

黄河中游地区生态恢复对流域水资源的影响

王晓峰^{1,2}, 杨丹³, 冯晓明⁴, 程昌武³, 周潮伟³, 张欣蓉³, 奥勇^{1,2}

(1. 长安大学 土地工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710064;

3. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064; 4. 中国科学院 生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: [目的] 研究黄河中游地区生态恢复对水资源的影响, 为流域生态保护和高质量发展提供科学依据。[方法] 利用 GIMMS NDVI、ET、土壤水分、地表径流等相关水文数据, 基于趋势分析和双累积曲线等方法, 探讨生态恢复前后黄河中游地区蒸散发、土壤水分、地表径流的时空变化特征。[结果] 1982—2018年, 黄河中游地区植被覆盖度增加了 29.72%; 在黄河中游地区植被覆盖度增加 1%, 蒸散发量增加了 3~4 mm; 在生态恢复区土壤水分呈下降趋势, 下降速率为 0.001 3%/a; 各站点的平均径流量在 1961—2018年呈逐年下降趋势, 以生态恢复为代表的人类活动对径流量下降起到重要作用。[结论] 由于生态恢复和暖干化的气候背景, 黄河中游水资源严重短缺。建议后续黄河中游生态恢复综合考虑水资源, 减少人为干扰, 以自然植被恢复为主。

关键词: 生态恢复; 水资源; 蒸散发; 黄河中游; 退耕还林还草工程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0205-08

中图分类号: TV882.1, X171.4

文献参数: 王晓峰, 杨丹, 冯晓明, 等. 黄河中游地区生态恢复对流域水资源的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 205-212. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.030; Wang Xiaofeng, Yang Dan, Feng Xiaoming, et al. Impacts of ecological restoration on water resources in middle reaches of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 205-212.

Impacts of Ecological Restoration on Water Resources in Middle Reaches of Yellow River

Wang Xiaofeng^{1,2}, Yang Dan³, Feng Xiaoming⁴, Cheng Changwu³, Zhou Chaowei³, Zhang Xinrong³, Ao Yong^{1,2}

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 4. Center for Ecological and Environmental Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: [Objective] The impacts of ecological restoration in the middle reaches of Yellow River on water resources were studied in order to provide a scientific basis for the eco-environment protection and high-quality development of the basin. [Methods] Based on the GIMMS NDVI, ET, soil moisture, surface runoff and other hydrology data, the study used trend analysis and double cumulative curve methods to analyze the spatial and temporal characteristics of the evapotranspiration, soil water and surface runoff in the middle reaches of Yellow River, before and after ecological restoration. [Results] From 1982 to 2018, the fractional vegetation cover of the middle reaches of Yellow River increased by 29.72%. As the fractional vegetation cover increased by 1%, the evapotranspiration increased by 3~4 mm. In the ecological restoration area, the decline rate of soil moisture was 0.001 3% per year. The average runoff was decreasing from 1961 to 2018, and human activities represented by ecological restoration played an important role in the decline of runoff. [Conclusion] Due to the climate warming and drying and ecological restoration, there is a serious shortage of water resources in the middle reaches of Yellow River. People should consider water resources comprehensively, reduce human interference, and focus on natural vegetation restoration in the follow-up ecological restoration.

Keywords: ecological recovery; water resource; evapotranspiration; the middle reaches of Yellow River; grain for green program

收稿日期: 2020-08-15

修回日期: 2020-09-17

资助项目: 国家重点研发计划项目““两屏三带”生态系统服务格局优化”(2018YFC0507300); 陕西省土地整治重点实验室开放基金项目(2018-ZD01)

第一作者: 王晓峰(1977—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 教授, 主要从事生态遥感及建模方面的教学与科研工作。Email: wangxf@chd.edu.cn。

水是支撑全球社会经济发展的基础性自然资源^[1]。水资源短缺不仅威胁着人类的粮食安全、社会稳定,而且还会严重降低生态系统多样性。“水资源”是黄河流域发展的关键性问题^[2],多年来的植被扩张已经造成了当地水资源短缺严重,生态系统和人类用水间的矛盾不断加深^[3]。因此,研究黄河流域水资源变化对生态恢复的响应,了解水资源的变化规律,对未来平衡植被恢复与水资源矛盾和该流域的高质量发展具有重要意义。

黄土高原是典型的生态脆弱区,水土流失严重制约着经济的可持续发展,自历史时期,由于农业开垦利用面积扩大自然灾害频发等原因,该区域生态环境脆弱^[4]。为了改善环境,20世纪50年代以来,我国在黄河中游地区实施了诸如修建梯田和淤地坝建设等一系列水土保持措施^[5],特别是1999年以来全面实施的退耕还林还草等大规模生态修复工程^[6]。随着生态工程的实施,生态环境逐渐好转,但也产生了新的问题,如2000年以后黄河流域干支流径流量持续降低^[7];退耕还林还草工程导致土壤水分下降,土壤干层加厚,限制树木的生长,甚至使植被退化等^[8]。张殿君等^[9]通过分析黄土高原典型流域土地变化对蒸散发的影响,结果表明受生态恢复工程的影响2006年相对于1986年而言,罗玉沟小流域蒸散发增大的区域较大。穆兴民等^[10]通过对典型植被恢复的流域河川径流过程分析,认为植被有效恢复深刻改变了黄土高原土壤水文性质,使得黄土高原部分地区的产流模式出现了从超渗产流向蓄满产流转变的趋势。刘昌明等^[11]基于黄河干流4个典型水文站的径流数据来分析年径流量变化特征,结果显示在气候变化和人类活动的双重影响下,黄河年径流量呈现显著下降的趋势。水分是黄土高原生态恢复的关键因子,并且以人类为主导的生态恢复过程对植被格局、流域生态水文过程产生影响。但目前研究多基于小流域或站点尺度的单一水资源变化规律,尤其对于以水分为限制的植被承载力研究尚不深入。为此,本文基于现有黄河流域植被和水资源的变化研究,以黄河中游地区为对象,利用多源数据,通过趋势分析以及双线性累积曲线等方法,开展黄河中游地区生态恢复的区域效应研究,探讨退耕还林还草工程实施前后水资源对生态恢复工程的响应,系统揭示流域水资源的动态变化过程,从生态恢复的角度出发缓解未来区域的水资源短缺问题,以期促进黄河流域经济发展、维护黄河生态安全。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

黄河中游地区指内蒙古自治区的河口镇至郑州市

的桃花峪区间,位于32°—42°N和104°—113°E之间,平均海拔约为1000~1500m,河段总长1206.4km,流域面积为 $3.44 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。黄河中游地区属于大陆性季风气候,多年平均年降水量约为300~700mm,受地形等因素的影响,区域内降水量空间分布差异显著,总体由东南向西北递减,汛期6—9月的降水量占全年降水量的70%左右,多以暴雨为主,再加上土质疏松,地表沟壑纵横,使中游成为黄河泥沙的主要来源地区和全球水土流失最严重的地区。为了改善环境,自1999年以来,以黄河流域为核心生态恢复区的退耕还林还草项目大规模实施,因地制宜的进行植树造林、恢复植被,水土流失区逐步转换为生态恢复区。随着工程的实施,区域环境植被覆盖度和土地利用状况发生了巨大变化。

1.2 数据来源与处理

本文主要探究黄河中游地区在退耕还林还草工程实施前后水资源的变化规律,收集了植被指数和水资源的相关数据集:①1982—2015年的GIMMS NDVI 3g, V1.0数据集来源于美国国家航天航空局(<https://ecocast.arc.nasa.gov/>),2016—2018年NDVI数据下载于资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>),经过月最大值合成处理,基于像元二分模型,得到1982—2018年黄河中游逐年植被覆盖度数据集;②ET数据根据FAO56修正的Penman-Monteith方程计算获得,基础数据来源中国气象数据共享网的气象V3.0日值数据集,包括逐日的气压、相对湿度、风速、日照时数、最高温度和最低温度,经过批量格式转换、月最大值合成、批量裁剪和投影等预处理,得到时间跨度为1982—2018年的黄河中游年度ET数据集;③GLEAM(global land-surface evaporation amsterdam methodology)产品包含根区土壤水分、陆地蒸发、潜在蒸散发等数据集,可用于大范围内陆蒸散量时空变化、干旱特征、土壤水分特征分析等研究,数据集来源于<https://www.gleam.eu/>。本文使用的是全球范围月尺度GLEAM v3.3 a数据集,基于Matlab, Arcgis软件预处理得到1982—2018年黄河中游土壤水分数据集;④黄河中游皇甫站、温家川、甘谷驿和张家山4个站点的年径流量来自黄河水利委员会“黄河流域水文泥沙整编资料”(1961—1999年)和《中国河流泥沙公报》(2000—2018年);降水、温度数据来源于中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),时间为1960—2012年。

1.3 研究方法

1.3.1 像元二分模型 归一化植被指数(NDVI)是反映植被覆盖的重要参数。NDVI的计算公式为:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - R)}{(\text{NIR} + R)} \quad (1)$$

式中: NIR, R 分别对应 Landsat-8OLI 影像中的第 5 波段和第 4 波段, 即近红外波段和可见光红光波段。

植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 是指植被的垂直投影面积占总面积的百分比, 能够较好地表征植被覆盖信息, 是反映生态系统服务的基本特征量。利用 NDVI 采用像元二分模型估算植被覆盖度是一种普遍意义的方法^[12]。与其他模型相比, 该模型可以有效去除 NDVI 的噪点, 且方法简便, 计算参数易得, 计算公式为:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (2)$$

式中: $NDVI_{soil}, NDVI_{veg}$ 分别指研究区无植被覆盖区和完全植被覆盖区像元的 NDVI 值。本文根据研究区的基本情况, 分别选取累计频率为 5% 和 95% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$, 通过公式(1)计算得到研究区植被覆盖情况。结合研究区植被覆盖的实际情况, 将植被覆盖分为低植被覆盖度 (<10%)、较低植被覆盖度 (10%~30%)、中度植被覆盖度 (30%~50%)、较高植被覆盖度 (50%~70%) 和高植被覆盖度 (>70%) 5 个等级。

1.3.2 双累积曲线法 双累积曲线法^[13-14]是可用于水文气象要素一致性检验、缺值插补及趋势性变化和强度分析。其方法是以同期的降水和径流连续累积值作为坐标系的两轴, 当水文序列发生突变, 在突变

点前后的曲线会发生较明显的斜率变化。在基准期中, 累积径流深 ($\sum R$) 与累积降水量 ($\sum P$) 存线性关系, 其计算公式为:

$$\sum R = k \sum P + b \quad (3)$$

式中: k, b 为参数。

双累积曲线法中如果两个变量的累积值在坐标系中表示为一条直线, 那么其斜率为两要素对应点的比例常数; 如果斜率发生突变, 就说明两变量之间的比例常数发生改变, 那么斜率发生突变的点所对应的年份就是两个变量累积关系出现突变的时刻。

2 研究结果

2.1 黄河中游地区植被变化特征

黄河中游地区植被覆盖度有明显的空间差异 (图 1), 总体上呈现由西北向东南增加的趋势, 即较低植被覆盖度和低植被覆盖度主要分布于流域的西北部地区, 从 1982—2018 年所占区域面积具有明显的减少趋势; 较高植被覆盖度和高植被覆盖度主要分布于黄河中游的东南部, 所占区域的面积有增加趋势。具体来看, 流域中部分布有黄龙山和子午岭等林区, 南部为秦岭北麓, 植被覆盖度整体上较高。流域北部为陕北黄土高原, 本身的植被覆盖较少, 植被覆盖度较低。流域西北部主要为毛乌素沙地, 因此植被覆盖度最低。

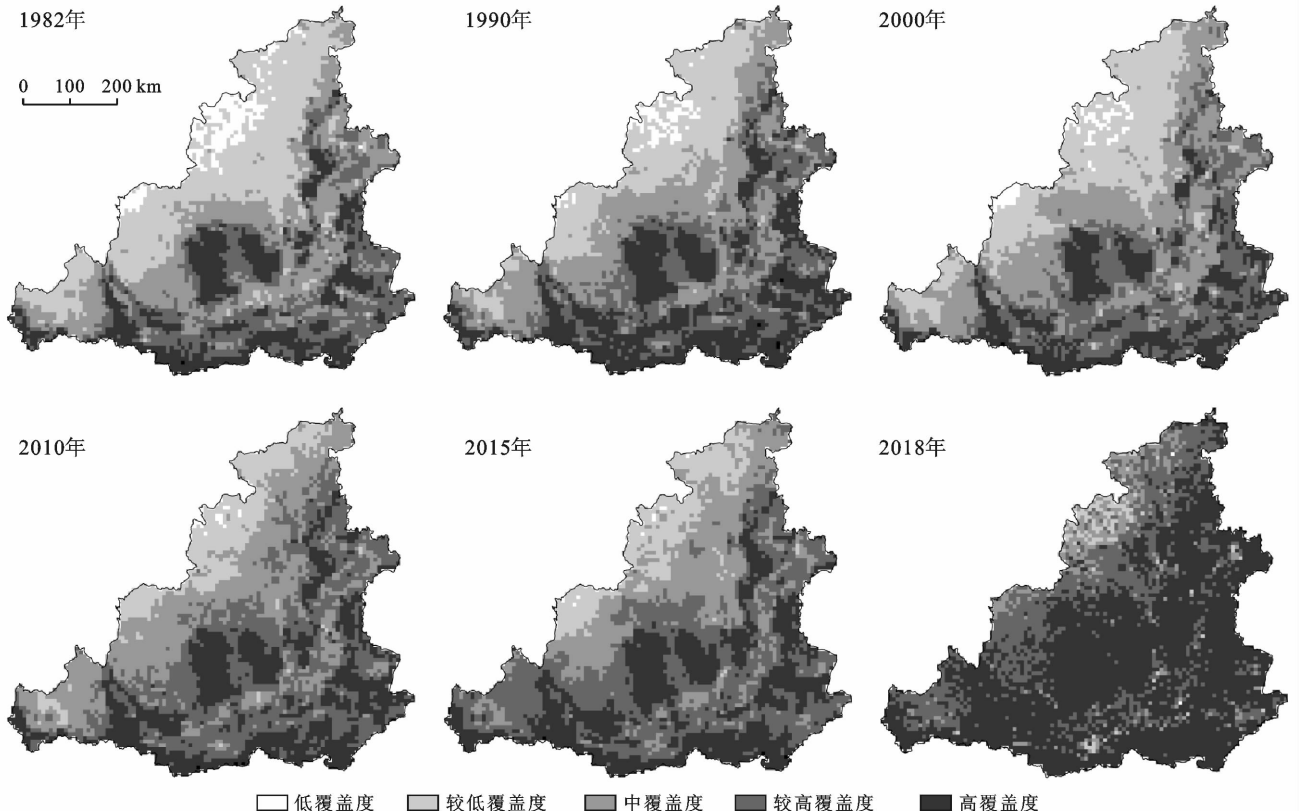


图 1 黄河中游地区 1982、1990、2000、2010、2015 和 2018 年植被覆盖度等级变化

1982—2018年,黄河中游地区植被覆盖度有了显著变化,共增加了29.72%,每年约增加0.8%。植被覆盖度的增加在生态恢复区表现的更加明显,由1982至2018年共增加39.82%。由图2可知,植被覆盖度的增加表现出明显的阶段性,1982—1999年,由于农作物种植、小流域种草种树等人类活动的影响^[15],黄河中游植被覆盖度在增加,但增加幅度较小。自1999年退耕还林还草工程大规模实施后,生态恢复区植被覆盖度的增长速率得到明显提升,由1982—1999年的0.0013%/a增长为2000—2018年的0.0175%/a。草地和森林面积分别从2000年的23.56%和40.69%增加到2010年的26.46%和41.16%,工程效益凸显^[16],有效改善了黄河中游地区生态环境质量。

2.2 生态恢复对水资源的影响

水资源是黄河中游地区生态恢复的限制性因子,本研究主要从蒸散发、土壤水和径流3个方面探讨生态恢复对水资源的影响。

2.2.1 生态恢复对蒸散发的影响

(1) 黄河中游地区蒸散发时空变化。黄河中游

地区蒸散发空间分布具有异质性(图3)。1982—2018年,黄河中游平均蒸散发呈现东南部高、西北部低,从东南向西北部递减的特征。其中吕梁山区、子午岭等林区蒸散发量最高,达到600~1300 mm,其次是关中盆地,蒸散发量为500~600 mm,而黄土高原西北部蒸散发较低为60~345 mm。整体上流域西北部的蒸散发低的区域面积在减小,东南部蒸散发量高的面积占比在增加。

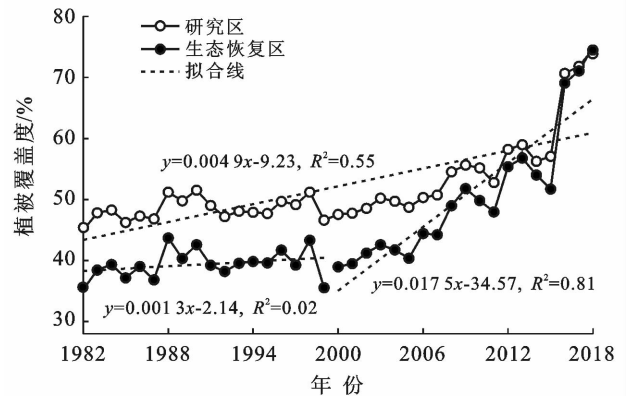


图2 黄河中游地区1982—2018年植被覆盖度变化趋势

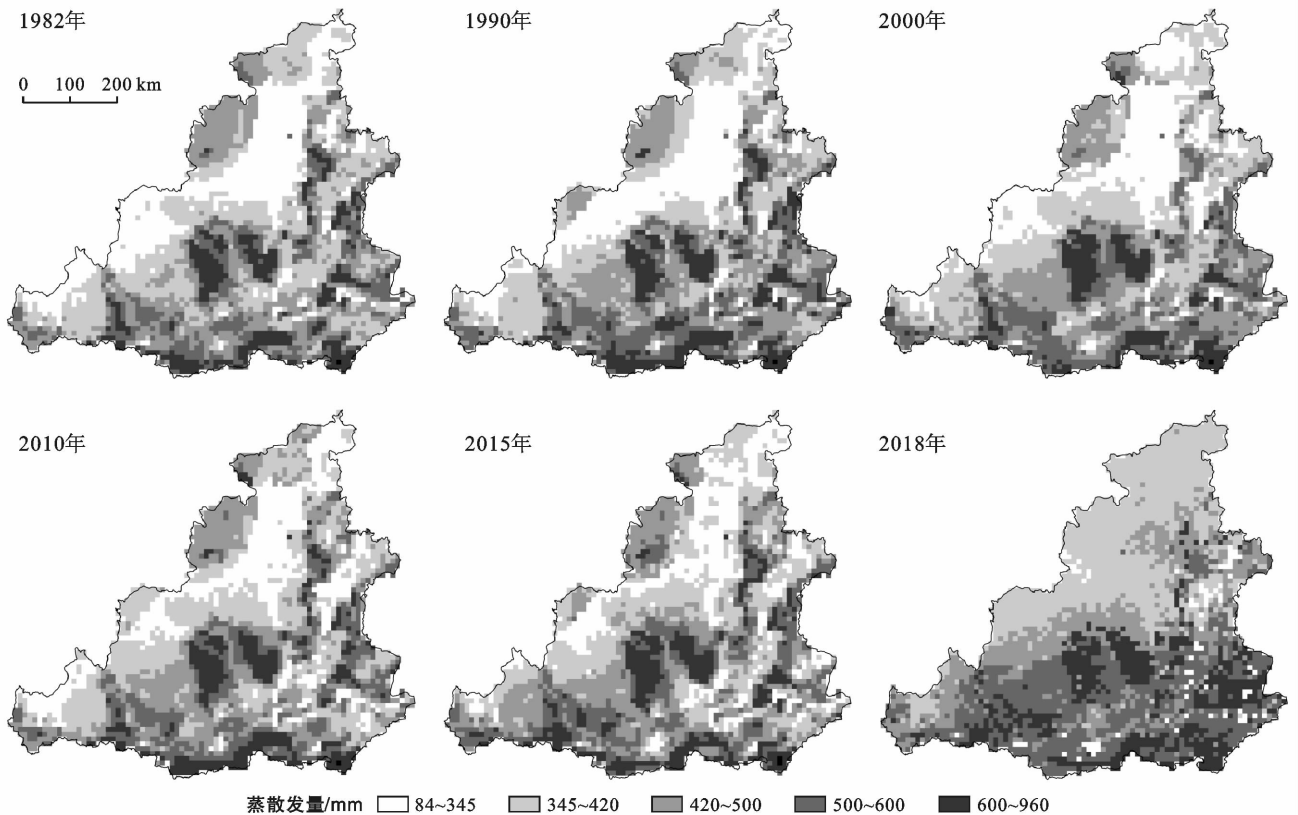


图3 黄河中游地区1982—2018年蒸散发空间分布格局

1982—2018年黄河中游地区蒸散发量呈增加趋势(图4),由1982年的401.84 mm到2018年499.55 mm,

以2.30 mm/a的速率波动增加。生态恢复区蒸散发量呈增长态势,1982—2018年的平均蒸散发量共增

加 97.72 mm。以 1999 年退耕还林工程的大规模实施为节点,1982—1999 年生态恢复区蒸散发量呈小幅度的增长,增长速率为 1.85 mm/a;在 1999 年退耕还林还草工程大规模实施后,至 2018 年生态恢复区蒸散发量的增长速率大大提升(为 4.87 mm/a),2018 年蒸散发量达到最大值为 457.29 mm。相关研究表明^[17],黄土高原 2001—2017 年蒸散发量平均增速为 8.23 mm/a,在黄河典型支流中沿河流域蒸散发量的增速最大,为 12.96 mm/a。

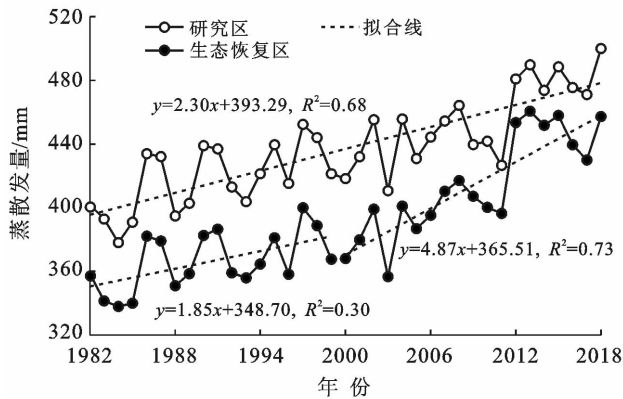


图4 黄河中游地区 1982—2018 年蒸散发变化趋势

(2) 生态恢复对蒸散发的影响。1982—2018 年,黄河中游地区植被覆盖度增加 29.72%,蒸散发增加 97.72 mm,即植被覆盖度每增加 1%,蒸散发量增加 3~4 mm。流域内植被覆盖度和蒸散发量的空间分布及变化趋势都具有很强的一致性,均呈现出东南部高、西北部低的分布格局和从东南向西北部递减的变化特征,即植被覆盖度的变化会直接影响蒸散发的分布格局。就黄河中游区域而言,生态恢复增大了植被蒸腾量和截留蒸发量,而受日趋恢复的植被遮蔽,地表接受的太阳辐射减少,可用于植株间土壤蒸发的能量减少^[18]。植被蒸腾量和截留蒸发量的增加量大于土壤蒸发的减少量,因此植被恢复导致的蒸腾量增加是蒸散发增加的主要原因^[19]。

2.2.2 生态恢复对土壤水的影响

(1) 黄河中游地区土壤水时空变化。黄河中游地区土壤水分空间分布具有显著的空间差异(图 5)。1982—2018 年,黄河中游地区土壤水总体上呈现南高北低、东高西低的格局,整体上没有较大的变化。具体来看,流域中部的关中平原地区土壤水最高,其次为流域西南部的六盘山、子午岭地区和中部的吕梁山区较低,流域西北部的毛乌素沙地土壤水最低。

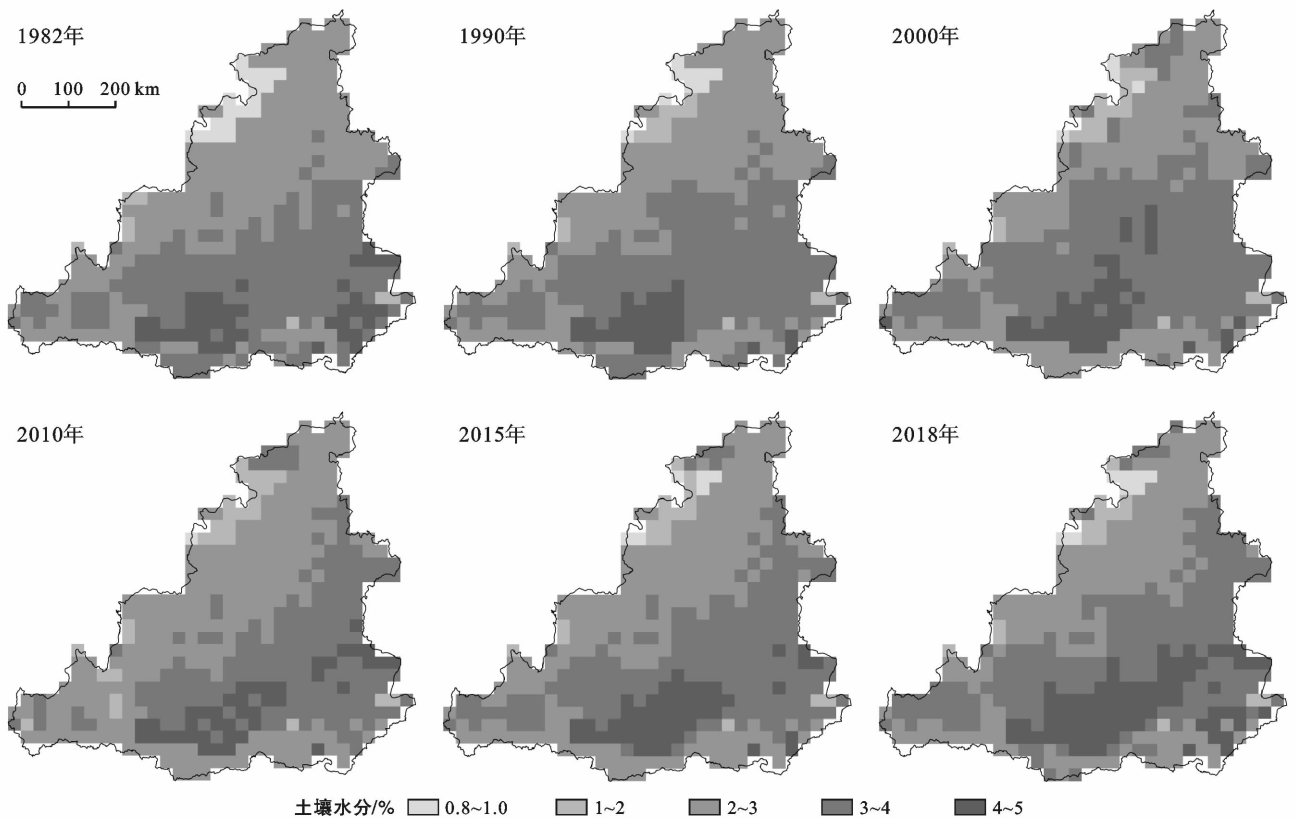


图5 黄河中游地区 1982—2018 年土壤水空间分布格局

由图 6 可以看出,1982—2018 年黄河中游地区土壤水分在 2.9%~3.3%之间波动,变化范围较小。

39 a 间生态恢复区的土壤水分整体上呈下降的趋势,下降速率为 0.001 3%/a。1982—1997 年间土壤水

分呈现增加的趋势,1998—2018 年土壤水分有所下降,这主要是因为植被恢复的生长年限对土壤水有重要影响^[20],在干旱半干旱地区,植被的生长需要主要消耗土壤中的水分,因此退耕还林还草工程实施后,生态恢复区的土壤水分表现为急剧下降;随着植被的恢复,生长所需的水分减少,即土壤水分会有一定程度的增加。

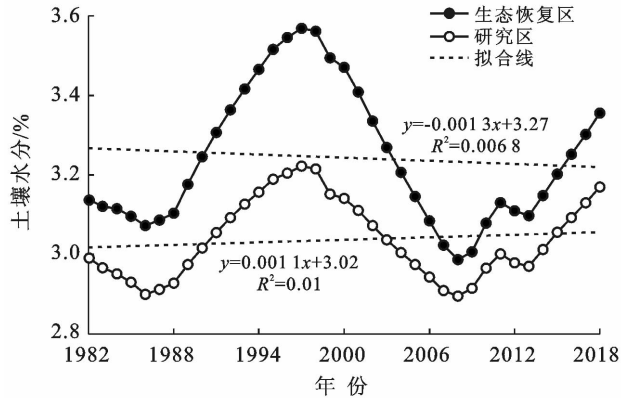


图 6 黄河中游地区 1982—2018 年土壤水变化趋势

(2) 生态恢复对土壤水的影响。1982—2018 年黄河中游土壤水呈西北低、东南高的态势,整体上土壤水分基本保持不变。以退耕还林还草工程的实施为节点,生态恢复区的土壤水分呈现先升高后降低的趋势,但整体上有所下降,下降速率为 $0.0013\%/a$ 。主要是因为 1999 年退耕还林还草工程大规模实施,与自然植被相比,人工林地的密度较大消耗更多的土壤水分,在恢复期植被需要吸收水分满足生长需要,引起土壤水分减少、土壤干化^[21],进而影响区域的水文循环过程。2012 年黄土高原人工林地干层厚度超过 3 m ^[22]。在干旱半干旱地区,土壤水分是决定植被恢复成效的主要因素,而植被恢复也会改变土壤结构^[23]。因此,为了缓解黄河中游的水资源短缺、凸显生态恢复的工程效益、改良土壤结构,应该因地制宜的实施退耕还林还草,如降低人工林地的种植密度等,促进黄河流域的生态可持续发展。

2.2.3 生态恢复对径流的影响

(1) 黄河中游径流变化。本文基于研究区内皇甫站、温家川、甘谷驿和张家山 4 个水文站点的观测数据,分别对各个站点的年径流量进行对比,由表 1 可知,1961—2018 年,皇甫站、温家川、甘谷驿和张家山 4 个站点的年径流量均呈现不同程度的下降,下降速率分别为 0.0327 , 0.1141 , 0.0182 和 0.1927 ($10^8\text{ m}^3/a$)。研究^[24]表明,黄河中游径流量的减少趋势较为显著,这与本文的研究结果相符。基于年降水和径流双累积曲线可以看出(图 7),1971 年以及 1999

年分别为径流系数变化的转折点,变化率由 1961—1971 年的 $1.38/a$ 减少到 1999—2009 年的 $0.60/a$,且降水减少是整个研究期间径流减少的主要原因。

表 1 黄河中游典型水文站的年均径流量

年份	径流量/ 10^8 m^3			
	皇甫站	温家川	甘谷驿	张家山
1961	3.45	12.41	2.15	4.03
1965	0.41	2.94	1.35	12.31
1970	1.62	8.37	2.17	24.15
1975	0.65	4.29	1.84	26.05
1980	0.92	4.77	1.44	13.58
1985	0.94	7.53	2.45	18.50
1990	0.74	4.29	2.28	20.26
1995	0.71	5.20	1.70	12.07
2000	0.29	1.72	1.16	7.76
2005	0.11	1.42	1.49	10.19
2010	0.07	1.25	1.28	14.07
2015	0.05	1.92	0.95	7.89
2018	0.22	3.54	1.56	16.40

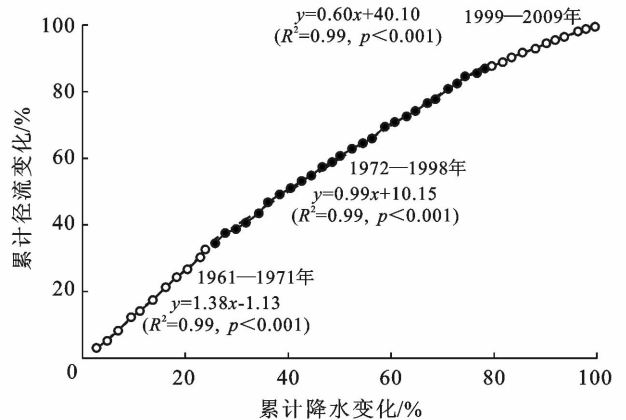


图 7 黄河中游不同时段径流系数变化

(2) 生态恢复对径流量的影响。从 1961—2018 年,黄河中游皇甫站、温家川、甘谷驿和张家山 4 个典型水文站的径流量都呈不同程度的下降趋势。在退耕还林还草工程实施后 10 a(2000—2010 年)内,头道拐—龙门区间径流量下降的主要驱动因素是生态恢复^[25]。2000—2010 年生态恢复导致黄土高原的径流量每年损失 $0.5 \pm 0.3\text{ mm}$ ^[3]。赵阳等^[26]通过剖析 1950—2016 年黄河干流水沙特征,发现人类活动对中游水沙减少的贡献率达到 90% 以上。王国庆等^[27]基于可变下渗容量模型、归因识别等方法,对黄河重点区间径流研究表明,1955—1969 年人类活动的影响对径流减少的贡献率达到 70% 以上。因此,以生态恢复为代表的人类活动在径流减少过程中占举足轻重的地位。

3 讨论

黄河中游地区处于中纬度的干旱半干旱区,水资源对气候变化的响应更敏感。1960—2012年黄河中游气温呈显著上升趋势,升高速率为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$;降水量呈下降趋势,下降速率为 $0.57\text{ mm}/\text{a}$,黄河中游在过去53 a整体趋于暖干化。在2021—2050年黄河流域气温将持续显著升高^[27],极端降水过程增加,总体水资源供需矛盾凸显,进一步加剧了水资源的短缺。

流域是气候变化和人类活动等共同作用的动态系统,气候变化将直接影响河流的水文状况,进而改变水资源的利用。蒸散发、土壤水分、地表径流是水文循环的重要组成部分,共同决定着区域的水资源状况。随着全球变暖、降雨不规律、极端自然灾害事件频发和人类活动的作用,区域甚至全球的蒸散发、土壤水分、径流等水资源的时空变化和分布特征发生了显著变化^[28]。蒸散发是水文循环的核心环节,在干旱半干旱地区,温度升高促进蒸发蒸腾、空气中水分含量增加、加速了地面与高空的水汽循环^[29],全球变暖,土壤旱化程度加重,造成地表植被退化、土壤干层又会影响到地下水补给和陆地水循环。另一方面,人类活动也影响水文循环过程,罗家林等^[30]人研究认为,生态恢复工程改变了地表下垫面的性质,增强了植被的蒸腾作用,加剧了水资源短缺,对流域内的水循环过程产生消极影响。黄土高原气候干燥、水资源短缺、生态系统脆弱,为实现水资源的可持续利用,要重视环境的自身承载力,降低人为干扰,以自然恢复为主,逐步缓和生态恢复与水资源不平衡的矛盾。

本文只针对年尺度上的植被指数和各种水资源进行分析,在一定程度上忽视了植被生长状况和季节变化,会对结果有一定的影响,如在夏季植被的生长季蒸散发量增加、土壤水分减少,但在冬季由于植被枝叶凋落,蒸散发量会降低;现有的水文模型仅考虑了小于 1 m 的土壤水分过程,限制了在土壤干层模拟方面的应用^[4];黄河中游径流量不仅仅受生态恢复的影响,随着人口的剧增,居民的生产生活用水、农业灌溉用水量增加和气候变化,都会导致流域径流量的减少,全球温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,径流量约减少 4% ^[31]。

4 结论

本研究以黄河中游地区为研究对象,深入分析了生态修复工程实施前后该流域水资源(蒸散发、土壤水以及地表径流)对植被恢复响应的演变规律,主要得出以下结论。

(1) 本文基于遥感、水资源参量、流域水文检测等数据,使用像元二分模型、趋势分析、双线性累计曲线等方法,对黄河中游1982—2018年的植被覆盖、水资源(蒸散发、土壤水分、地表径流)变化进行分析,在此基础上系统研究生态恢复工程实施前后植被覆盖度变化、水资源对其变化的响应,以及讨论在未来暖干化的气候背景下生态恢复对水资源的影响,以期为该地区农业灌溉、生态需水以及水资源合理配置等可持续发展提供一定的参考。

(2) 1982—2018年,黄河中游地区植被覆盖度增加了 29.72% 。整个黄河中游地区在植被覆盖度增加 1% 的情况下,蒸散发量增加 $3\sim 4\text{ mm}$;土壤水分在整个中游地区基本保持不变,但在生态恢复区呈下降趋势,速率为 $0.0013\%/a$;各个水文站的平均径流量在1961—2018年呈逐年下降趋势,以生态恢复为代表的活动对径流下降起到重要作用。

(3) 随着退耕还林还草为代表的生态恢复工程的实施,黄河中游地区的植被覆盖状况得到很大程度的好转,但是与此同时水资源被过度消耗,在未来暖干化的气候背景下,水资源短缺的状况将会愈发严重。建议今后黄河流域生态恢复要综合考虑环境自身承载力和水资源,减少人为的干扰,以自然植被恢复为主,增强生态系统自我调节的能力,实现流域的高质量发展。

[参 考 文 献]

- [1] 金菊良,董涛,郇建强,等.不同承载标准下水资源承载力评价[J].水科学进展,2018,29(1):31-39.
- [2] 肖伟.黄河流域高质量发展应重视水资源合理利用[N].经济日报,2020-03-03(011).
- [3] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [4] 邵明安,王云强,贾小旭.黄土高原生态建设与土壤干燥化[J].中国科学院院刊,2015,30(Z1):178-185.
- [5] 白晓刚,康瑞敏.黄土高原地区淤地坝建设的地位及发展思路[J].山西水土保持科技,2010(3):6-8.
- [6] Fu Bojie, Liu Yu, Lue Yihe, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [7] 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.
- [8] Jia Xiaoxu, Luo Yi, Shao Mingan, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113-122.

- [9] 张殿君, 张学霞, 武鹏飞. 黄土高原典型流域土地利用变化对蒸散发影响研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3): 400-408.
- [10] 穆兴民, 顾朝军, 孙文义, 等. 植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 31-39.
- [11] 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 11-15.
- [12] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [13] 武旭同, 李娜, 王腊春. 近60年来长江干流水沙特征分析[J]. 泥沙研究, 2016(5): 40-46.
- [14] 胡彩虹, 王艺璇, 管新建, 等. 基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J]. 水资源研究, 2012, 1(4): 204-210.
- [15] 张亚玲, 苏惠敏, 张小勇. 1998—2012年黄河流域植被覆盖变化时空分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 597-602.
- [16] Wang Xiaofeng, Xiao Feiyan, Feng Xiaoming, et al. Soil conservation on the Loess Plateau and the regional effect: Impact of the 'Grain for Green' project [J]. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 2018, 109(3/4): 461-471.
- [17] 周志鹏, 孙文义, 穆兴民, 等. 2001—2017年黄土高原实际蒸散发的时空格局[J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 76-80, 84.
- [18] 刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 7-12.
- [19] 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.
- [20] Yang Lei, Wei Wei, Chen Liding, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2014, 115: 123-133.
- [21] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 52-60.
- [22] Wang Yunqiang, Shao Miugan, Liu Zhipeng, et al. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the Loess Plateau, China [J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(2): 311-330.
- [23] Liu Wenzhao, Zhang Xingchang, Dang Tinghui, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the Southern Loess Plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1133-1138.
- [24] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158.
- [25] 张建梅, 马燮桃, 李艳忠. 1980—2016年黄河中游河龙区间植被动态及其对径流的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 18(3): 91-109.
- [26] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近70年黄河流域水沙情势及其成因分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112-119.
- [27] 王国庆, 管晓祥, 王乐扬, 等. 气候变化和人类活动对黄河重点区间径流的影响[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 26-30, 39.
- [28] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化对水文水资源影响研究综述[J]. 中国水利, 2008(2): 47-51.
- [29] Li Yuzhe, Fan Jianwen, Hu Zhongmin, et al. Comparison of evapotranspiration components and water-use efficiency among different land use patterns of temperate steppe in the Northern China pastoral-farming ecotone [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(6): 827-841.
- [30] 罗家林, 何云辉. 水土保持与生态环境之间的关联性研究[J]. 低碳世界, 2020, 10(4): 22-23.
- [31] Labat D, Godd ris Y, Probst J L, et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming [J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(6): 631-642.