

张耀文,张勃,姚荣鹏,等.2000—2020年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J].中国沙漠,2022,42(2):223-233.

# 2000—2020年渭河流域植被覆盖度及 产水量时空变化

张耀文,张勃,姚荣鹏,王立兵

(西北师范大学 地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**渭河流域是黄土高原最早实施生态治理工程的区域,研究其植被覆盖度和产水量的变化及相互关系,对于黄河流域以及黄土高原来说具有重要意义。基于InVEST产水模型和Landsat遥感影像分析了流域产水量和植被覆盖度的变化特征。结果表明:渭河流域2000—2020年植被覆盖度整体呈显著增加趋势,空间上渭河流域的NDVI从东南至西北呈现减小—增大—减小的趋势;极显著改善区域的面积占整个流域的面积69.2%,植被覆盖度等级整体向高植被覆盖度等级转换,流域生态环境正在逐渐改善。产水量整体呈上升趋势,坡度较大、植被覆盖度较高的区域产水量较低,而坡度较缓、人口活动较为强烈的区域产水量高。除夏季外,各季节产水量整体呈增加趋势;受生态工程的影响,夏季产水量呈先增加后降低的趋势,冬季产水量呈先减少后增加的趋势。植被类型多为林地,坡度较大的区域,产水量和植被覆盖度呈显著负相关,在坡度较缓、植被类型多为草地的区域,产水量和植被覆盖度呈正相关。随着植被覆盖度增加,产水量呈增加趋势,当植被覆盖度达到阈值时,流域产水量不再增加,甚至出现降低的趋势。

**关键词:**渭河流域; NDVI; InVEST模型; 产水量; 生态系统服务

文章编号: 1000-694X(2022)02-223-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00018

中图分类号: Q948

文献标志码: A

## 0 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分和流域水循环过程的重要环境因子。社会经济的迅速发展和城镇化进程的不断加快,使生态环境问题持续增加。20世纪80年代后,中国实施了一系列大型生态治理工程,对区域的植被恢复、土壤侵蚀以及生态文明建设等起到了良好作用<sup>[1]</sup>。黄土高原是最早实施生态治理工程的区域,区域内大量坡耕地转化为草地和林地,植被恢复效果显著<sup>[2]</sup>,黄河流域产沙量大幅降低,生态环境得以改善<sup>[3-4]</sup>。渭河作为黄河重要的一级支流,水土流失较为严重、生态环境较脆弱,得益于生态治理工程,流域内的生态环境得到改善<sup>[5-6]</sup>。植被大规模的恢复,会通过降水截留、土壤入渗、蒸散发等水文过程,对区域内的水循环和径流量产生反馈作用。通过分析流域内植被覆盖对产水量的影响,探究植被变化对水循环过程的

影响,为保障植被建设可持续健康发展提供定量依据,具有重要的理论和现实意义。

植被生长发育过程中,气候因素和人类活动作用较大。近21年来,黄土高原植被覆盖情况明显改善,其中气候因素对植被覆盖增加起到重要作用,同时植被覆盖会随着降水量的变化而变化<sup>[7-9]</sup>。自退耕还林还草等生态工程实施以来,黄土高原的植被覆盖状况得到极大的改善,对整个区域的生态环境产生了积极的影响<sup>[10-13]</sup>,还有研究表明,黄土高原植被覆盖增加的主要原因是人类活动对产水的影响<sup>[7-10]</sup>。随着黄土高原植被覆盖度增加,地表水分效应增加,蒸腾作用明显,使得黄土高原部分地区产水量出现下降问题<sup>[14-16]</sup>。而当植被覆盖度增加达到阈值时,可能会产生土壤干燥化、植被退化等新的生态问题<sup>[17-19]</sup>。目前植被覆盖对流域产水量影响的研究,已在黄土高原等多个生态脆弱地区以及人

收稿日期:2021-12-29; 改回日期:2022-03-02

资助项目:国家自然科学基金项目(41561024)

作者简介:张耀文(1998—),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事生态系统服务研究。E-mail: 19909311218@163.com

通信作者:张勃(E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn)

类活动较为密集的区域开展,在渭河流域的研究还较少,已有的研究对土地利用类型变化对流域产水量影响的研究较多<sup>[19-22]</sup>,而植被覆盖对产水量影响的研究较少。本研究选取黄土高原上的典型流域渭河流域作为研究区,采用InVEST产水模型以及Landsat系列卫星遥感数据产品,对2000—2020年流域的植被覆盖度和产水量进行评估和研究,分析渭河流域2000—2020年的产水量和植被覆盖度的时空变化及其关系,客观评价渭河流域生态治理工程,为渭河流域的生态环境健康以及区域水资源可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,是黄河的第一大支流,包括渭河干流、泾河及北洛河流域。渭河干流全长约为818 km,流域面积约为13.8万km<sup>2</sup>,流经甘肃省天水市、陕西省关中平原(主要包括宝鸡、咸阳、西安、渭南)等地区。渭河流域地势南高、中间低,地形复杂多样。山区面积较大,主要包括横贯于流域南部的秦岭、西部的六盘山、北部的

子午岭与黄龙山等山地以及流域上中游大面积的黄土高原丘陵沟壑区。其中渭河上中游的黄土丘陵区地形破碎复杂,多沟壑,少塬面,土质疏松,孔隙度大,极易遭受侵蚀;渭河中下游北部为陕北黄土高原是中国乃至世界上水土流失最为严重的地区,该区域生态环境脆弱,对气候的变化较为敏感,是黄河中上游水土保持的重点防治区域;中部为经黄土沉积和渭河干支流冲积而成的河谷冲积平原区——关中平原,其南侧为山势陡峻的秦岭中高山,北侧为舒缓起伏的低山丘陵;南部为秦岭北坡,地形坡度变化较大,山体和河流之间高差较大,加之降水高发,导致滑坡等灾害多发。北岸有泾河和北洛河两大支流,其中泾河流域北部为黄土丘陵沟壑区,中部为黄土高原沟壑区,而东部子午岭是泾河和北洛河的分水岭,具有茂密的次生天然林,西部和西南部分别为六盘山和关中平原;北洛河流域上游为黄土丘陵沟壑区,中游两侧为子午岭地区和黄龙山林区,下游进入关中地区。

渭河流域植被资源丰富且类型多样,植被类型共有针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草丛、草甸和栽培

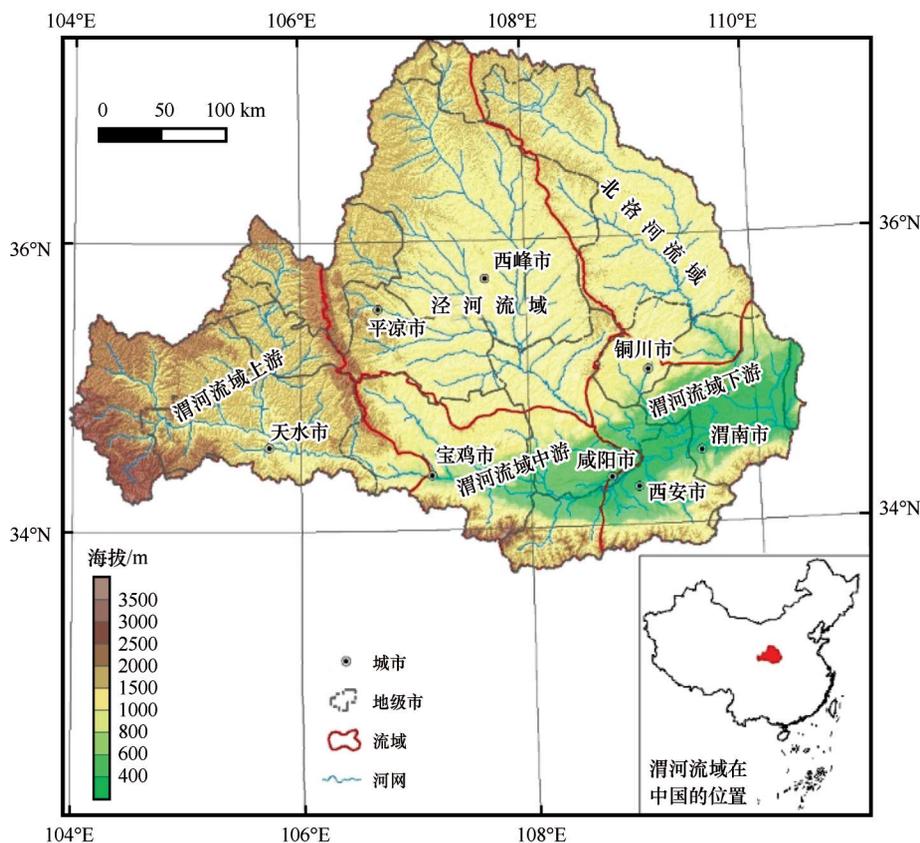


图1 渭河流域概况

Fig.1 General map of Weihe River Basin

植物7类。由于渭河流域大部分地区具备进行农业生产的优良条件,因此栽培植物在渭河流域的分布范围最为广泛,面积为8.35万 $\text{km}^2$ ,占流域总面积一半以上,主要分布于陇中高原、关中平原和泾河、北洛河河谷周边地区。阔叶林面积为1.8万 $\text{km}^2$ ,常见于秦岭、六盘山及子午岭林区,该地区天然植被留存较多,同时,也有灌丛、针叶林和草丛等植被类型分布于其中。流域北部的植被类型以温带草原为主,草甸主要分布于渭河上游海拔较高地区。流域植被覆盖度的空间差异显著,南部秦岭林区、西部六盘山林区和东部子午岭林区植被覆盖度可达80%以上,流域西部、北部及渭河平原等地区的植被覆盖度则相对较低。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源及处理方法

Landsat系列卫星具有长期连续对地观测和高时空分辨率等优势,被广泛应用于植被等地表地物信息提取,是植被变化监测研究的重要数据源。采用美国地质调查局(USGS)发布的Landsat系列卫星遥感数据产品(<http://glovis.usgs.gov>)进行研究区NDVI的计算。使用GEE云平台对Landsat影像完成大气校正、地形校正等预处理,极大地简化了数据处理流程。将年度NDVI最大值合成数据重采样为300 m分辨率。

使用的气象数据包括2000—2020年渭河流域逐日降水量、最低气温、最高气温、平均风速、平均相对湿度和日照时数,来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。潜在蒸散量(PET)的计算参照联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith算法。年尺度降水量和潜在蒸散量的空间插值使采用薄板样条函数法(ANUSPLIN)。土地利用数据使用ESACC300m土地利用数据([maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php](http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php))。流域边界以及坡度等地形数据均基于DEM通过ArcGIS进行提取,DEM数据使用SRTM([srtm.csi.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org))。土壤数据基于HWSO中的中国土壤数据集,提取SAND土壤砂粒含量、SILT土壤粉粒含量、CLAY土壤黏粒含量,OC土壤有机碳含量除以0.58得到OM土壤有机质含量([hwsd.org](http://hwsd.org))。根系深度,参考InVEST模型指南。

### 2.2 InVEST模型产水量模块

本文使用的InVEST产水模型是基于Budyko水热耦合平衡原理提出的一种水量平衡估算方法,即各栅格单元降水量与实际蒸散量之差作为该栅格单元产水量,模型不考虑地下水补给。首先,计算研究区每个栅格单元 $x$ 的年产水量 $Y(x)$ :

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (1)$$

式中: $AET(x)$ 表示栅格单元 $x$ 的年实际蒸散量; $P(x)$ 表示栅格单元 $x$ 的年降水量。

水量平衡公式,采用Budyko<sup>[23]</sup>水热耦合平衡假设公式:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^{\omega(x)}\right]^{1/\omega(x)} \quad (2)$$

式中: $PET(x)$ 表示潜在蒸散量; $\omega(x)$ 表示自然气候-土壤性质的非物理参数。

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (3)$$

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Re st. layer. deth, root. deth}) \cdot PAWC(x) \quad (4)$$

式中:Re st. layer. deth, root. plepth表示土壤的最大根系埋藏深度或植物根系深度; $PAWC(x)$ 为植被利用水分含量。

$$PAWC(x) = FMC(x) - WC(x) \quad (5)$$

式中: $FMC(x)$ 为田间持水量; $WC(x)$ 为萎蔫系数。

### 2.3 植被覆盖度变化趋势及变化显著性

采用最小二乘法,以时间为自变量,年NDVI为因变量,逐像元进行线性回归拟合获取2000—2020年像元植被覆盖度变化趋势<sup>[24]</sup>:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times y_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (6)$$

式中: $\text{Slope}$ 是单个像元回归方程的斜率,文中表示像元位置的NDVI年际变化率; $n$ 为总年数; $y_i$ 为第 $i$ 年像元NDVI值。当 $\text{Slope} > 0$ 时表示在研究时段内像元NDVI处于增长趋势,当 $\text{Slope} < 0$ 时表示在研究时段内像元NDVI处于减小趋势。

利用F检验方法对NDVI变化趋势进行显著性检验:

$$F = (n - 2) \frac{U}{Q} \quad (7)$$

$$P\{F(1, N - 2) \geq F_{1-a}(1, n - 2)\} = a \quad (8)$$

式中： $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 为误差平方和； $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$

为回归平方和； $\hat{y}_i$ 为第*i*年像元NDVI拟合值； $\bar{y}$ 为研究时段内像元NDVI平均值； $y_i$ 为第*i*年像元NDVI值； $n$ 为总年数； $a$ 为显著性水平。

通过NDVI表征植被覆盖度，结合渭河流域植被实际情况，将渭河流域2000—2020年NDVI均值图层，按照表1分级序列划分为5个等级。

表1 植被覆盖度等级划分  
Table 1 Types of vegetation cover

植被覆盖度等级	NDVI	面积比例/%	土地覆盖类型
低植被覆盖度	<0.2	0.17	水域、沙漠、裸土、裸岩等
中低植被覆盖度	0.2—0.4	10.66	建成区、稀疏草地、耕地等
中植被覆盖度	0.4—0.6	38.60	耕地、中产草地、低郁闭林地、建成区绿地
中高植被覆盖度	0.6—0.8	34.10	中高产草地、灌木林地、耕地
高植被覆盖度	>0.8	16.47	高产草地、密林地

### 2.4 植被覆盖度等级转移矩阵

空间转移矩阵可以量化分析某一要素在某一时段的空间格局变化<sup>[25]</sup>，引入植被覆盖度空间转移矩阵量化分析长时序不同等级植被变化中不同时段的状态转移，直观地反映各等级植被转入转出的面积。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被覆盖度时空变化

总体上看，渭河流域植被覆盖状况较好，由东南至西北，植被覆盖度呈现减小—增大—减小的趋势（图2A）。高植被覆盖区占流域总面积的16.47%，主

要分布在六盘山、秦岭北麓、子午岭和黄龙山，土地利用类型多为林地；中高植被覆盖度区（34.10%）集中分布在流域的东南部，分布位置与东南部的耕地分布相对应；中植被覆盖度区（38.60%）主要分布在流域的西部和中北部，与西部的耕地和中北部的草地相对应；中低（10.66%）与低（仅占0.17%）植被覆盖区主要分布在流域北部的稀疏草地、南部的建设用地以及西部少数草地和建设用地区域（图2B）。

### 3.2 土地利用与植被覆盖度时空变化态势

#### 3.2.1 NDVI变化态势

2000—2020年渭河流域NDVI均值处于较高水平，呈现波动增长趋势（图3A）。全区域NDVI均值为0.61。根据变化率正负和F检验在 $\alpha=0.005$ 和 $\alpha=$

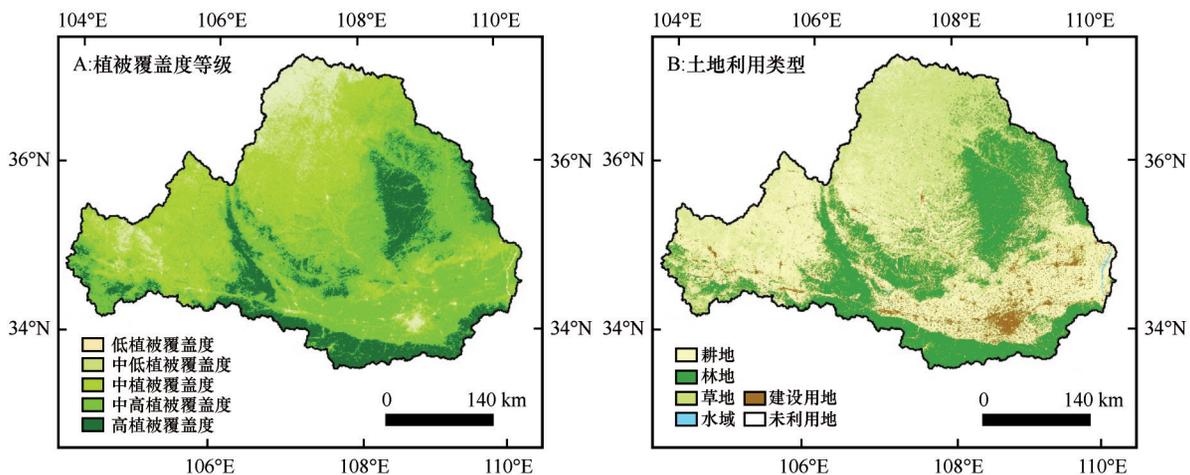


图2 渭河流域2000—2020年平均植被覆盖度及2020年土地利用空间格局

Fig.2 The spatial pattern of vegetation cover from 2000 to 2020 and land use in 2020 in the Weihe River Basin

0.05两个显著性水平上的检验结果,将像元NDVI变化显著性分为5个等级(表2)。

表2 显著性检验结果分级

Table 2 Classification of significance test results

变化趋势	变化率( $b$ )	显著性水平( $a$ )	面积占比/%
极显著退化	$b < 0$	$a < 0.005$	1.48
显著退化		$0.005 < a < 0.05$	0.94
基本不变		$a > 0.05$	16.37
显著增长	$b > 0$	$0.005 < a < 0.05$	12.01
极显著增长		$a < 0.005$	69.20

渭河流域2000—2020年NDVI变化趋势以极显著增长为主(图3B)。从变化趋势来看,极显著增长区域广泛分布于整个流域,占整个流域的69.20%;基本不变区域占整个流域的16.37%,主要为林地;显著和极显著退化区域仅占整个流域的2.42%,主要分布在建设用地或建设用地周边的区域。从土地利用类型来看,林地除流域南部部分稠密林地保持不变外,其他区域以显著或极显著增长为主;流域东南部耕地区域多数保持不变,但也有受人类活动影响呈现显著退化的区域。

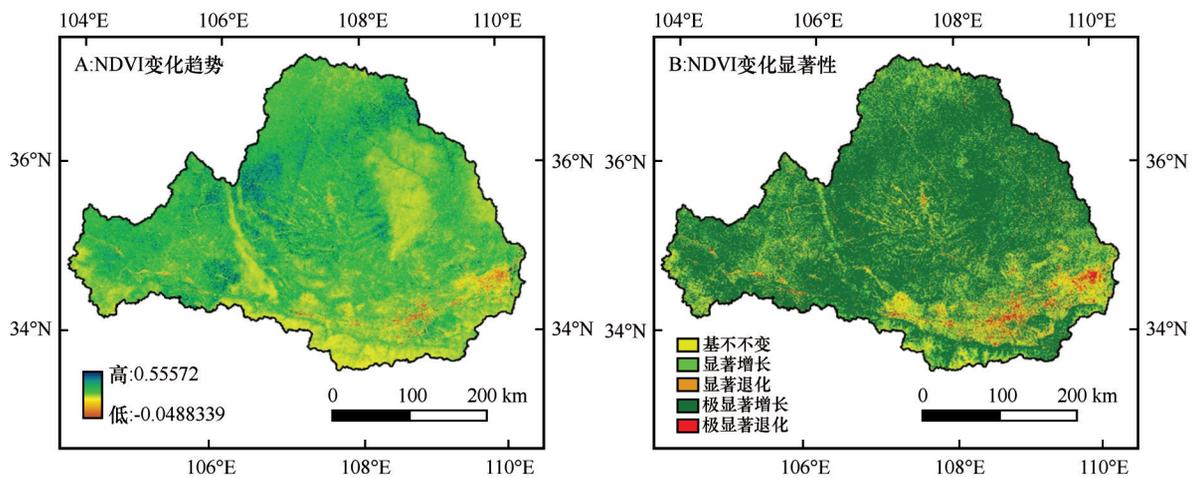


图3 渭河流域2000—2020年NDVI变化趋势及变化显著性

Fig.3 Variation trend and significance of NDVI in Weihe River Basin during 2000–2020

### 3.2.2 植被覆盖度时空变化态势

根据表1进行植被覆盖分级,应用ArcGIS栅格叠置功能实现2000—2005、2005—2010、2010—2015、2015—2020年4个时段各等级植被覆盖度的空间转移矩阵。

渭河流域2000—2005年由低植被覆盖度到高植被覆盖度转变。改善最大与退化最大的转化都发生在中低植被覆盖度与中植被覆盖度之间。2005—2010年中高和高植被覆盖度占比均有所增加,中植被覆盖度轻微减少,中低植被覆盖度大幅减少。这一时期以中低植被覆盖度→中植被覆盖度→中高植被覆盖度→高植被覆盖度转化路径为主。2010—2015年中植被覆盖度大幅减少,中高植被覆盖度区域轻微衰减,高植被覆盖度区域大幅增加。其中,这一时期呈现中植被覆盖度→中高植被覆盖度→高植被覆盖度转换方式。2015—2020年低、中低、中植被覆盖度类型进一步减少,主要转化为了中高和高植被覆盖度类型。该时期转化趋势

仍以改善为主,呈中植被覆盖度向中高植被覆盖度转化(表3)。

### 3.3 产水量时空变化

#### 3.3.1 模型验证

以2000—2020年气象数据和21期土地利用数据、陕西省水资源公报和甘肃省水资源公报公布的流域实际产水量为依据,模拟渭河流域2000—2020年的产水量。多次模拟表明,当Z值取3.4时,模型产水量的相对误差较小,InVEST模型可以较好地模拟渭河流域产水量。

#### 3.3.2 产水量时间变化

气候因素是影响流域产水量的最根本和最重要的因素,降水的时空变化都会影响到产水量时空变化。2000—2010年,降水量总体呈现出较慢的增加趋势,多年平均降水量为533 mm,同期流域产水量总体上呈上升趋势,多年平均产水量为70.36亿 $m^3$ 。整个流域在2000—2020年产水量变化大致与

表3 渭河流域2000—2020年植被覆盖度等级空间转移矩阵(单位:%)  
Table 3 Spatial shift matrix of vegetation cover in Weihe River Basin from 2000 to 2020 (unit:%)

时段	初始等级	转换等级					合计
		低植被覆盖度	中低植被覆盖度	中植被覆盖度	中高植被覆盖度	高植被覆盖度	
2000—2005年	低植被覆盖度	0.33	1.76	0.31	0.03	0.00	2.43
	中低植被覆盖度	0.26	11.51	11.25	1.47	0.01	24.50
	中植被覆盖度	0.10	6.25	18.91	9.85	0.19	35.30
	中高植被覆盖度	0.03	0.58	4.63	17.61	5.06	27.91
	高植被覆盖度	0.00	0.02	0.13	2.05	7.67	9.87
	合计	0.71	20.12	35.23	31.01	12.93	100
2005—2010年	低植被覆盖度	0.20	0.46	0.04	0.01	0.00	0.71
	中低植被覆盖度	0.15	8.29	11.06	0.61	0.01	20.12
	中植被覆盖度	0.06	1.99	20.45	12.62	0.10	35.23
	中高植被覆盖度	0.02	0.16	2.35	23.08	5.40	31.01
	高植被覆盖度	0.00	0.00	0.02	0.84	12.07	12.93
	合计	0.44	10.90	33.93	37.16	17.57	100
2010—2015年	低植被覆盖度	0.15	0.22	0.05	0.02	0.00	0.44
	中低植被覆盖度	0.47	5.55	3.90	0.96	0.02	10.90
	中植被覆盖度	0.12	4.28	17.23	11.83	0.47	33.93
	中高植被覆盖度	0.04	0.37	3.74	23.17	9.84	37.16
	高植被覆盖度	0.00	0.01	0.04	0.50	17.03	17.57
	合计	0.78	10.42	24.96	36.47	27.36	100
2015—2020年	低植被覆盖度	0.16	0.44	0.16	0.02	0.00	0.78
	中低植被覆盖度	0.17	2.59	6.75	0.88	0.02	10.42
	中植被覆盖度	0.07	0.95	10.46	13.20	0.28	24.96
	中高植被覆盖度	0.06	0.29	3.58	26.35	6.18	36.47
	高植被覆盖度	0.01	0.04	0.22	3.07	24.03	27.36
	合计	0.47	4.31	21.17	43.53	30.52	100

降水量变化相同。

2000—2020年,北洛河、泾河、渭河干流上游、中游及下游产水量均呈现出增加的趋势(图4),其中产水量增加趋势最明显的是泾河流域,其次是渭河干流上游和中游,北洛河流域和渭河下游流域产水量保持平稳,总体上,除渭河干流下游外,2011年之后各子流域的产水量高于2011年之前。

受到降水量的时间变化差异影响,各子流域的年产水量表现出不一致的变化特征。渭河上游产水量最高的年份是2018年,中、下游的产水量最高值均在2011年,产水量为32.8亿 $m^3$ 和31亿 $m^3$ 。泾河流域和北洛河流域最高值均为2013年,分别为32.7

亿 $m^3$ 和18.9亿 $m^3$ 。而各子流域最小值大多在2002年出现。从整体上看,各子流域整体呈增加的趋势,其中泾河流域、渭河上中游增加趋势较为明显。

渭河流域春季和秋季产水量整体呈大幅上升的趋势,夏季产水量呈下降的趋势,冬季产水量呈增加的趋势(图5)。随着退耕还林还草生态治理工程的实施,渭河流域夏季产水量呈先增加后减少的趋势,而冬季产水量呈先减少后增加的趋势。得益于生态工程对生态环境的改善,流域整体增加的产水量起到了削洪补枯的季节调节作用。

渭河流域多年平均产水量与流域内降水空间分布大体一致,与蒸散量分布相反,除气候因素外,

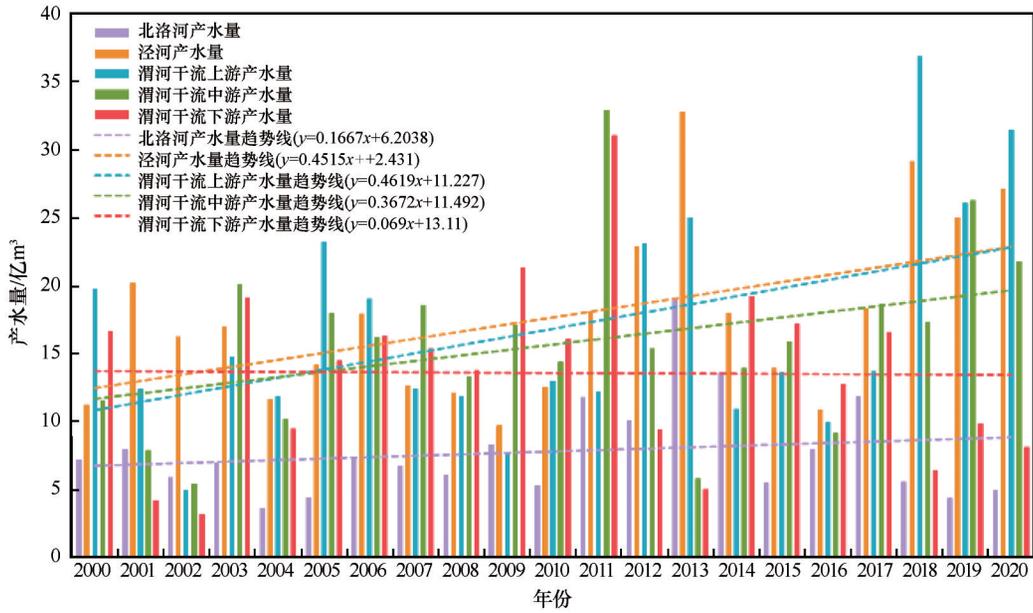


图 4 2000—2020 年渭河各子流域年产水量

Fig.4 Annual water production in each sub-basin of the Weihe River Basin from 2000 to 2020

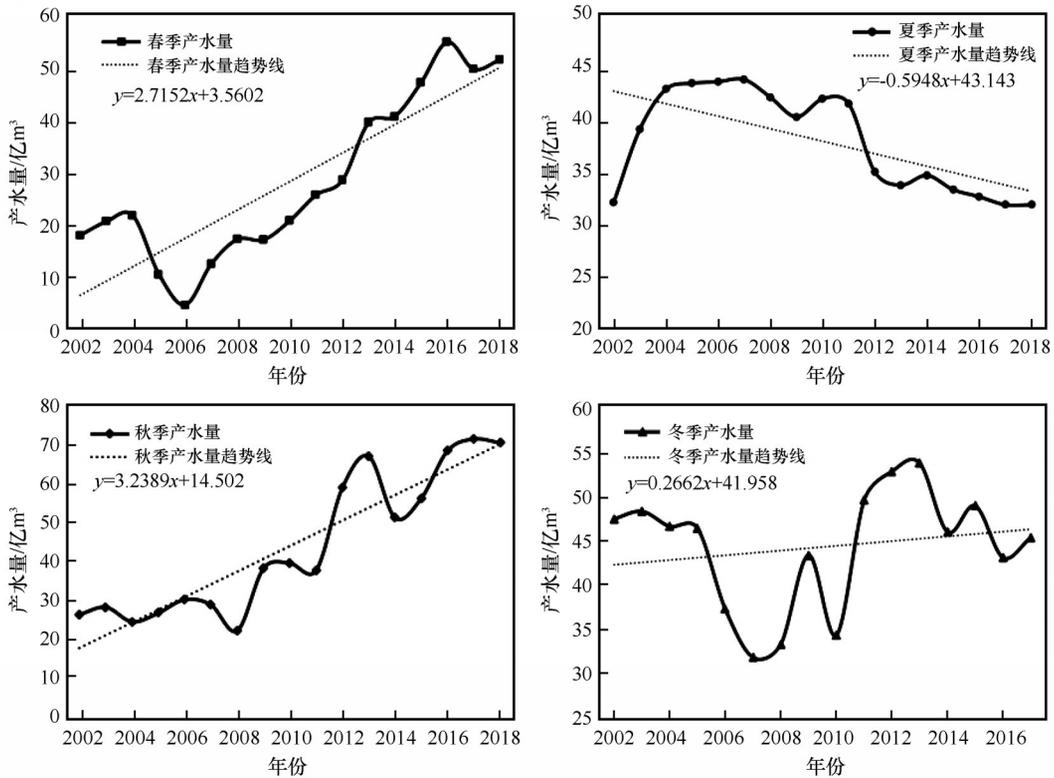


图 5 渭河流域各季节产水量 5 a 滑动平均

Fig.5 Five-year moving average of seasonal water production in the Weihe River Basin

还受到海拔以及土地利用等因素的影响。产水量高值区分布在关中平原地区、渭河源、秦岭北麓以及六盘山东麓,低值区分布于六盘山、子午岭、泾河流域和北洛河流域的黄土高原沟壑区和黄土丘陵沟壑区(图 6)。高值区除秦岭北麓外植被覆盖类型

多为中植被覆盖度的草地和耕地,而低值区的子午岭与六盘山均为植被覆盖度较高的林地。

渭河流域内各子流域的单位面积产水深度的空间分布格局存在明显的差异。渭河中下游单位面积产水深度受秦岭北麓较高的植被覆盖度影响,

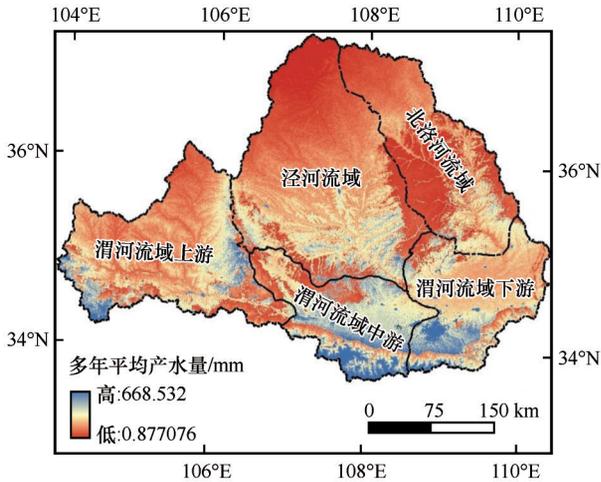


图6 渭河流域2000—2020年多年平均产水量空间格局  
Fig.6 Spatial pattern of water production in the Weihe River Basin from 2000 to 2020

沿河南岸高于北岸;北洛河流域与泾河流域单位面积产水深度空间分布均由北向南逐渐增加。

渭河流域2000—2020年的产水量在空间上呈

现南部减少而西北部增加趋势的特征(图7A、D)。大多区域产水量呈逐年增加趋势,呈增加趋势的区域面积约为10.7万km<sup>2</sup>,约占全区面积的78.39%,呈减少趋势的区域面积约2.9万km<sup>2</sup>,占全区面积的21.61%。增加程度较大的区域集中在流域的上游、六盘山以西及秦岭北部的部分区域,其中六盘山两侧、南部的秦岭地区呈显著增加趋势,呈减少趋势的区域主要分布在秦岭北部的渭河中下游区域。

2000—2010年渭河流域的产水量在空间上表现出南多北少的特征,呈增加趋势的区域集中在渭河流域中下游地区,约占全区面积的55.38%,其中30.06%的区域呈显著增加趋势,0.48%的区域呈极显著增加趋势;减少区域主要位于北洛河流域的北部和泾河流域的大部分区域,其中显著减少的区域集中在泾河流域,占减少区面积的19.6%,呈极显著减少趋势的区域面积占减少区面积的1.12%(图7B、E)。

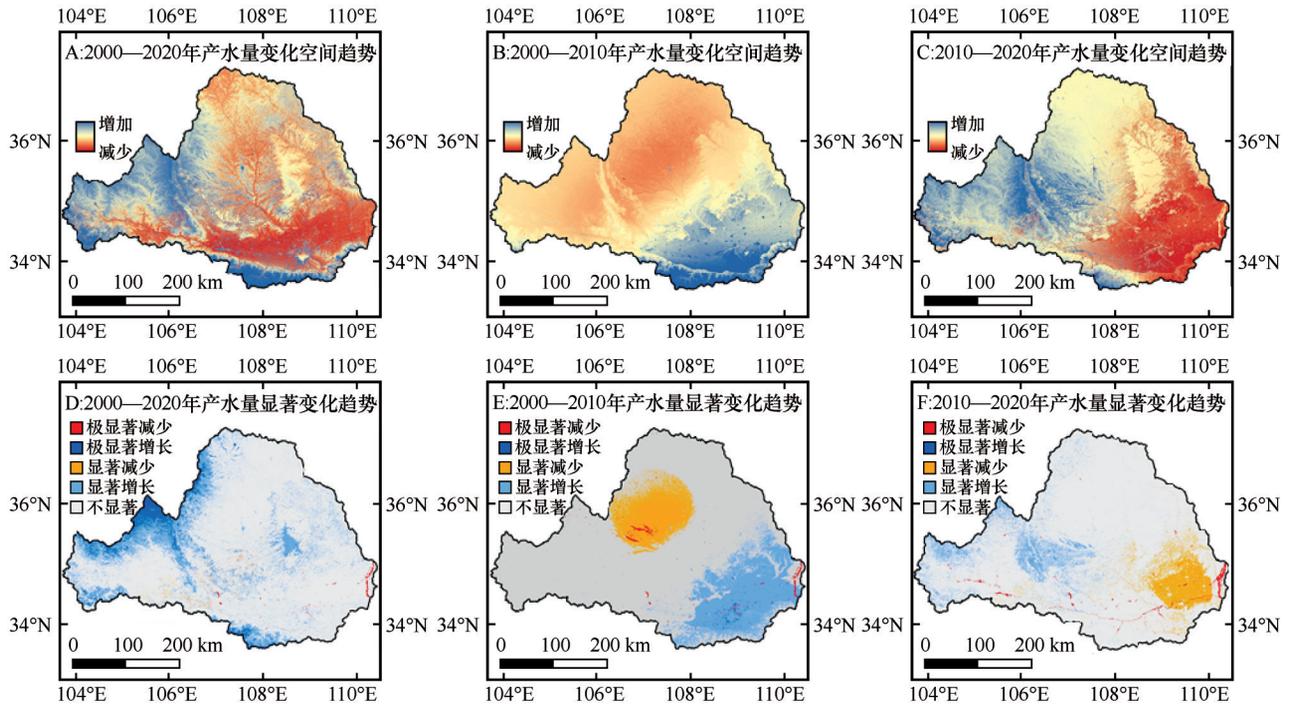


图7 2000—2020年渭河流域产水量变化空间趋势

Fig.7 Spatial variation trend of water production in Weihe River Basin in recent 21 years

2010—2020年流域产水量的变化与2000—2010年差异较大,在空间上呈现出西多东少的特征,减少区域集中在秦岭以北的渭河流域中下游地区,呈减少趋势的区域面积占全区面积的44.62%,其中渭河流域下游黄土高原地区呈显著和极显著减少趋势。呈增加趋势的区域主要位于渭河流域上游的

黄土丘陵区,占全区面积的55.38%,其中六盘山区的河谷川地呈显著和极显著增加趋势(图7C、F)。

### 3.3.3 产水量变化对植被覆盖度变化的响应

2000—2020年来的生态治理等多项工程以及气候变化引起的降水增加、气温上升等因素对渭河流域植被覆盖产生积极的影响。植被覆盖度等级

的改变使得流域产水量受到影响。渭河流域产水量随着NDVI的增加整体呈显著增加的趋势( $P < 0.05$ )。由产水量随NDVI的变化趋势可以看出,当NDVI达到0.6—0.7时,产水量增长趋势开始减缓,甚至出现不再增长且减少的趋势。由于植被覆盖达到阈值后,耗水量增加,导致流域整体产流减少。可见流域的生态治理工程需要根据当地自然条件因地制宜科学规划,宜林则林,宜草则草,不能盲目一刀切。正相关的区域主要分布在渭河平原、六盘

山、泾河的西南部和北部以及北洛河的东南部地区,均为坡度较缓且土地利用类型多为草地、耕地的区域;而负相关的区域主要在渭河源、渭河上游南部、秦岭北麓以及子午岭地区,多为坡度较高且植被覆盖多为林地的区域。其中负相关的区域约占全区的59.8%,正相关的区域约占全区的40.2%。在坡度较缓、人类活动较为频繁区域,植被覆盖增加,产水量增加,而在植被覆盖高、坡度较大区域,植被盖度增加,产水量减少。

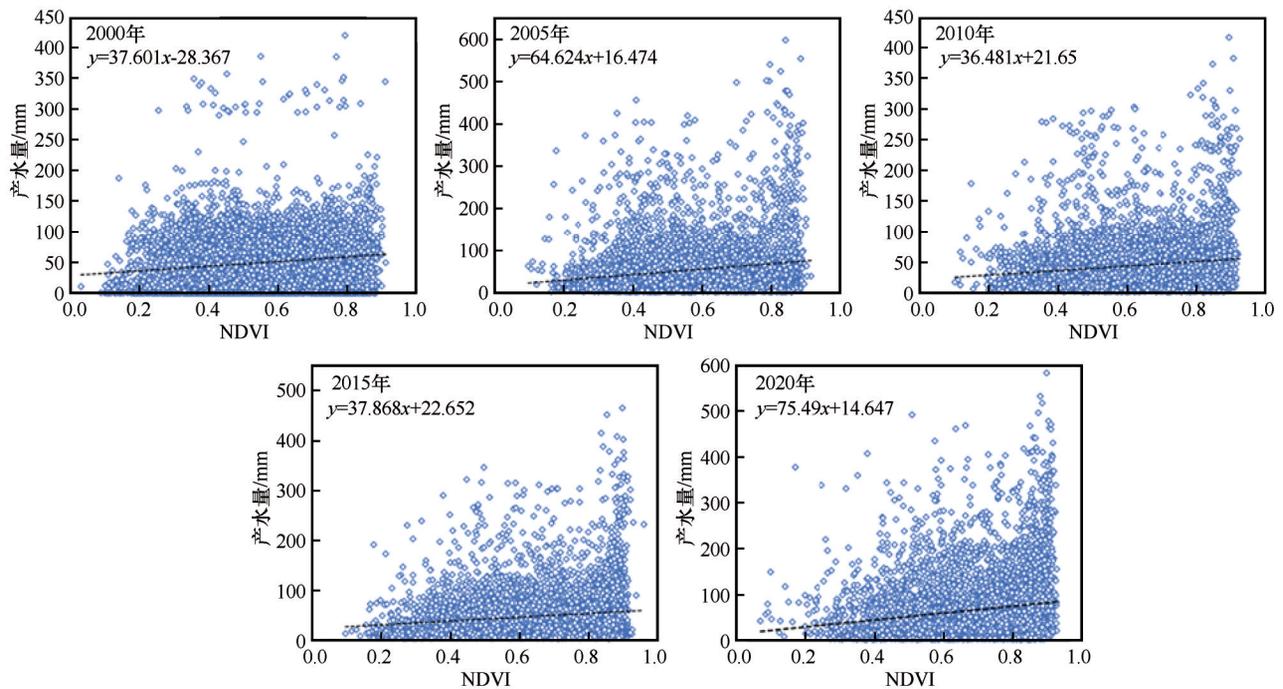


图8 渭河流域2000、2005、2010、2015、2020年产水量随NDVI变化

Fig.8 Variation of water production with NDVI in Weihe River Basin in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

## 4 讨论

退耕还林还草等生态治理工程,对于渭河流域生态环境的改善起到了重要的作用。从整体看,2000—2020年渭河流域植被覆盖增加,而在植被覆盖度本身较高的区域降水增加,以及退耕还林还草工程的实施,使得植被较为茂盛,这与前人的研究结果一致<sup>[6,26]</sup>,而在黄土丘陵区以及其他水土流失问题较为严重的区域,随着生态治理工程的实施以及气候变化,使得植被覆盖度增加,证明了退耕还林还草对整个流域植被恢复效果显著<sup>[27]</sup>。从时间来看,2005年以前,退耕还林工程初步实施,植被类型刚开始改变,其对流域整体的生态环境的影响较低,其固土保水的生态效益尚不明显,这与前人的研究结果一致<sup>[28-29]</sup>。2010年以后退耕还林还草工程

效益开始显现,部分树种成熟,空间立体结构凸显,流域整体向中、高植被覆盖度等级转移,流域整体的植被覆盖度增加。而从空间上看,渭河流域的NDVI分布从东南至西北呈现减小—增大—减小的趋势。极显著改善区域的面积占整个流域的面积近乎一半,这与其他关于渭河流域植被覆盖变化的空间分布研究结果一致<sup>[30-31]</sup>。

渭河为降水补给河流,降水量直接影响渭河流域产水量的变化,降水较多的年份产水量也较高,在降水整体增加的趋势下,渭河流域产水量整体呈增加的趋势<sup>[17,32]</sup>。渭河流域各子流域的产水量也明显增加,在黄土丘陵地区的泾河和渭河上游地区,由于坡度的原因,产水量减少,但在渭河平原地区,受人类活动的影响,建设用地面积较大,降水不易下渗,水分不利于保留,最终导致该流域产水量增

加,这与吕一河等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。渭河流域退耕还林还草等生态治理工程的实施,有利于生态环境的改善,而在降水增加的情况下,流域的削洪补枯作用明显加强,冬季产水量呈增加趋势,而夏季产水量呈减少趋势。流域产水量较低的区域均处于植被覆盖度较高的子午岭和六盘山地区,其植被覆盖类型多为林地,植被覆盖增加,使得其截留能力增强,产水量较低,秦岭北坡产水量较高是由于坡度较大,降水较多,导致其产水量较高<sup>[20,34-35]</sup>。

当植被覆盖增加到阈值时,产水量增加趋势减缓,甚至出现减少的趋势,这与前人的研究一致<sup>[14,19]</sup>。流域治理开始实施时,大量耕地转为草地和林地,森林的林冠层和枯枝落叶层对降水的截留作用,使得植被生长的水分得以保障,植被覆盖开始大幅增加,流域生态状况开始得到改善,但是随着流域植被覆盖增加,植被蒸腾作用增加,植被对水分的需求增加,若流域降水补给依旧充足时,植被覆盖仍会增加,但当降水补给无法满足流域植被所需水分时,植被覆盖将达到阈值,流域整体会呈现出耗水的趋势,使得流域水资源问题加剧最终可能会造成流域内生态干旱,植被死亡,土壤退化等问题<sup>[11,15,36]</sup>。为确保国家植被建设可持续发展,渭河流域应在合理科学的规划下,进行生态治理,而在未来要进一步加强产水量和植被覆盖变化的监测。

## 5 结论

渭河流域2000—2020年植被覆盖度整体呈显著增加趋势,空间上渭河流域的NDVI从东南至西北呈现减小—增大—减小的趋势,极显著改善区域的面积占整个流域的面积69.20%,植被覆盖度整体向高植被覆盖度等级转换,流域生态环境正在逐渐改善。

渭河流域2000—2020年产水量整体呈上升趋势,坡度较大、植被覆盖度较高的区域产水量较低,而坡度较缓、人口活动较为强烈的区域产水量高。除夏季外,各季节产水量整体呈增加趋势;受生态工程的影响,夏季产水量呈先增加后降低的趋势,冬季产水量呈先减少后增加的趋势。

渭河流域植被类型多为林地、坡度较大的区域,产水量和植被覆盖呈显著负相关,在坡度较缓、植被类型多为草地的区域,产水量和植被覆盖呈正相关。随着植被覆盖度增加,产水量呈增加趋势,

当植被覆盖度达到阈值时,NDVI为0.6—0.7时,流域产水量不再增加,甚至出现减少的趋势。

## 参考文献:

- [1] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [2] 张宝庆,吴普特,赵西宁.近30 a黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293.
- [3] Wang Shuai, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2016, 9: 38-41.
- [4] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 539: 436-449.
- [5] 王馨爽,吴梦月,马红利,等.渭河流域长时间序列NPP估算及时空变化特征分析[J].西北林学院学报,2020,35(6):205-211.
- [6] 庞家泰,段金亮,张瑞,等.2000—2019年渭河流域植被覆盖度时空演变特征及气候响应[J].水土保持研究,2021,28(5):230-237.
- [7] 李依璇,朱清科,石若莹,等.2000—2018年黄土高原植被覆盖时空变化及影响因素[J].中国水土保持科学,2021,19(4):60-68.
- [8] 何亮.黄土高原植被覆盖变化特征及驱动力分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [9] 张翀,白子怡,李学梅,等.2001—2018年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J].干旱区地理,2021,44(1):188-196.
- [10] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性[J].中国沙漠,2021,41(6):78-87.
- [11] 庄少豪.黄土高原生态系统服务功能对植被恢复的响应关系研究[D].西安:西安理工大学,2020.
- [12] 孙高鹏,刘宪锋,王小红,等.2001—2020年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):205-212.
- [13] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.
- [14] 张宝庆,邵蕊,赵西宁,等.大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):594-606.
- [15] 张宝庆,田磊,赵西宁,等.植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J].中国科学:地球科学,2021,51(7):1080-1091.
- [16] 汤秋鸿.全球变化水文学:陆地水循环与全球变化[J].中国科学:地球科学,2020,50(3):436-438.
- [17] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes [J]. Global and Planetary Change, 2013, 101: 119-128.
- [18] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits

- [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019–1022.
- [19] Fu B J, Wang S, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223–243.
- [20] 杨晓楠. 渭河流域(关天段)生态系统服务时空变化及权衡优化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [21] 周德成, 赵淑清, 朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响: 以陕西省安塞县为例[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1866–1878.
- [22] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 等. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2005–2020.
- [23] Budyko M I. *Climate and Life* [M]. Translated from Russian by Miller D H. New York: Academic Press, 1974.
- [24] 马明国, 董立新, 王雪梅. 过去21 a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 232–236.
- [25] 原丽娟, 毕如田, 徐立帅, 等. 沁河流域植被覆盖时空分异特征[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1093–1103.
- [26] 陆一帆. 近30年来渭河流域植被与气候变化互影响模式的探寻分析[J]. *北京测绘*, 2016(5): 7–12.
- [27] 张林齐, 任立良, 江善虎, 等. 1982~2015年渭河流域植被变化特征及气候因素影响[J]. *水文*, 2018, 38(2): 66–72.
- [28] 傅志军, 黄蓉, 周毓栋, 等. 基于NDVI的渭河流域时空演变分析[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(6): 54–57.
- [29] 余东洋. 渭河流域植被动态变化遥感时序分析及生态安全评价[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [30] 王丽霞, 余东洋, 刘招, 等. 渭河流域NDVI与气候因子时空变化及相关性研究[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 249–254.
- [31] 王丽霞, 张珈玮, 孟妮娜, 等. 基于CA-Markov的渭河流域NDVI时空变化模拟及预测[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 206–212.
- [32] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 664–676.
- [33] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191–5196.
- [34] 李盈盈, 刘康, 胡胜, 等. 陕西省子午岭生态功能区水源涵养能力研究[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(3): 636–642.
- [35] 徐瑞瑞, 高鹏, 穆兴民, 等. 渭河流域水沙时空变化及其对人类活动的响应[J]. *人民黄河*, 2020, 42(3): 17–24.
- [36] Li T S, Xia J, Zhang L, et al. An improved complementary relationship for estimating evapotranspiration attributed to climate change and revegetation in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125516.

## Temporal and spatial changes of vegetation coverage and water production in the Weihe River Basin from 2000 to 2020

Zhang Yaowen, Zhang Bo, Yao Rongpeng, Wang Libing

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** As one of the earliest areas in the Loess Plateau to implement ecological management projects, the Weihe River Basin is of great significance to the Yellow River Basin and the Loess Plateau. Based on the InVEST water production model and Landsat remote sensing images, this paper analyzes the changes of vegetation coverage and responses of water production in the watershed. The research results show that the overall vegetation coverage in the Weihe River Basin showed a significant increase trend from 2000 to 2020. The spatial distribution of NDVI in the Weihe River Basin showed a decreasing-increasing-decreasing trend from the southeast to the northwest. The area of the extremely significant improvement area accounted for 69.2% of the entire watershed, and the vegetation coverage type had shifted to high vegetation coverage as a whole, and the ecological environment of the watershed gradually improved. The overall water production was on the rise. However, in the areas with gentle slopes and strong population activities, the water production was high. The water production in each season, except for summer, showed an overall increasing trend. Affected by ecological engineering, the water production in summer showed a trend of first increasing and then decreasing, and the water production in winter showed a trend of first decreasing and then increasing; The vegetation type is mostly forest land, and the area with large slope has a significant negative correlation between water production and vegetation coverage. With the increase of vegetation coverage, the water production showed an increasing trend. When the vegetation coverage reached the threshold, the water production of the watershed no longer increased, and even decreased.

**Key words:** Weihe River Basin; NDVI; InVEST model; water production; ecosystem services