2000—2013 年无定河流域植被覆盖变化及其固碳效应

位贺杰[1,2]，张艳芳[3]，董孝斌[1,2]，胡晓欢[1,2]，王雪超[1,2]，鲁纳川[1,2]，赵亚楠[1,2]

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室，北京 100875；
2. 北京师范大学 资源学院，北京 100875；3 陕西师范大学 旅游与环境学院，陕西 西安 710119)

摘　要：[目的] 评估 2000—2013 年无定河流域水土保持和退耕还林(草)的成效，为评估无定河流域生态修复工程成效提供数据支撑。[方法] 采用线性回归、相关系数和偏相关系数等方法，分析无定河流域 2000—2013 年 NDVI(归一化植被指数)与 NPP(净初级生产力)的变化及影响因素。[结果] (1) 2000—2013 年，无定河流域植被覆盖增长率 3.39%/a，远高于 1999—2008 年黄土高原植被覆盖增长率 0.99%/a，且植被覆盖呈现阶段性的变化特征，其中有 2 次持续增长期。(2) 无定河流域植被覆盖变化以明显增加趋势为主，集中分布于黄土丘陵沟壑区，退化区域仅占 3.95%，“线状”分布于植被覆盖基数较好的河谷两岸。(3) 2000—2013 年，无定河流域植被累计固碳增加量 1.96×10^7 t，相当于 2010 年陕西省能源消费碳排放的 22.82%，累计固碳价值增加量 2.36×10^{10} 元，相当于 2010 年陕西省 GDP 的 2.33%。[结论] 无定河流域植被覆盖与固碳持续增加，主要驱动因素为人类活动，尤其是水土保持和退耕还林(草)等工程的实施。

关键词：植被覆盖；植被固碳；退耕还林还草；无定河流域

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2016)01-0044-07　　**中图分类号**：Q948.11

文献参数：位贺杰，张艳芳，董孝斌，等. 2000—2013 年无定河流域植被覆盖变化及其固碳效应[J]. 水土保持通报，2016，36(1)：44-50. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.009

Changes of Vegetation Cover and Carbon Fixation in Wuding River Basin During 2000—2013

WEI Hejie[1,2], ZHANG Yanfang[3], DONG Xiaobin[1,2], HU Xiaohuan[1,2], WANG Xuechao[1,2], LU Nachuan[1,2], ZHAO Ya'nan[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*; 2. *College of Resources Science & Technology*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*; 3. *College of Tourism and Environment*, *Shaanxi Normal University*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710119, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to evaluate the effects of "soil and water conservation project" and "grain for green project" in Wuding river basin during 2000—2013 in order to provide data support for ecological rehabilitation project in this region. [Methods] By using linear regression, correlation and partial correlation, this paper analyzed the variations of NDVI and NPP and its driving factors in Wuding river basin during 2000—2013. [Results] (1) From 2000 to 2013, the growth rate of vegetation cover was 3.39%/a in the study area, which was faster than that in Loess Plateau (0.99%/a) from 1999 to 2008. The vegetation cover showed periodical characteristics, with two sustainable growth periods. (2) The vegetation cover was significantly increased in most area, especially the area distributed in the loess hilly-gully region in the southeast of the study area. The degradation area only accounted for 3.95%, and distributed on the both sides of the valley. (3) From 2000 to 2013, the accumulative total carbon sequestration was 1.96×10^7 t, which equated to 22.82% of carbon emissions from energy consumption in Shaanxi Province in 2010. The value of accumulative carbon sequestration was 2.36×10^{10} CNY, which equated to 2.33% of GDP in Shaanxi Province in 2010. [Conclusion] Human activity was the main driving force that influence the changes of vegeta-

收稿日期：2014-10-13　　**修回日期**：2014-11-20

资助项目：国家自然科学基金项目“基于能值的纸坊沟流域生态资产与人类福祉变化动态模拟”(41271549)；国家科技支撑计划项目(2012BAD14B03)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014KJJCB33)

第一作者：位贺杰(1988—)，男(汉族)，河南省项城市人，博士研究生，主要从事生态系统服务研究。E-mail：shanxishidawhj@163.com。

通讯作者：董孝斌(1973—)，男(汉族)，河北省张家口市人，博士，教授，主要研究方向为系统生态学与可持续农业。E-mail：dong_xiaobin@163.com。

tion cover and carbon sequestration, especially the implementation of "soil and water conservation project" and "grain for green project".

Keywords: vegetation cover; vegetation carbon fixation; "grain for green project"; Wuding river basin

植被作为陆地生态系统中的重要组分与核心环节，是连接土壤、大气和水分等要素的自然纽带，在陆地生态环境变化中起着"指示器"的作用[1-3]。NDVI (normal difference vegetation index，归一化植被指数)和 NPP(net primary production，净初级生产力)是全球或区域植被覆盖状况和植被固定有机碳的直接反映指标，开展 NDVI、NPP 动态监测与评价，不仅有助于推动全球土地覆盖变化、碳平衡、全球变暖等许多热点问题的深入研究，而且可以量化生态保护措施、环境管理政策的成效[3]。

黄土高原作为中国的独特地貌单元，水土流失严重，是生态环境脆弱区和敏感区，同时也是水土保持工程和退耕还林还草工程重点建设区，其植被覆盖及生产力状况一直是研究热点。全区[4-9]或某些行政区(如陕甘宁[10]、陕北[11-13]、山西省[14])的植被覆盖[4-8,10-11,14]或净初级生产力[9,12-13]的各自变化是监测重点，监测发现 2000 年以来由于人类活动，研究区植被覆盖或净初级生产力向着改善方向发展，但是有关黄土高原尤其退耕还林区典型流域的植被状况研究缺乏，有待进一步研究，且植被覆盖变化下，植被固碳服务功能的变化也有待进一步量化。

无定河流域位处毛乌素沙漠南缘地带风沙黄土过渡区，是黄土高原典型流域和国家水土保持八大重点治理区之一。2000—2013 年，正值无定河流域水土保持 2 期、3 期工程和退耕还林还草工程的实施期和巩固期，关于整个流域其间植被覆盖及生产力恢复格局状况的研究鲜有涉及。基于此，本文利用 2000—2013 年 MODIS-NDVI，MODIS-NPP，气温，降雨等数据，辅以线性趋势、相关分析和偏相关分析等方法，研究无定河流域植被覆盖变化及固碳效应，并进一步讨论其影响因素，以期为评估无定河流域生态修复工程成效提供数据支撑，为区域环境保护建设和可持续发展提供理论依据。

1　研究区概况

无定河(37°03′—38°45′N，108°06′—110°33′E)发源于陕西省靖边、定边、吴旗 3 县交界的白于山北麓，由西向东流经内蒙古伊克昭盟和陕西省榆林、延安地区，于清涧县注入黄河，干流全长 491 km，流域面积 30 260 km^2，属温带大陆性干旱半干旱气候类型，年均温度在 7.9～11.2 ℃之间，年降雨量 350～500 mm，集中在夏季，变幅大且空间分布不均匀，东南多，西北少[15]。流域沟壑纵横，地表破碎，土地沙化，气候干燥，植被稀少，风蚀水蚀剧烈，水土流失严重，形成了特殊的土地生态系统，其中西北部为毛乌素沙漠腹地(风沙区)，西南部为河源梁涧区，东南为黄土丘陵沟壑区。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源及处理

本研究数据来源见表 1。其中 MODIS-NDVI 数据，选取植被覆盖较好的 8 月，提取上下旬中 NDVI 较大值代表当年的植被覆盖状况[11]；MODIS-NPP 数据的估算采用的是 BIOME-BGC 模型，具体流程可参考《MOD17 User's Guide》[16]，其精度已在区域尺度得到广泛验证[16-20]。

表 1　研究所用数据资料

数据名称	数据信息	数据用途	数据来源
MODIS—NDVI	产品格式：MOD13 Q1；产品号：h26 v05； 产品时段：2000—2013 年 8 月； 空间时间分辨率：250 m，旬	获取植被覆盖信息	http://e4 ftl01. cr. usgs. gov(美国地质勘探局)
MODIS—NPP	产品格式：MOD17 A3；产品号：h26 v05； 产品时段：2000—2013 年 空间时间分辨率：1 km，年	获取植被固碳信息	http://e4 ftl01. cr. usgs. gov(美国地质勘探局)
气象数据	榆林、横山、绥德站点气温、降水资料； 资料时段：2000—2013 年以及 7 月，8 月 时间分辨率：年，月	与 NDVI，NPP 做相关分析	http://cdc. cma. gov. cn/home. do(中国气象科学数据共享网)
能源消费、GDP	数据时段：2000 年，2010 年	评估植被固碳效应	2001 年，2011 年《陕西省统计年鉴》

遥感数据处理：使用 MODIS 数据专业投影工具 MRT 软件将 MOD13Q1，MOD17 A3 数据由 SIN 投影的 HDF 格式转为 WGS1 984-Albers 投影系统下的 Geotiff 格式，同时利用 ArcGIS 10.0 软件还原栅格数

据真值，并依据无定河流域矢量图掩膜裁取研究区。

2.2 研究方法

本文对NDVI，NPP变化趋势的模拟均采用一元线性回归分析[21]，为了更好评价无定河流域植被覆盖状况，参照已有研究[22]，将栅格NDVI斜率K划分为7个等级，$(-\infty,-0.009\ 0)$，$[-0.009\ 0,-0.004\ 5)$，$[-0.004\ 5,-0.000\ 9)$，$[-0.000\ 9,0.000\ 9)$，$[0.000\ 9,0.004\ 5)$，$[0.004\ 5,0.009\ 0)$，$[0.009\ 0,+\infty)$，相应的7个变化趋势为严重退化、中度退化、轻微退化、基本不变、轻微增加、中度增加、明显增加。

另外，气温、降雨与NDVI，NPP以及NDVI与NPP相关性的量化系数为相关系数和偏相关系数[21]；能源消费碳排放的求取参照IPCC(intergovernmental panel on climate change)推荐方法；固碳价值量的求取参照最新的国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》，固碳价格为1 200元/t。

3 结果与分析

3.1 无定河流域植被覆盖时序变化

2000—2013年无定河流域植被年均NDVI呈现增长趋势，由0.296增长到0.437，增速达0.010/a，增长率为47.46%，年增长率3.39%，远高于黄土高原区增速0.99%/a[9]；河源梁涧区、黄土丘陵沟壑区、风沙区植被年均NDVI均呈增长趋势，其中以黄土丘陵沟壑区植被NDVI增幅最大，增长率高达80.50%，由于河源梁涧区植被基数相对较好以及风沙区植被改善相对困难，这2个区域植被增幅较低，为30%左右(图1)。

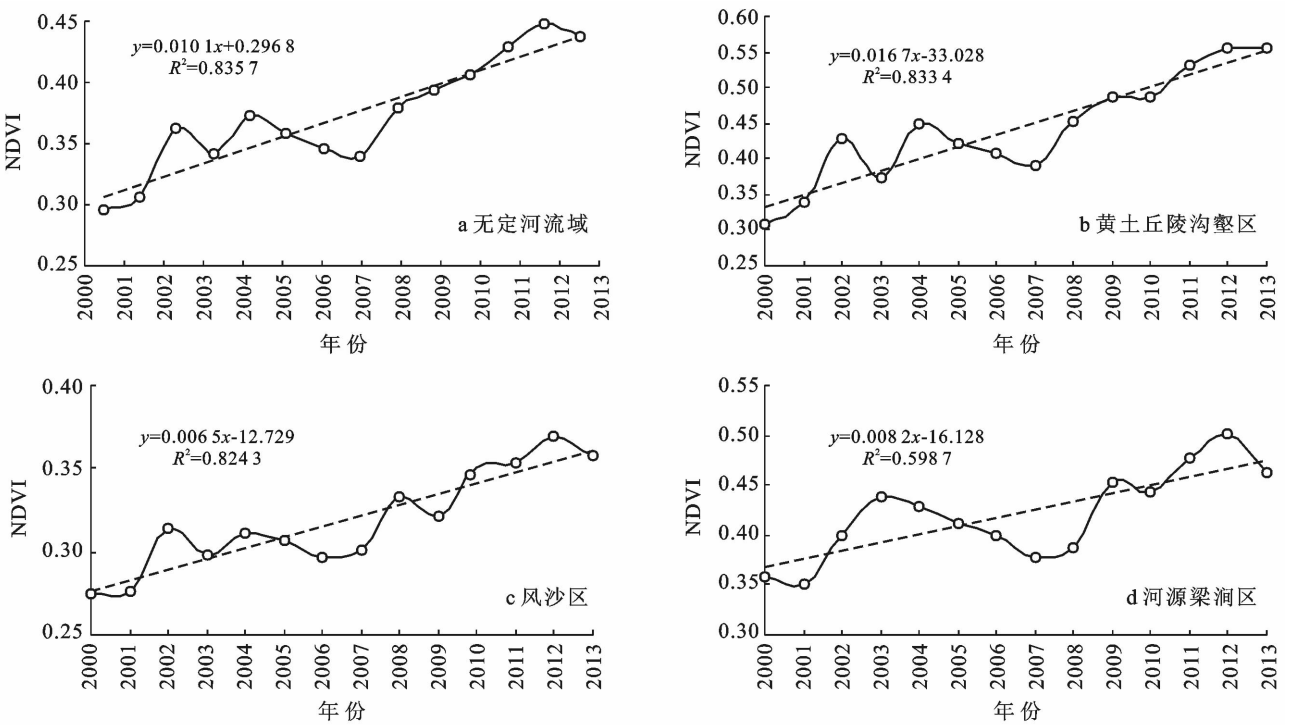

图1 2000—2013年研究区NDVI变化

由图1知2000—2013年无定河流域植被覆盖变化具有阶段性，大致历经了第1次增长(2000—2002年)、波动(2002—2008年)、第2次增长(2008—2012年)、轻微下降(2012—2013年)等阶段，其中2次增长期增长率分别为22.56%，17.96%；黄土丘陵沟壑区、风沙区植被覆盖变化的阶段性与无定河流域整体呈现一致性，黄土丘陵沟壑区植被NDVI 2次增长期增长率分别为39.82%，22.61%，风沙区则较低，分别为13.97%，11.07%；2000—2013年河源梁涧区植被覆盖变化较为特殊，整体虽呈增长趋势，但波动幅度较大。

3.2 无定河流域植被覆盖空间格局演变

无定河流域植被NDVI空间格局及其演变基本特征为(图2a—2c)。(1) 空间分异明显，受水热等格局影响，整体呈现东南高、西北低、河谷地带和水系汇集区高的空间分布特征；(2) 流域植被覆盖受地貌格局影响明显：西北部风沙区，土地覆盖以草滩沙地为主，NDVI在稀少的河道两岸和南部水系汇集区较高，其他地方偏低，多年平均值为0.319，3区最低；西南部河源梁涧区，海拔相对较高，大理河、芦河、红柳河发源于此地，植被覆盖基数相对较好，多年平均NDVI为0.421；东南部黄土丘陵沟壑区，大部分属榆

林，是无定河泥沙主要来源区，近些年植被覆盖明显改善，多年平均 NDVI 为 0.442；(3) 研究期内，无定河流域植被覆盖演变具有空间差异性，黄土丘陵沟壑区植被覆盖由东北向西南持续增加，“绿带”逐渐遍布整区；风沙区低植被覆盖区减少，植被基数较高的偏西地区植被退化；河源梁涧区东部植被覆盖增加，西部植被覆盖减少。

研究期内，水土保持工程、退耕还林还草工程的实施使无定河流域大部分地区植被呈现增加趋势(图 2d)。(1) 呈明显增加趋势区域所占比重最大，约占全流域面积一半，集中分布于黄土丘陵沟壑区，于衡山—子长—子洲—米脂—绥德—清涧等县域“连片”分布，其次在风沙区西南部，靠近黄土丘陵沟壑区边缘地带密集分布，这些区域同时也是无定河水土保持工程重点治理区；(2) 呈中度增加和轻微增加趋势区域占流域面积41.80%，主要分布于风沙区，于纳林河、海流兔河、榆溪河等河流方向两侧成粗细不等“条带状”分布，河源梁涧区、黄土丘陵沟壑区亦有零星分布；(3) 呈基本不变趋势区域占流域面积 3.01%，大部分“破碎状”散布于风沙区、河源梁涧区，亦有少许“细带状”展布于纳林河、海流兔河中部；(4) 呈退化趋势区域占流域面积 3.95%，并呈现以下特点：以轻微退化趋势为主，且退化区域大部分位于风沙区；退化区域主要沿无定河、榆溪河、大理河、芦河两岸等呈“线状”分布；河源区白于山偏西部分，植被覆盖基数较好地区也呈现退化趋势。

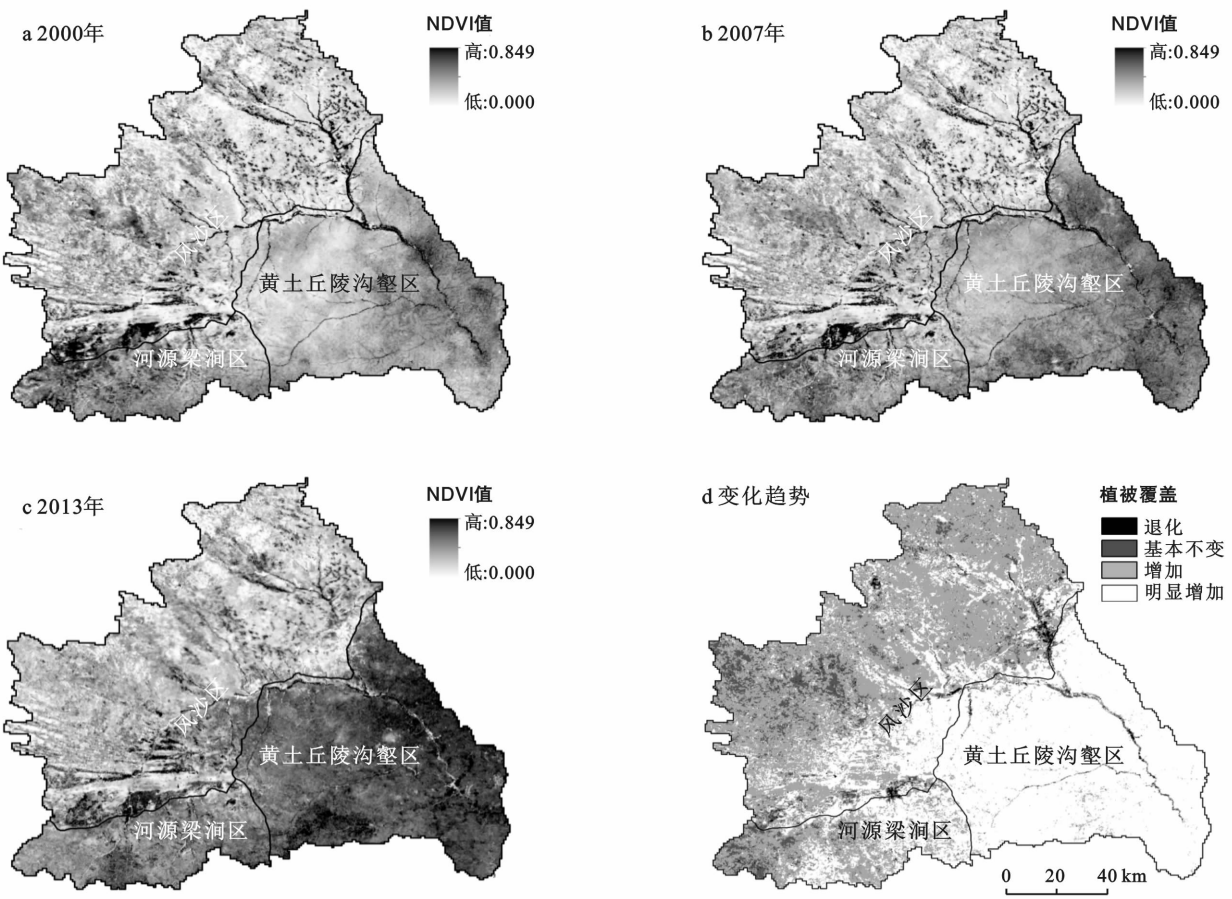

图 2　2000－2013 年无定河流域植被覆盖空间分布及变化趋势

3.3　无定河流域植被覆盖变化的固碳效应

(1) 固碳密度(图 3)。①研究期内，无定河流域全区及 3 个地貌区植被 NPP 或固碳密度均呈增长趋势，全区平均固碳密度从 118.15 g/m^2 增加到192.89 g/m^2，增长率为 63.26%，黄土丘陵沟壑区平均固碳密度增长率最高，达 93.61%，从 117.22 g/m^2 增加到了 226.94 g/m^2，河源梁涧区和风沙区植被固碳密度增长率相对较低，分别为 63.26%，44.23%；②无定河流域植被固碳密度变化与植被覆盖变化具有差异性，整体看有 2 次持续时间较长的增长期(2000—2004，2005—2010 年)，增长率分别为 42.38%，22.88%，风沙区植被固碳密度变化与全区呈现一致性，黄土丘陵沟壑区、河源梁涧区整体虽也有 2 次持续增长期，但波动次数较多，与全区变化相比稍有差异。

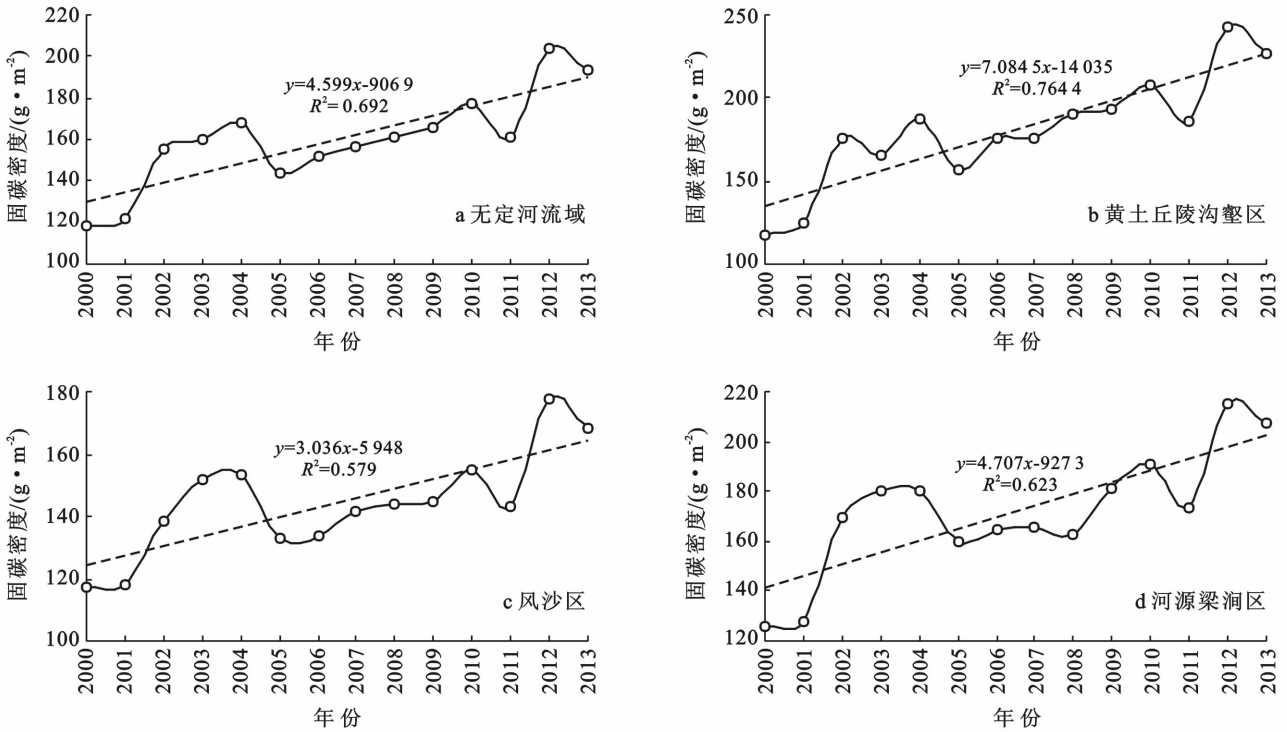

图3 2000—2013年研究区植被固碳密度(NPP)变化曲线

(2) 固碳物质量(表2)。研究期内,随着无定河流域植被固碳密度的增长,植被固碳量也呈增长趋势。从固碳量线性拟合方程看,3大地貌区固碳量均呈现增长趋势,其中以黄土丘陵沟壑区拟合度最高,增长趋势最为显著。

河源梁涧区、黄土丘陵沟壑区、风沙区累计固碳量大致呈现13∶38∶49的比例,以风沙区固碳总量最高,约占了无定河流域总固碳量的1/2;2013年相比2000年无定河流域固碳增加量为2.52×10^6 t,相当于2000年陕西省能源消费碳排放量的9.83%,其中以黄土丘陵沟壑区固碳增加量最高,其次为风沙区,最低为河源梁涧区。

13 a间无定河流域累计固碳增加量为19.63×10^6 t,约占总累计固碳量的26.07%,相当于2000年陕西省能源消费碳排放量的76.74%,2010年陕西省能源消费碳排放量的22.82%,固碳效应显著。

表2 2000—2013年研究区植被固碳量特征 10^4 t

研究区域	年份			累计固碳量	固碳增量	固碳量线性拟合方程
	2000	2007	2013			
河源梁涧区	52.50	69.03	86.14	1 000.84	33.63	$y=1.957x-3\ 856(R^2=0.623)$
黄土丘陵沟壑区	132.16	198.06	255.86	2 847.15	123.70	$y=7.987x-15\ 823(R^2=0.764)$
风沙区	212.90	258.15	307.06	3 680.66	94.16	$y=5.531x-10\ 836(R^2=0.579)$
无定河流域	397.56	525.25	649.05	7 528.64	251.50	$y=15.47x-30\ 516(R^2=0.692)$

(3) 固碳价值量。研究期内,无定河流域植被累计固碳价值量为903.44亿元,以风沙区累计固碳价值量最高为441.68亿元,约占了总固碳价值量的1/2;2013年相比2000年无定河流域固碳价值净增加量为30.18亿元,以黄土丘陵沟壑区最高为14.84亿元,约占了总固碳价值增加量的1/2;13 a间无定河流域累计固碳价值增加量为235.54亿元,相当于陕西省2000年GDP的13.32%,2010年GDP的2.33%。

3.4 气象因素与植被变化

为保证相关系数求取精度,站点相关系数求取方法为,利用ArcGIS提取以3站点(榆林、横山、绥德)为中心,以2 km为半径的区域NDVI,NPP均值,后对NDVI,NPP和对应站点月值或年值气温、降雨作相关性分析;流域整体相关系数求取方法为,用3站点平均气温、降雨与流域整体NDVI,NPP均值作相关性分析;站点或流域整体NDVI与NPP相关性求法同上。

（1）气温、降雨与 NDVI 的相关性（表 3）。陈安安等[8]经过研究发现，研究黄土高原地区植被对气温和降水最优尺度为月尺度，最大时滞为 1 月，本文取时滞期为 1 月进行研究。无定河流域地处温带干旱半干旱区，植被生长主要受水分限制，温度上升会加剧土壤蒸发，使土壤干化，从而抑制植被生长[23]。所以流域气温与 NDVI 的负相关性较为显著，而降雨与 NDVI 的正相关性较为显著，且 NDVI 对降雨和气温存在一定的滞后效应。

表 3　研究区 NDVI 与气温、降雨相关系数

相关性	榆林	横山	绥德	无定河流域
R_{NDVI-T}（7 月）	－0.415	－0.509*	－0.644**	－0.579**
r_{NDVI-T}（7 月）	－0.287	－0.250	－0.494*	－0.282
R_{NDVI-T}（8 月）	－0.301	－0.160	0.006	－0.272
r_{NDVI-T}（8 月）	－0.491*	－0.238	－0.125	－0.411
R_{NDVI-P}（7 月）	0.337	0.631**	0.506*	0.654**
r_{NDVI-P}（7 月）	0.133	0.491*	0.199	0.454
R_{NDVI-P}（8 月）	－0.234	－0.119	－0.234	－0.217
r_{NDVI-P}（8 月）	－0.459	－0.213	－0.345	－0.381

注：R_{NDVI-T}，r_{NDVI-T}分别为 NDVI 与气温的相关系数和偏相关系数；R_{NDVI-P}，r_{NDVI-P}分别为 NDVI 与降雨的相关系数和偏相关系数；* 为在 0.10 水平上显著；* * 为在 0.05 水平上显著。

（2）NDVI、气温、降雨与 NPP 的相关性（表 4）。NPP 与 NDVI 相关性显著，在 3 个站点和整个流域的相关系数和偏相关系数均通过了 0.001 水平上的显著性检验，说明无定河流域植被固碳增加主要受植被覆盖度增加的影响；由于流域所处气候带，植被水分不足，温度过高会使植株内 Rubisco 的加氧反应大于其羧化反应，最终使得植物的净光合作用下降，NPP 降低，所以同 NDVI 一样，流域气温与 NPP 呈负相关，而水分是研究区植被的限制因素，随着植被可利用水分增加，植株净光合作用会增加，NPP 也会升高，所以流域降雨与 NPP 呈正相关。

表 4　研究区 NPP 与 NDVI、气温、降雨相关系数

相关性	榆林	横山	绥德	无定河流域
$R_{NPP-NDVI}$	0.919***	0.916***	0.936***	0.901***
$r_{NPP-NDVI}$	0.914***	0.912***	0.915***	0.841***
R_{NPP-T}	－0.340	－0.360	－0.330	－0.342
r_{NPP-T}	－0.390	－0.261	－0.419	－0.367
R_{NPP-P}	0.353	0.300	0.374	0.529*
r_{NPP-P}	0.401	0.160	0.452	0.543*

注：$R_{NPP-NDVI}$和 $r_{NPP-NDVI}$分别为 NPP 与 NDVI 的相关系数和偏相关系数；R_{NPP-T}和 r_{NPP-T}分别为 NPP 与气温的相关系数和偏相关系数；R_{NPP-P}和 r_{NPP-P}分别为 NPP 与降雨的相关系数和偏相关系数；* 为在 0.10 水平上显著；* * * 为在 0.001 水平上显著。

对 NDVI，NPP 与气温、降雨的相关系数和偏相关系数进行显著性检验，发现各系数在 0.01 水平上均不显著，仅有部分系数通过了 0.05 水平和 0.10 水平上的显著性检验，主要原因是近些年，无定河流域植被生长受人类活动影响比较剧烈，掩盖了自然要素对植被生长的影响，导致大部分区域植被 NDVI，NPP 与气温、降水表现为弱相关。

3.5　人类活动与植被变化

无定河流域大部分属榆林市，小部分位于内蒙古，土地贫瘠，植被生长受水分限制，但在 2000—2013 年区域降雨量呈现降低趋势下，植被覆盖及固碳总体还是保持着上升趋势，这与人类活动尤其是大规模的植被建设有着密不可分的关系。

2000—2002 年无定河流域植被覆盖与固碳发生的第一次飞跃式增长，正值无定河流域水土保持二期二阶段工程和退耕还林工程全面开始实施期，这 3 a 榆林市大面积种植沙棘，造林面积 3 740.30 km^2，占 2000—2013 年榆林市总造林面积的 30.03%，二期二阶段工程使无定河流域林草覆盖率由 11.10%增加到 59.40%[24]，为植被 NDVI，NPP 22.56% 和 31.20%的增长率提供了基础；由于当地气候条件的限制，一些地区某些年份降水量少于 400 mm，沙棘对降水有一定要求，在这些区域出现大面积枯死，使 2003 年，2005 年植被覆盖出现下降[25]。此后，工程治理注重因地制宜，结合实际，改种适应性强的樟子松和油松，并且 2007 年以后退耕还林还草的重点由增加森林面积、恢复生态向完善退耕还林政策和巩固现有成果逐步转变[10]，新增造林面积趋于稳定化，一系列措施为无定河流域植被 NDVI，NPP 的第二次平稳增长提供了基础。

4　结 论

（1）无定河流域植被覆盖空间分异明显，整体呈现东南黄土丘陵沟壑区高，西北风沙区低的空间分布特征；

（2）2000—2013 年无定河流域 NDVI 整体呈现增加趋势，其中个别年份有降低，14 a 内增长率达 3.39%/a，远高于 1999—2008 年黄土高原全区增长率 0.99%/a，且 3 大地貌区增速各异；

（3）2000—2013 年无定河流域植被变化呈增加趋势的区域集中分布于黄土丘陵沟壑区，呈退化趋势区域主要沿植被覆盖基数较好的河谷两岸呈“线状”分布。

（4）2000—2013 年无定河流域累计固碳增加量相当于 2010 年陕西省能源消费碳排放量的 22.82%，

累计固碳价值增加量相当于陕西省2010年GDP的2.33%,植被覆盖增加下的固碳效应较为显著。

(5) 2000—2013年无定河流域植被NPP与NDVI呈极显著正相关,植被覆盖度的增加作为主要因素驱动了植被固碳的增加,而二者的变化实质上受人类活动尤其是大规模的植被建设驱动。

植被覆盖变化及空间差异是人类与自然活动交互作用的过程,人类活动为无定河流域植被变化的主要影响因素,但本文并没将其贡献率量化,结合土地利用变化进一步量化人类活动对植被覆盖的影响是下一步研究重点;本文量化了无定河流域植被生态恢复所增加的固碳服务功能,但其他生态服务功能如水源涵养、水土保持、空气质量调节、防风固沙等有待进一步研究。

[参考文献]

[1] Liu Xianfeng, Zhang Jinshui, Zhu Xiufang, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-river headwaters region during 2000—2011 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(2):288-302.

[2] 包钢,覃智豪,包玉海,等.1982—2006年蒙古高原植被覆盖时空变化分析[J].中国沙漠,2013,33(3):918-927.

[3] 张峰,王桥,李营.呼伦贝尔草原植被覆盖时空动态变化监测定量方法研究[J].自然资源学报,2010,25(10):1698-1708.

[4] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学(D辑):地球科学,2007,37(11):1504-1514.

[5] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Spatiotemporal variations of vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau(1981—2006): Impacts of climate changes and human activities[J]. Science in China(Series D): Earth Sciences, 2008,51(1):67-78.

[6] 张翀,任志远.黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J].资源科学,2011,33(11):2143-2149.

[7] 刘宪锋,杨勇,任志远,等.2000—2009年黄土高原地区植被覆盖度时空变化[J].中国沙漠,2013,33(4):1244-1249.

[8] 陈安安,孙林,胡北.近10 a黄土高原地区NDVI变化及其对水热因子响应分析[J].水土保持通报,2011,31(5):215-219.

[9] 娄雪婷,杜鑫,孙玉军.黄土高原地区植被净初级生产力遥感监测及其动态变化分析[J].安徽农业科学,2010,38(11):6057-6058.

[10] Li Shuangshuang, Yan Junping, Liu Xinyan, et al. Response of vegetation restoration to climate change and human activities in Shaanxi-Gansu-Ningxia Region [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013,2(1):98-112.

[11] 宋富强,邢开雄,刘阳,等.基于MODIS/NDVI的陕北地区植被动态监测与评价[J].生态学报,2011,31(2):354-363.

[12] 宋富强,康慕谊,陈雅如,等.陕北黄土高原植被净初级生产力的估算[J].生态学杂志,2009,28(11):2311-2318.

[13] 张艳芳,朱妮.基于CASA模型的榆林碳源/汇平衡与生态盈余研究[J].中国农业科学,2013,46(24):5163-5172.

[14] 张嘉琪,任志远,张翀.水热条件和人类活动对山西省植被覆盖变化的影响[J].水土保持通报,2014,34(4):128-133.

[15] 莫兴国,刘苏峡,林忠辉,等.无定河流域水量平衡变化的模拟[J].地理学报,2004,59(3):341-348.

[16] Heinsch F A, Reeves M, Votava P, et al. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm[M]. 2003:1-57.

[17] 朱峰,刘志明,王宗明,等.东北地区农田净初级生产力时空特征及其影响因素分析[J].资源科学,2010,32(11):2079-2084.

[18] 郭晓寅,何勇,沈永平,等.基于modis资料的2000—2004年江河源区陆地植被净初级生产力分析[J].冰川冻土,2006,28(4):512-518.

[19] 国志兴,王宗明,刘殿伟,等.三江平原农田生产力时空特征分析[J].农业工程学报,2009,25(1):249-254.

[20] 徐浩杰,杨太保.黄河源区植被净初级生产力时空变化特征及其对气候要素的响应[J].资源科学,2013,35(10):2024-2031.

[21] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.

[22] 宋怡,马明国.基于Spot Vegetation数据的中国西北植被覆盖变化分析[J].中国沙漠,2007,27(1):89-93.

[23] 戴声佩,张勃,王海军.中国西北地区植被覆盖变化驱动因子分析[J].干旱区地理,2010,33(4):636-643.

[24] 邢广君,孟晓奇.无定河流域水土保持工程二期二阶段效益分析[J].黄河水利职业技术学院学报,2006,18(3):30-31.

[25] 白建军,白江涛,王磊.2000—2010年陕北地区植被NDVI时空变化及其与区域气候的关系[J].地理科学,2014,34(7):882-888.