加;产水服务总体较为稳定;碳固定服务明显增强,NPP显著增加区域比例达到47.7%。

(2) 植被覆盖恢复与生态系统服务变化密切相关,但是与不同生态系统服务的关联程度存在差异。在变化过程中,植被覆盖与土壤保持服务显著相关的比例为53.1%,与产水服务显著相关的比例为10.7%,与碳固定服务显著相关的比例达到87.6%。草地区是植被覆盖变化对生态系统服务影响最明显的区域。

(3) 植被覆盖改善促进区域生态系统服务提升,但促进作用存在阈值。阈值出现的条件在不同生物气候区存在差异,在林地区、林地—草地区、草地区和草地—沙漠区分别为植被覆盖度44%、32%、34%和34%。植被覆盖超过阈值后,其对生态系统服务的促进作用趋于弱化。

参考文献(References)

- [1] Gerla P, Cornett M, Ekstein J, et al. Talking big: Lessons learned from a 9000 hectare restoration in the northern tallgrass prairie. *Sustainability*, 2012, 4(12): 3066-3087.
- [2] Anwar M M. Recreational opportunities and services from ecosystem services generated by public parks in megacity Karachi-Pakistan. *Sindh University Research Journal-Science Series*, 2012, 44(1): 23-28.
- [3] Reyers B, O'farrell P J, Cowling R M, et al. Ecosystem services, land-cover change, and stakeholders: Finding a sustainable foothold for a semiarid biodiversity hotspot. *Ecology and Society*, 2009, 14(1): 38-61.
- [4] Tang Haiping, Chen Jiao, Xue Haili. Ecological thresholds: Concept, methods and research outlooks. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 932-940. [唐海萍, 陈姣, 薛海丽. 生态阈值: 概念、方法与研究展望. *植物生态学报*, 2015, 39(9): 932-940.]
- [5] Foudi S, Spadaro J V, Chiabai A, et al. The climatic dependencies of urban ecosystem services from green roofs: Threshold effects and non-linearity. *Ecosyst Services*, 2017, 24(2017): 223-233.
- [6] Peng J, Tian L, Liu Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607(2017): 706-714.
- [7] Collins S L, Carpenter S R, Swinton S M, et al. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2011, 9(6): 351-357.
- [8] Zhang J Z, Luo M T, Yue H, et al. Critical thresholds in ecological restoration to achieve optimal ecosystem services: An analysis based on forest ecosystem restoration projects in China. *Land Use Policy*, 2018, 76(2018): 675-678.
- [9] Yang G, Zhong B B, Yue H, et al. A degradation threshold for irreversible loss of soil productivity: A long-term case

- study in China. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1145-1154.
- [10] Cao S X, Lu C X, Yue H. Optimal tree canopy cover during ecological restoration: A case study of possible ecological thresholds in Changting, China. *Bioscience*, 2017, 67(3): 221-232.
- [11] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [12] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [13] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLoS ONE*, 2012, 7(2): e31782.
- [14] Xin Z B, Ran L S, Lu X X. Soil erosion control and sediment load reduction in the Loess Plateau: Policy perspectives. *International Journal of Water Resources Development*, 2012, 28(2): 325-341.
- [15] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1-2): 91-100.
- [16] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2010, 381: 9-17.
- [17] Cao S X, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104(4): 240-245.
- [18] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- [19] Chen F, Yuan Y J, Zhang R B, et al. A tree-ring based drought reconstruction (AD 1760-2010) for the Loess Plateau and its possible driving mechanisms. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 82-88.
- [20] Cai Q G. Soil erosion and management on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, 11(1): 53-70.
- [21] Bai Y, Jiang B, Wang M, et al. New ecological redline policy (ERP) to secure ecosystem services in China. *Land Use Policy*, 2015, 55: 348-351.
- [22] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846. Doi: 10.1038/srep02846
- [23] Lü Y H, Zhang L W, Feng X M, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning, and influential factors. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8732. Doi: 10.1038/srep08732.
- [24] Zhang K, Lü Y H, Fu B J, et al. The effects of restoration on vegetation trends: Spatiotemporal variability and influencing factors. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2019, 109(2019): 473-481.
- [25] Jiang Z Y, Huete A R. Linearization of NDVI based on its relationship with vegetation fraction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(8): 965-975.
- [26] Ivits E, Cherlet M, Sommer S, et al. Addressing the complexity in non-linear evolution of vegetation phenological change with time-series of remote sensing images. *Ecological Indicators*, 2013, 26(2013): 49-60.
- [27] Imukova K, Ingwersen J, Streck T. Determining the spatial and temporal dynamics of the green vegetation fraction of croplands using high-resolution RapidEye satellite images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 113-123.
- [28] Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1255-1268. [穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.]
- [29] Deng S F, Yang T B, Zeng B, et al. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000-2011. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(6): 1050-1062.
- [30] Zhang Y L, Gao J G, Liu L S, et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: A case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas. *Global and Planetary Change*, 2013, 108(2013): 139-148.
- [31] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1): 73-85.
- [32] Wischmeier W H, Smith D D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1978.
- [33] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: Model documentation. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990, 329(1255): 421-428.
- [34] Mccool D, Brown L, Foster G, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of*

- the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [35] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, et al. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [36] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [37] Lü N, Sun G, Feng X M, et al. Water yield responses to climate change and variability across the North-South Transect of Eastern China (NSTEC). *Journal of Hydrology*, 2013, 481(2013): 96-105.
- [38] Hamon W R. Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 1963, 63(1963): 52-62.
- [39] Lu J B, Sun G, McNulty S G, et al. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern united states. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, 41(3): 621-633.
- [40] Li M, Yao W Y, Ding W F, et al. Effect of grass coverage on sediment yield in the hillslope-gully side erosion system. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(3): 321-330.
- [41] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420-427.
- [42] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2617-2628.
- [43] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [44] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. Temperature and precipitation changes over the Loess Plateau between 1961 and 2011, based on high-density gauge observations. *Global and Planetary Change*, 2015, 132(2015): 1-10.
- [45] Deng L, Kim D G, Li M, et al. Land-use changes driven by 'Grain for Green' Program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China. *Global and Planetary Change*, 2019, 177(2019): 101-115.
- [46] Wang Y Y, Deng L, Wu G L, et al. Estimates of carbon storage in grassland ecosystems on the Loess Plateau. *Catena*, 2018, 164(2018): 23-31.
- [47] Zhang J, Ding Z, Luo M. Risk analysis of water scarcity in artificial woodlands of semi-arid and arid China. *Land Use Policy*, 2017, 63: 324-330.
- [48] Martin J, Runge M C, Nichols J D, et al. Structured decision making as a conceptual framework to identify thresholds for conservation and management. *Ecological Applications*, 2009, 19(5): 1079-1090.

The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau

ZHANG Kun¹, LYU Yihe^{2,3}, FU Bojie^{2,4}, YIN Lichang^{2,5}, YU Dandan¹

(1. Nanjing Institute of Environment Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China;

2. Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology,

Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 5. College of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Loess Plateau is the core region of the "Green to Grain" Program, which makes it become the most successful example of ecological restoration in China. It is the common demand of both academic research and management practice to analyze the effects of vegetation restoration on ecosystem service and identify the threshold effects of vegetation restoration. However, there still is a research gap in related studies, especially for the thresholds of vegetation in the ecosystem service change at regional scale. In this study, we chose the fractional vegetation cover (FVC) as an index to indicate the vegetation coverage change in the Loess Plateau in 2000-2015, and took soil conservation service, water yield service and carbon sequestration service as indexes to exhibit the ecosystem service changes. The spatiotemporal changes of vegetation coverage and ecosystem services and their interaction were quantitatively analyzed. On such a basis, we further assessed the effects of vegetation coverage change on ecosystem services and quantitatively identified their thresholds. The results indicated that: (1) The vegetation coverage significantly improved in 2000-2015. Meanwhile, the differences of ecosystem service changes were prominent, with the carbon sequestration service getting significant enhancement, soil conservation service getting certain improvements and the water yield service maintaining steady. (2) There are differences among the correlations between vegetation restoration and changes of ecosystem service. The correlation of vegetation coverage- carbon sequestration service was the strongest, followed by that of vegetation coverage- soil conservation service. (3) The vegetation restoration could promote the improvement of the overall level of regional ecosystem service. Furthermore, we revealed the threshold effect in the promotion. The threshold occurrence resulted in the decrease of promotion efficiency of vegetation restoration, with vegetation coverage reaching 44%, 32%, 34% and 34% in forest zone, forest-grass zone, grass zone and grass-desert zone, respectively.

Keywords: vegetation coverage; ecosystem service; ecological restoration; threshold; bioclimatic zone; Loess Plateau