

DOI: 10.5846/stxb202010252718

安善涛,焦磊,梁伟,严建武,张为彬,金朝,纪秋磊,王凤娇,杨盼.基于多源数据的黄土高原陆地水循环结构变化分析.生态学报,2021,41(17): 6800-6813.

An S T, Jiao L, Liang W, Yan J W, Zhang W B, Jin Z, Ji Q L, Wang F J, Yang P. Analysis of changes in land water cycle structure in the Loess Plateau based on multi-source data. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6800-6813.

基于多源数据的黄土高原陆地水循环结构变化分析

安善涛¹, 焦磊^{1,*}, 梁伟¹, 严建武¹, 张为彬¹, 金朝², 纪秋磊¹, 王凤娇¹, 杨盼¹

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要:近几十年间,黄土高原的水循环进程在人类活动与气候变化的影响下已产生了剧烈的变化。为加深对水循环结构变化的了解与认识,利用 1982—2010 年的降水、蒸散发、径流、土壤储水量和社会经济用水等数据,运用 Mann-Kendall 趋势检验和线性回归分析方法,对黄土高原的水量平衡进行评估,且细化了组成水循环的 12 种水文变量,并分析了水循环各分量的变化趋势及其结构的演化规律。由于网格化的社会经济用水数据(1982—2010 年)对本研究产生了较大的时间限制,因此本文注重于探究这 29 年间黄土高原各水文变量的变化趋势及水循环结构的演化规律。结果表明:在自然系统中,蒸散发以 1.97 mm/a 的速率上升($P<0.01$),径流、降水和土壤储水量分别以 1.01 mm/a ($P<0.01$)、0.77 mm/a 和 0.46 mm/a 的速率下降。在社会系统中,社会经济用水以 0.50 mm/a 的速率上升,其中主要由于生活、制造业、发电和采矿用水分别以 0.22、0.23、0.30 mm/a 和 0.01 mm/a 的速率增加所导致。此外,灌溉和牲畜用水分别以 0.25 mm/a ($P<0.05$)、0.01 mm/a ($P<0.01$) 的速率减少。就水循环结构而言,多年平均蒸散发和社会经济用水占水循环的平均比例分别为 80.95%、15.27%,并以每年 0.16%、0.06% 的速率逐渐升高。径流、土壤储水量的变化占水循环的平均比例分别为 4.00%、-0.24%,并以每年 0.24% ($P<0.01$)、0.02% 的速率逐渐下降。随着社会经济的发展和人口的增加,区域水资源供需矛盾将进一步加剧,本研究对黄土高原水资源的科学调控与可持续利用有重要参考意义。

关键词:黄土高原;水循环;水循环结构;水量平衡

Analysis of changes in land water cycle structure in the Loess Plateau based on multi-source data

AN Shantao¹, JIAO Lei^{1,*}, LIANG Wei¹, YAN Jianwu¹, ZHANG Weibin¹, JIN Zhao², JI Qiulei¹, WANG Fengjiao¹, YANG Pan¹

1 School of Geography and Tourism of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: In recent decades, the water cycle process in the Loess Plateau has changed dramatically under the influence of human activities and climate change. To better understand the changes in the water cycle structure, based on precipitation, evapotranspiration, runoff, soil water storage, and social and economic water use from 1982 to 2010, this study explored the water balance of the Loess Plateau by using the Mann-Kendall trend test and linear regression analysis method. More importantly, we detailed the composition of the water cycle 12 kinds of hydrological variables (respectively precipitation,

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504701, 2016YFC0501601);国家自然科学基金项目(41771118);中央高校基金项目(GK201903070)

收稿日期:2020-01-02; 网络出版日期:2021-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljiao@snnu.edu.cn

changes in soil water storage, runoff, canopy interception, soil evaporation, transpiration, irrigation, mining, manufacturing, livestock, power generation, and domestic water use) and analyzed the changing trend of each component of the water cycle and the evolution of its structure. Unfortunately, because the gridded social and economic water use data (1982—2010) had imposed a relatively large time limit on the research, this study paid more attention to explore the changes in hydrological variables and the evolution of the water cycle structure in the Loess Plateau during the last 29 years (1982—2010). The results showed that in the natural system, evapotranspiration significantly increased at a rate of 1.97 mm/a ($P < 0.01$). By contrast, runoff, precipitation, and soil water storage significantly decreased at a rate of 1.01 mm/a ($P < 0.01$), 0.77 mm/a, and 0.46 mm/a, respectively. In the social system, the social and economic water use increased at a rate of 0.50 mm/a, which was mainly due to the increase of domestic (0.22 mm/a), manufacturing (0.23 mm/a), power generation (0.30 mm/a), and mining (0.01 mm/a). Moreover, irrigation and livestock water use significantly decreased at a rate of 0.25 mm/a ($P < 0.05$) and 0.01 mm/a ($P < 0.01$), respectively. For the water cycle structure, the multi-year average evapotranspiration and the average social and economic water use accounted for 80.95% and 15.27% of the water cycle, respectively, and gradually increased at a rate of 0.16% and 0.06% per year. The annual average runoff and soil water storage changes accounted for the average ratio of 4.00% and -0.24% in the water cycle, and gradually decreased at a rate of 0.24% ($P < 0.01$) and 0.02% per year. With the rapid development of the social economy and the growth of the population, the competition between the supply and demand of regional water resources would be further intensified more severely. Our study has obviously important reference significance for the scientific regulation and sustainable use of water resources in the Loess Plateau.

Key Words: the Loess Plateau; water cycle; water cycle structure; water balance

黄土高原水土流失严重、生态环境脆弱,是我国水资源短缺问题最突出的区域之一^[1]。近几十年来,在气候变化和人类活动的共同作用下,黄土高原水资源短缺的问题进一步加重^[2]。在气候变化方面,主要受到降水、温度等气象要素变化的影响^[3]。而人类活动对水循环的影响主要体现在土地利用的变化改变了自然水循环过程、社会经济的发展增加了对地下水的开采和地表水的利用等方面^[4-5]。例如,为缓解严重的水土流失问题,黄土高原地区于1999年开始实施了大规模的退耕还林(草)工程^[6],区域植被覆盖率明显增加^[7],植被耗水量加大^[1]。同时,随着社会经济的发展和人口的增长,其对水资源的需求量不断上升,人与生态系统的“水竞争”关系进一步加剧^[8],最终导致黄土高原水循环发生了剧烈变化^[9]。上述问题不但威胁黄土高原地区的生态安全和社会经济的可持续发展,而且影响到黄河下游水资源的可持续性^[10]。

水循环是连接大气水、地表水、地下水和生态水的纽带,其中降水、蒸散发、径流和社会经济用水等作为水循环的重要组成部分,其变化时刻影响着水资源系统和生态系统的稳定与安全^[8]。水循环结构是由自然和社会系统的各水文变量组成,其中包括降水、土壤储水量变化、径流、冠层截留、土壤蒸发、植被蒸腾、灌溉、采矿、制造、牲畜、发电和生活用水等,各变量的变化将引起水循环结构的变化。目前,更多的研究关注于自然水循环的变化,而考虑社会经济用水的研究相对较少。例如,Jin等的研究表明,在2000—2012年间黄土高原蒸散发以3.40 mm/a的速率增长^[11];Liang等的研究发现,径流呈现0.30—1.71 mm/a的下降趋势^[12];Zuo等人探究了黄土高原小流域产水量变化的原因^[13];Zhao等人基于水量平衡公式量化了毛乌素沙地储水量变化的驱动因素^[14]。Lv等人从自然水循环的角度分析了黄河流域的降水、蒸散发、径流和陆地储水量的变化趋势^[15]。然而,已往的研究大多从自然水循环的角度出发,仅对单个或某几个重要的水文变量进行研究,往往忽略了社会系统对水循环的影响,并且很少从自然和社会系统的角度整体分析水循环的组成及其变化趋势,缺乏对黄土高原水循环结构变化规律的认识^[14]。因此,本文针对已有研究的不足,从自然和社会系统的角度出发,考虑了自然和社会用水的情况,细化了组成水循环结构的12种水文变量(分别为降水、土壤储水量变化、径流、冠层截留、土壤蒸发、植被蒸腾、灌溉、采矿、制造业、牲畜、发电和生活用水),并对各个变量进行

量化分析,以探究分析水循环结构变化的规律。

1982—2010 年间黄土高原地区的人类活动强度较大,重大生态工程的广泛实施导致土地利用格局、植被覆盖度等变化剧烈^[16],水循环各变量变化明显^[1],目前其水循环结构的变化规律尚不清楚,对该地区水循环结构变化的研究变得尤为重要。因此,本研究利用 1982—2010 年的降水、蒸散发、径流、土壤储水量和社会经济用水等数据,运用 Mann-Kendall 趋势检验和线性回归分析方法进行研究。同时考虑到数据的可获取性(最新的社会经济用水栅格数据截止到 2010 年),本文细化了组成水循环结构的 12 个水文变量,针对 1982—2010 年黄土高原水循环结构发生的变化,更侧重于探究这 29 年间各水文变量的变化趋势及水循环结构的演化规律。研究结果以期对黄土高原地区的水资源科学调控、生态平衡和社会可持续发展有参考意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国西北部,总面积约 62.60 万 km²,该区域植被覆盖度低且生态环境脆弱(图 1),是中国水土流失最严重的区域之一^[17]。在气候特征上,大部分地区为半干旱和半湿润的气候,多年平均降水量为 144—812 mm,且大部分降水集中在夏季^[18]。黄土高原也是我国重要的农业产地,农业种类为旱作农业、雨养农业和灌溉农业,主要的农作物有小麦、玉米等^[19]。此外,该地区有丰富的煤、天然气等自然资源^[20]。

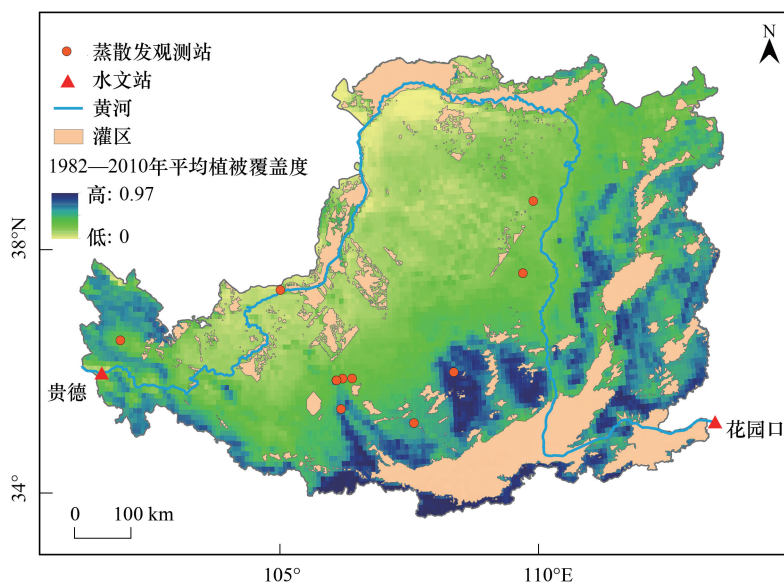


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location of study area

1.2 数据来源与处理

本研究通过获取 1982—2010 年黄土高原相关的水文数据以进行水循环结构的研究。数据的具体来源如下:

①降水:来源于中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn>),并使用 GIDS (Gradient plus Inverse-Distance-Squared) 方法对 640 个降雨站点进行空间插值^[21],该方法被广泛应用于气象数据的空间插值并具有良好的应用效果^[22]。

②土壤储水:来源于 GLDAS 陆面数据同化系统中的 GLDAS-1 数据集,使用 NOAH 模型模拟的 0—2 m 土壤储水数据。

③蒸散发:蒸散发数据采用 Jin 等的研究结果^[11],其使用的模型可以较好的模拟黄土高原 1982—2010 年

的蒸散发及其组分,具体包括植被蒸腾、土壤蒸发和冠层截留,详细的计算方法见 1.4 节。

④径流:来源于黄河水利委员会,使用 1982—2010 年贵德和花园口两个站点观测的径流量数据,将花园口站(出口站)减去贵德站(入口站)的径流量作为经过人类取水后区域的产流量。

⑤社会经济用水数据来源于 Huang 等的研究^[23],其使用世界粮农组织及多个国家统计的各部门取用水数据,利用全球水文模型以及时间、空间降尺度的方法重建了 1971—2010 年全球各部门逐月取用水的栅格数据,其分辨率为 0.5 度,具体包括:生活,牲畜,采矿,制造业,发电,采矿和灌溉取用水数据。

此外,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来源于 NOAA 系列气象卫星传感器的 GIMMS NDVI 第三代全球覆盖产品数据集;叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)数据来源于全球陆表特征数据集(GLASS),其由国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供;蒸散发的验证采用长武和沙坡头站的观测数据,其来源于国家生态科学数据中心;此外,还使用 Zhang、程等 15 篇文献中的观测数据来验证模拟的蒸散发^[24-38](表 1)。

表 1 数据列表

Table 1 Data list

数据 Data	来源 Data source	时间/空间分辨率 Temporal/Spatial resolution	数据获取方式 Data acquisition method
降水 Precipitation	中国气象科学数据共享网	D	站点观测
土壤储水量 Soil water storage	美国国家海洋大气局(NOAA)	月/0.25°	模型模拟
蒸散发 Evapotranspiration	Jin 等 ^[11]	月/1km	模型模拟
径流 Run off	黄河水利委员会	月	站点观测
社会经济用水 Social and economic water use	Huang 等 ^[23]	月/0.5°	模型模拟
归一化植被指数 Normalized Difference vegetation index	美国国家海洋大气局(NOAA)	15d/8km	遥感反演
叶面积指数 Leaf area index	国家地球系统科学数据中心	8d/0.05°	遥感反演
蒸散发观测数据 Evapotranspiration observation data	国家生态科学数据中心	月	站点观测
蒸散发文献数据 Evapotranspiration literature data	Zhang 等 ^[24] 、程积民等 ^[25] 、刘延惠 ^[26] 、 郭明春 ^[27] 、刘敏 ^[28] 、张华 ^[29] 、张卫强 ^[30] 、 田晶会 ^[31] 、王幼奇 ^[32] 、沈芳 ^[33] 、 赵世伟 ^[34] 、沈振西 ^[35] 、杨宪龙 ^[36] 、 熊伟 ^[37] 、刘建立 ^[38]	月/a	站点观测

1.3 分析方法

1.3.1 水量平衡计算

在“自然-社会”二元水循环理论框架下,忽略水库蓄水变化的影响,根据水量平衡模型^[39],利用组成水循环结构的 12 个水文变量(降水、土壤储水量变化、径流、冠层截留、土壤蒸发、植被蒸腾、灌溉、采矿、制造业、牲畜、发电和生活用水)建立水量平衡方程:

$$P = ET + R_{out} - R_{in} + \Delta SW + E_{society} \tag{1}$$

式中, P 是降水, ET 和 ΔSW 分别代表蒸散发及土壤储水量的变化量, R_{in} 、 R_{out} 分别表示经人类取用水后流入、流出本区域的径流量(流入为贵德站,流出为花园口站), $E_{society}$ 为社会经济用水。蒸散发的计算可由公式(2)计算获得:

$$ET = T + E_s + E_i \tag{2}$$

式中, T 为植被蒸腾, E_s 为土壤蒸发, E_i 为冠层截留。

社会经济用水由公式(3)计算:

$$E_{\text{society}} = \text{ELC} + \text{DOM} + \text{LIV} + \text{MIN} + \text{MAN} + \text{IRR} \quad (3)$$

式中,ELC 为发电用水,DOM 为生活用水,LIV 为牲畜用水,MIN 为采矿用水,MAN 为制造业用水,IRR 为灌溉用水。以上所有变量单位均为 mm。

1.3.2 线性回归、相关分析和 Mann-Kendall 趋势检验

本文利用线性回归和相关性分析方法,研究各水文变量的变化趋势及要素之间的相关关系,通过 Mann-Kendall(MK)检验各变量变化趋势的显著性。MK 检验中的变量可以不具有正态分布特征,因此该方法在水文变量变化趋势的检验上得到了广泛的应用^[40-41]。在检验之前,如果序列自相关性较高,则直接进行 MK 检验会有一些误差^[42],所以,一般应先剔除其相关性。本研究根据 Zhang 等使用的方法来计算自回归系数^[43]。首先,计算时间序列 $\{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 的一阶自回归系数。

$$\rho_1 = \frac{\text{Cov}(x_i, x_{i+1})}{\text{Var}(x_i)} = \frac{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

然后剔除相关性

$$x_i' = x_i - \rho_1 x_{i-1}$$

将剔除自相关性后的 $\{x_i'\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 序列仍记为 $\{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

做 MK 检验的计算时,首先构造一秩序列 s_k :

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 2, 3, \dots, i) \quad (6)$$

假设时间序列具有随机独立特性,定义统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

式中, $UF_1 = 0$, $E(s_k)$ 、 $\text{Var}(s_k)$ 分别为秩序列 s_k 的均值和方差,由下式计算:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{k(k+1)}{4} \\ \text{Var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad (8)$$

将序列 x 按 UF_k 逆序排序,再按照上式计算:

$$\begin{cases} UB_{K'} = -UF_k \\ K' = n + 1 - k \end{cases} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

通过分析序列 UF_k ,可检测出序列 x 的趋势。若 $UF_k > 0$,表示序列呈上升趋势; $UF_k < 0$ 则表示呈下降趋势。 UF_k 为标准正态分布,在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,查表得临界值 $U_{\alpha/2} = 1.96$,若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$,表明该序列存在显著趋势。

1.3.3 精度评价

本研究利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(Relative RMSE)和偏差(Bias)等的统计指标来评价模拟的蒸散发以及水量平衡计算的结果,指标的计算方法来源于 Moreira 等的研究^[44]。

1.4 蒸散发的计算及验证

已有研究表明,蒸散发是水文循环中除降水外最大的组成部分,陆地蒸散发约占总降水量的 $2/3$ ^[45],因此对蒸散发进行准确的模拟尤为重要。蒸散发的详细算法见 Jin 等的研究^[11],该模型在黄土高原地区有很好的适用性,分别计算植被蒸腾、冠层截留和植被蒸腾,三者之和为总的蒸散发量(见公式 2),详细算法如下:

植被蒸腾(T)由公式(10)计算:

$$T = E_{cp} f_t f_w \quad (10)$$

$$E_{cp} = \frac{1}{\lambda} (\Delta R_{nc} + f_c \rho C_p D / r_a) / (\Delta + \gamma \eta) \quad (11)$$

式中, T 为植被蒸腾(mm/a); f_t 为温度的限制因子; f_w 为水气压差的限制因子; E_{cp} 为植物的潜在蒸散发速率(mm/a)。公式(11)中, λ 为水的汽化潜热(J/kg); Δ 为温度-饱和水汽压关系曲线斜率($\text{hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_{nc} 表示冠层吸收净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); f_c 表示植被覆盖度; ρ 为空气密度(kg/m^3); C_p 表示空气比热($\text{J kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); D 表示饱和水汽压差(hPa); r_a 表示空气动力阻抗(s m^{-1}); γ 表示湿度计算常数($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); η 表示自然植被与参考植被最小阻抗之比。

土壤蒸发(E_s)由公式(12)计算:

$$E_s = \min(E_s, E_{ex}) \quad (12)$$

$$E_s = (f_{wet} + f_{SM} \times (1 - f_{wet})) \times E_{sp} \quad (13)$$

$$E_{sp} = \frac{1}{\lambda} [\Delta(R_{ns} - G) + (1 - f_c) \rho C_p D / r_{as}] / (\Delta + \gamma) \quad (14)$$

$$E_{ex} = S(t^{0.5} - (t - 1)^{0.5}) \quad (15)$$

式中, E_s 为土壤蒸发(mm/a); E_{ex} 为土壤渗透速率(mm/a); 公式(13)中, f_{wet} 为相对表面湿度; f_{SM} 为土壤水分限制因子; E_{sp} 为土壤潜在蒸发速率(mm/a)。公式(14)中: R_{ns} 为土壤吸收净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); r_{as} 为土壤表面和参考高度之间的空气动力学阻抗; G 为土壤热通量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。公式(15)中: S 为土壤渗透量, 其由土壤质地和结构决定; t 为从降水后第二天开始经过的天数。

冠层截留(E_i)算法由公式(16)计算:

$$E_i = \frac{1}{\lambda} \times f_{wet} \times R_{nc} \times a_{PT} \times \Delta / (\Delta + \gamma) \quad (16)$$

式中, E_i 为冠层截留(mm/a); a_{PT} 为 Priestley—Taylor 常数。

本研究采用长武(农田)和沙坡头(农田)站点观测数据对模拟的蒸散发进行时间序列验证(图2), R^2 分别为 0.73、0.60, 偏差分别为 -12.03 mm、7.84 mm, 均方根误差分别为 20.41 mm、14.6 mm。利用文献观测数据对蒸散发进行验证, 其 R^2 为 0.86, 均方根误差和偏差分别为 58.30 mm、-21.70 mm。对蒸散发的分量按比例进行验证, 植被蒸腾、土壤蒸发和冠层截留的 R^2 分别为 0.77、0.76 和 0.69。综上所述, 蒸散发的总量、分量以及年际的模拟, 均有较好的模拟结果。

2 结果与分析

2.1 区域水量平衡

根据水量平衡公式计算的水量与降水量的对比结果见图3。在 1982—1998 年间, 计算水量与降水量基本一致。但在 1999—2010 年间, 计算水量高于降水量(2003 年除外), 即出现水量不平衡的情况。1998 年之前, 降水量与计算水量之间的差值相对较小, 基本在 -50—50 mm 之间波动。然而在 1999 年后, 黄土高原地区计算的水量与实际降水量之间出现较大偏差并在 -100—50 mm 之间波动。

2.2 黄土高原的自然系统水量变化分析

2.2.1 降水

降水在水循环变量中下降的趋势非常明显(图4), 并在 1982—2010 年间以 0.77 mm/a 速率下降(图5)。MK 趋势检验结果表明, 降水的 UF 统计量在 1982—1994 年间大于 0(1987 年除外), 呈现上升趋势。1995—2010 年 UF 统计量小于 0, 降水呈现下降趋势。

2.2.2 蒸散发

从图5可以看出, 1982—1988 年蒸散发的 UF 统计量大于 0, 蒸散发呈上升趋势; 1989—1999 年 UF 统计

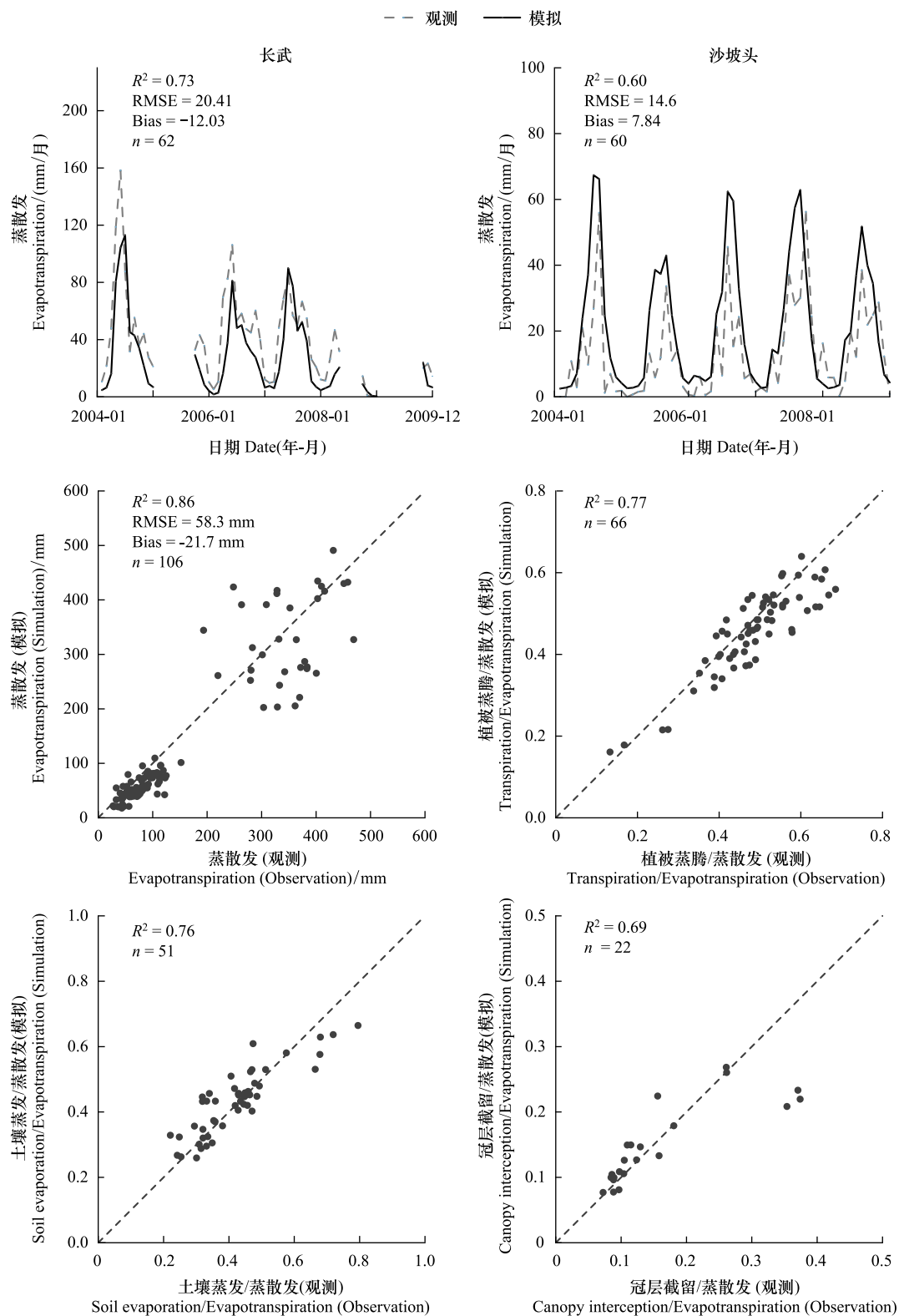


图2 蒸散发验证

Fig.2 Evapotranspiration verification

量在 0 附近波动,蒸散发的变化趋势随之波动。但在 1999 年后 UF 统计量大于 0,尤其是在 2006—2010 年间 UF 统计量超过了临界值 1.96 (置信度 $\alpha = 0.05$),蒸散发呈显著上升趋势。总体上,黄土高原的蒸散发以

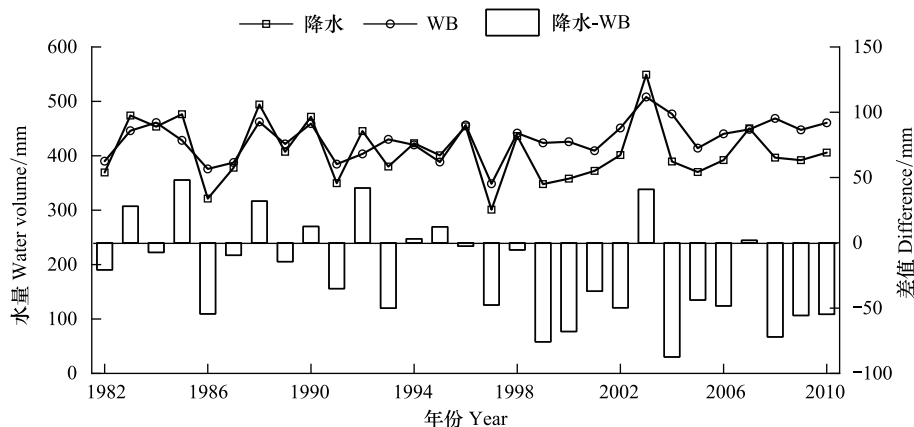


图3 1982—2010年水量平衡计算水量与降水量的对比

Fig.3 Comparison between water balance calculation water volume and precipitation from 1982 to 2010

WB:由水量平衡公式计算的水量 The amount of water calculated by the water balance formula

1.96 mm/a的速率上升($P<0.05$)。此外,蒸散发与 LAI、NDVI 的相关性分别为 0.90 ($P<0.01$)、0.74 ($P<0.01$) (表 2),这表明黄土高原区域的蒸散发与植被有显著的正相关关系。

蒸散发分量的线性回归和 MK 趋势检验结果详见图 6。其中,植被蒸腾不仅是所有水文变量中变化趋势最大的(图 4),也是蒸散发分量中变化最明显的,其以 2.14 mm/a ($P<0.01$) 的速率增加;植被蒸腾在 1982—1983 年呈下降趋势,1984 年后呈上升趋势。土壤蒸发在 1982—1984、1988—1993 年呈上升趋势,在 1985—1988、1994—2010 年呈下降趋势。冠层截留量要小于植被蒸腾和土壤蒸发量,其在 1982—2010 年均呈现上升趋势。总体而言,黄土高原的植被蒸腾、冠层截留分别以 2.14 mm/a、0.23 mm/a 速率上升($P<0.05$),而土壤蒸发以 0.40 mm/a 速率下降。因此,黄土高原蒸散发的显著上升主要是由于植被蒸腾与冠层截留的增加所造成的。

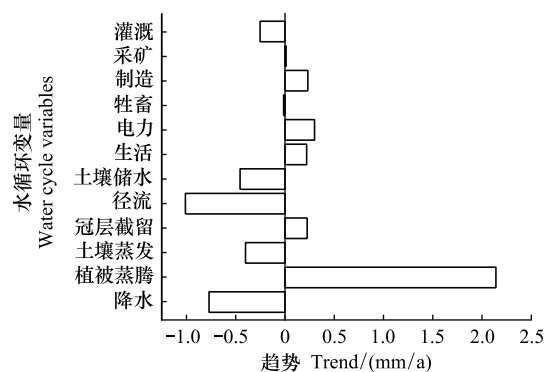


图4 1982—2010年各水文变量变化趋势

Fig.4 Trend in various hydrological variables from 1982 to 2010

表2 水文变量相关性分析

Table 2 Correlation analysis of hydrological variables

	蒸散发 Evapotranspiration	降水 Precipitation	归一化植被指数 Normalized vegetation index	叶面积指数 Leaf area index
蒸散发 Evapotranspiration	1	0.33	0.74 **	0.90 **
径流 Run off	-0.19	0.64 **	-0.38 *	-0.41 *
土壤水 Soil water storage	-0.04	0.44 *	-0.07	0.10

** 表示相关性在 $P<0.01$ 水平上显著; * 表示相关性在 $P<0.05$ 水平上显著

2.2.3 径流

径流是所有水文变量中下降最为明显的(图 4)。在 1982—2010 年间,其呈现 1.00 mm/a 下降的趋势($P<0.05$)。从图 5 可以看出,UF 统计量在 1982—1984 年大于 0,径流呈现增加的趋势;1985—2010 年,径流的 UF 统计量小于 0,径流呈现下降的趋势。另外,通过径流与降水、NDVI、LAI 的相关性分析发现(表 2),径流与降

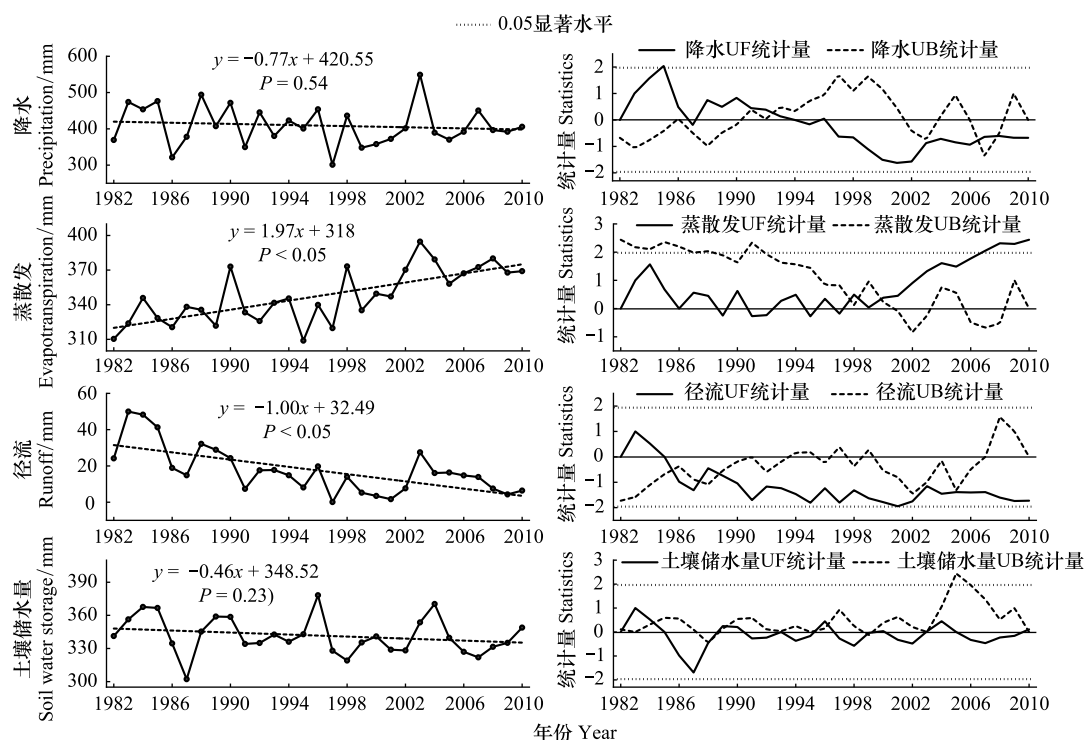


图5 1982—2010年黄土高原降水、蒸散发、径流、土壤储水量变化及MK趋势检验结果

Fig.5 Changes in precipitation, evapotranspiration, runoff, and soil water storage in the Loess Plateau and the MK trend test results from 1982 to 2010

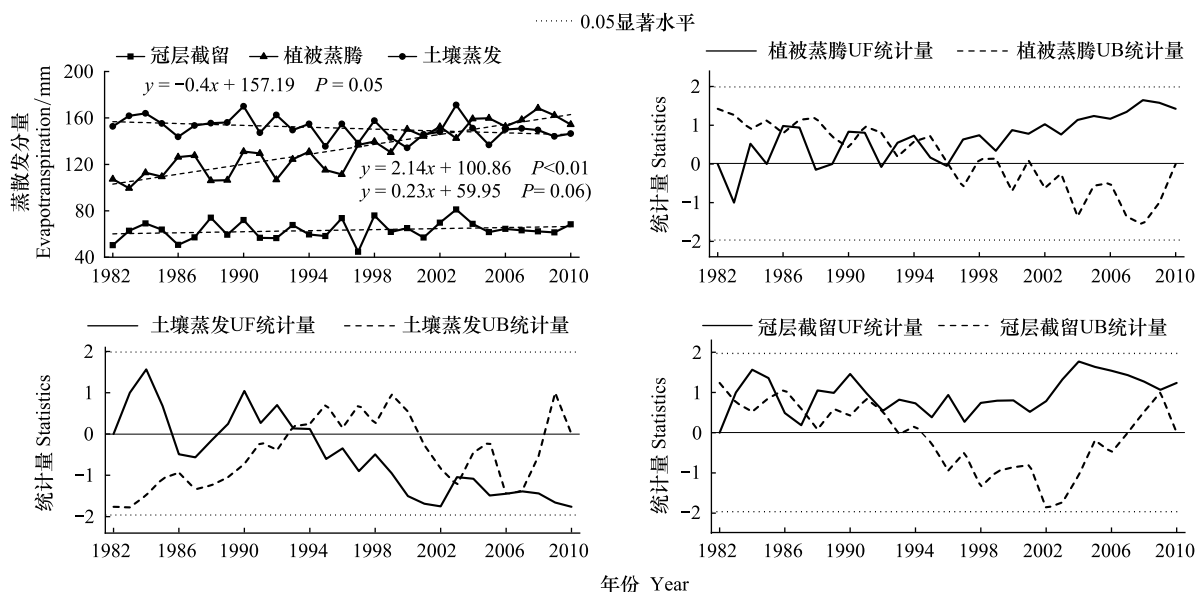


图6 1982—2010年黄土高原蒸散发分量变化及MK趋势检验结果

Fig.6 Changes in evapotranspiration components in the Loess Plateau and MK trend test results from 1982 to 2010

水的相关性达到了 0.64 ($P < 0.01$), 表明径流与降水呈正相关性, 而与 NDVI、LAI 的相关性为 -0.38 ($P < 0.05$)、 -0.41 ($P < 0.05$), 表明与植被呈现较弱的负相关性。

2.2.4 土壤储水量

土壤储水量的 MK 趋势检验结果表明:1982—2010 年间 UF 统计量在 0 附近波动的极其明显,但 UF 统计量整体上小于 0,总体呈现下降趋势(图 5)。总而言之,土壤储水量呈现以 0.46 mm/a 速率下降的趋势。

2.3 黄土高原社会系统用水的变化分析

社会经济用水量的变化详见图 7,其中灌溉水量最大,总体上占社会经济用水量的 69.96%。1982—2010 年间 UF 统计量均大于 0,社会经济用水呈上升趋势,且 UF 统计量在 1985—2010 年大于 1.96(置信度 $\alpha = 0.05$),表明社会经济用水在 1985 年后呈显著增长的趋势。整体而言,1982—2010 年社会经济用水量以 0.50 mm/a 的速率增加($P < 0.05$)。

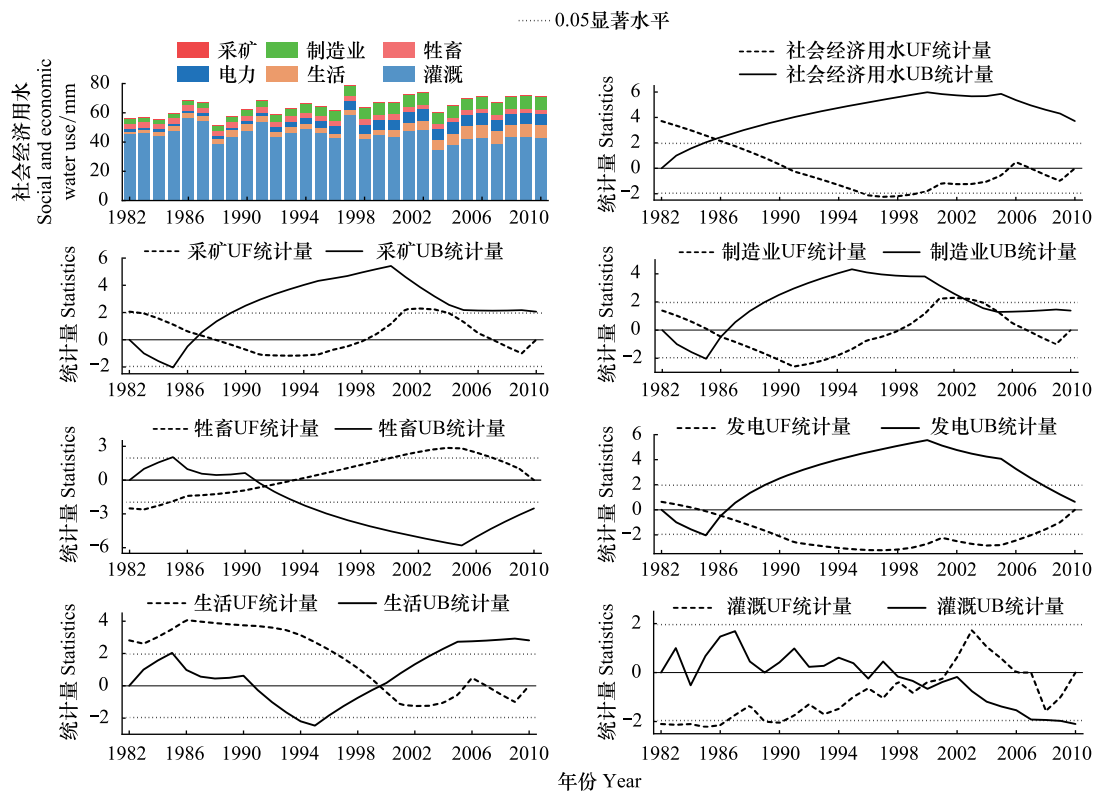


图 7 1982—2010 年社会经济用水变化及 MK 趋势检验结果

Fig.7 Changes in social and economic water use and MK trend test results from 1982 to 2010

就社会经济用水各分量而言,采矿用水在 1982—1986 年呈下降趋势,1987—2010 年呈上升趋势,且在 1988 后显著上升的趋势(置信度 $\alpha = 0.05$)。制造业用水在 1982—1986 年呈下降趋势,1987—2010 年呈上升趋势,且在 1989—2002 年显著上升(置信度 $\alpha = 0.05$)。牲畜用水在 1982—1990 年呈上升趋势,1991—2010 年呈下降趋势,且在 1993 年后开始显著下降(置信度 $\alpha = 0.05$)。发电用水在 1982—1986 年呈下降趋势,1987—2010 年呈上升趋势,且 1989—2007 年显著上升(置信度 $\alpha = 0.05$)。生活用水在 1982—1990、2000—2010 年呈上升趋势,1991—1999 年呈下降趋势,且 2003 年后显著上升(置信度 $\alpha = 0.05$)。灌溉水量占社会经济用水量的 69.96%,其在 1982—1997 年呈上升趋势,1998—2010 年呈下降趋势。

2.4 水循环结构的演变

蒸散发、径流、社会经济用水和土壤储水量变化分别除以水量平衡公式计算的总水量,得到各水文变量占水循环的比例变化结果(图 8)。结果表明,1982—2010 年间,蒸散发所占的平均比例最大,具体为 80.95%,并以每年 0.16% 的速率增加。MK 趋势检验分析发现,蒸散发所占水循环的比例在 1982—1984 年呈下降趋势,1985 年后呈现上升趋势。此外,蒸散发所占的比例在 1982—1997 年大部分小于距平值,而在 1998 年后几乎

均大于距平值,未来蒸散发所占的比例还可能进一步持续增加。

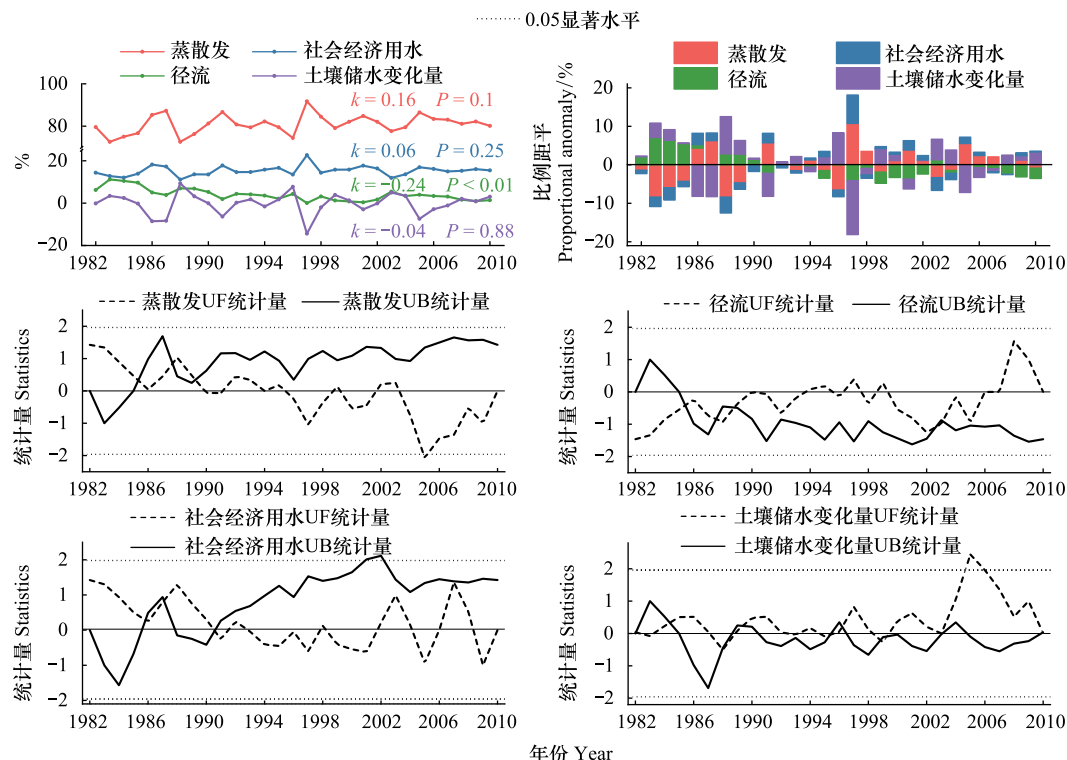


图8 1982—2010年水循环结构比例变化及MK趋势检验结果

Fig.8 Changes in the ratio of water cycle structure and MK trend test results from 1982 to 2010

径流占水循环的平均比例较小,仅为4.00%;并且径流所占比例下降的速率最为明显,以每年0.24%的速率减少($P<0.01$) (图8)。径流占水循环的比例在1982—1984年呈上升趋势,而在1985—2010年呈下降趋势。1982—1990年间,径流所占比例的距平值均大于0(1987年除外);1991—2010年其距平值几乎均小于0(2003年除外)。以上结果表明,径流在水循环中所占的比例呈现逐渐减小的趋势。

社会经济用水占水循环的平均比例为15.27%,并以每年0.06%的速率增加(图8)。其UF统计量的变化结果表明,社会经济用水在水循环中所占的比例在1982—1984、1988—1990年呈现下降趋势,在1985—1987、1991—2010年呈现上升趋势。

土壤储水量变化年际波动非常明显。其所占的平均比例为-0.24%,并以每年0.02%的速率减少,表明土壤储水的变化量呈下降趋势(图8)。其UF统计量的变化结果表明,1982—1984年期间土壤储水量变化呈上升趋势,而在1985—2010年整体上呈现下降趋势。

3 讨论

3.1 水循环变量变化的原因分析

降水是陆地水补给的主要来源,而本研究中降水呈现以0.77 mm/a速率下降的趋势,表明陆地水的补给量正在逐渐减少。降水是径流的主要来源,降水量的大小直接影响径流量的多少。径流作为社会系统中人类用水的主要来源,呈现以1.01 mm/a速率下降的趋势($P<0.01$),这直接导致了可利用水资源量的减少。另外,植被也是影响产流的重要因素,其通过冠层截留、根系改变土体构型、增强土壤入渗来影响径流的产生^[46-47]。本研究中蒸散发呈1.97 mm/a的上升趋势($P<0.01$),土壤储水量呈0.46 mm/a的下降趋势;根据相关性分析结果以及前人的研究分析,其可能是由于植被恢复造成的^[1]。黄土高原地区在1999年前后大规模

实施退耕还林(草)工程,不仅导致区域的蒸散发显著上升^[11],而且消耗了大量的土壤水分^[48],并且使得径流明显降低^[12]。这也导致蒸散发在水循环中占据的比例越来越高,而径流和土壤水储量在水循环中占据的比例越来越低。

1982—2010 年间,社会经济用水量呈显著上升的趋势(置信度 $\alpha = 0.05$),并且在水循环中占据的比例越来越高。其中灌溉用水占据了大部分的社会经济用水量,如果不对农业灌溉用水合理利用,未来水资源的压力将不断上升^[49]。本研究发现,灌溉用水在 1998—2010 年期间呈下降趋势,且 Yang 等的研究也发现河套灌区的灌溉水量呈下降趋势^[50],下降的原因可能是采用了更高效的灌溉技术^[51],使得 1998 年后灌溉用水降低。此外,在过去的几十年间黄土高原的人口和国内生产总值均发生了剧烈增长,人口从 1988 年的 8653 万人增加到 2013 年的 12541.50 万人^[52],国内生产总值从 1990 年的 64.10 亿元剧增到 2010 年的 27427.00 亿元^[53]。随着人口和经济的增长,黄土高原的社会经济用水量还会继续增加,“自然-社会”系统的“水竞争”问题将越来越严重^[8]。

3.2 水量不完全平衡的原因分析

黄土高原地区的水量计算结果表明,根据水量平衡公式计算的结果未能与降水量完全平衡,其主要原因是因为本文未考虑地下水、水库蓄水的变化及其跨区域调水的影响。由于缺乏地下水的观测数据,本研究只考虑了 0—2m 的土壤储水量变化,并未考虑更深层土壤储水、地下水的变化以及水库蓄水变化,然而社会经济用水中有很一部分来自于地下水以及水库蓄水(如:生活、灌溉、采矿等用水)^[54],这是造成水量不平衡的重要原因。如:Xie 等的研究表明,在 2005—2014 年间,黄土高原的地下水枯竭率在从 (-6.50 ± 0.70) mm/a 上升到了 -15.00 mm/a,在人类活动的影响下使得地下水的消耗日益加重^[55]。此外,跨区域调水也是影响水量不平衡的重要因素,如:为缓解关中水资源短缺的问题,陕西省实施的“引汉济渭”调水工程,其增加了关中地区渭河的径流量以及社会经济消耗的水量^[56]。目前,利用多源数据进行水量平衡的研究仍是一个巨大的挑战,且 Oliveira 和 Paulo 等人基于多源遥感数据的研究结果也表明,未来实现水量的完全平衡研究仍是一个重要而艰难的方向^[44,57]。

3.3 对后续研究的启示

本研究存在一定的不足。首先,本文采用了大量的遥感及观测数据,不同数据源对研究结果造成了一定的不确定性。此外,研究区并非是一个完整闭合的流域,使用花园口和贵德站之差只能近似计算流入流出区域的水量,其对研究结果产生了一定的影响。另外,本研究并未考虑地下水、水库蓄水以及更深层土壤储水的变化,也未考虑到异地调水以及虚拟水流动的情况,这些均是水量平衡的影响因素。但本文以新的视角细化了黄土高原水循环的结构组成,量化了各个水文变量及其结构的变化趋势,可为水资源的管理提供参考。在未来的研究中,可进一步细化流入、流出黄土高原区域的径流量,此外还应考虑地下水的变化以及异地调水、虚拟水流动等的情况。

4 结论

本文细化了组成水循环结构的 12 个水文变量,分别为降水、土壤储水量变化、径流、冠层截留、土壤蒸发、植被蒸腾和社会经济用水,并探讨了黄土高原水循环组成及结构的演变趋势,主要得出以下结论:

(1)在自然系统中,蒸散发的增长速率最明显,其以 1.97 mm/a 的速率上升($P < 0.01$),尤其在 1999 年后呈显著上升趋势,其直接原因是植被蒸腾和冠层截留的增加导致的;而降水、径流、土壤储水量均呈下降趋势。

(2)社会系统用水整体呈 0.50 mm/a 的上升趋势($P < 0.01$),其中灌溉用水占主体,并在 1997 年后呈下降趋势。此外,生活、发电、制造、采矿用水均呈上升趋势,而牲畜用水呈下降趋势。

(3)就水循环结构而言,蒸散发、社会经济用水占水循环的平均比例分别为 80.95% 、 15.27% ,并呈现每年以 0.24% 、 0.04% 速率的上升趋势,其在水循环中占据的比例逐渐升高。径流、土壤储水量变化占水循环的平均比例相对较小,分别为 4.00% 、 -0.24% ,其呈现每年以 0.24% 、 0.04% ($P < 0.01$) 速率的下降趋势,其在水循环

中占据的比例总体上均呈现下降的趋势。

总之,黄土高原地区蒸散发的增加以及径流与降水的减少,直接导致水循环结构发生变化。随着社会经济用水的增长,地区水资源供需关系将进一步恶化,合理利用水资源以及水资源的科学调控应为当前的首要目标。本研究能够为黄土高原水资源的科学管理与可持续利用提供一定的理论支撑。

致谢:感谢国家生态科学数据中心资源共享服务平台,提供陕西长武农田生态系统和宁夏沙坡头荒漠生态系统国家野外科学观测研究站的观测数据支持。

参考文献 (References):

- [1] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. 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.
- [2] Zhao G J, Tian P, Mu X M, Jiao J Y, Wang F, Gao P. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 387-398.
- [3] Nasta P, Allocca C, Deidda R, Romano N. Assessing the impact of seasonal-rainfall anomalies on catchment-scale water balance components. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(6): 3211-3227.
- [4] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390.
- [5] Postel S L, Daily G C, Ehrlich P R. Human appropriation of renewable fresh water. *Science*, 1996, 271(5250): 785-788.
- [6] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China. *Catena*, 2011, 86(2): 110-116.
- [7] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" Program on the Loess Plateau in China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(12): 2261-2275.
- [8] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [9] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. 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.
- [10] 王帅, 傅伯杰, 武旭同, 王亚萍. 黄土高原社会——生态系统变化及其可持续性. *资源科学*, 2020, 42(1): 96-103.
- [11] Jin Z, Liang W, Yang Y T, Zhang W B, Yan J W, Chen X J, Li S, Mo X G. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8191.
- [12] Liang W, Bai D, Wang F Y, Fu B J, Yan J P, Wang S, Yang Y T, Long D, Feng M Q. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [13] Zuo D P, Xu Z X, Yao W Y, Jin S Y, Xiao P Q, Ran D C. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 238-250.
- [14] Zhao M, A G, Zhang J E, Velicogna I, Liang C Z, Li Z Y. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage. *Nature Sustainability*, 2021, 4(1): 56-62.
- [15] Lv M X, Ma Z G, Yuan X, Lv M Z, Li M X, Zheng Z Y. Water budget closure based on GRACE measurements and reconstructed evapotranspiration using GLDAS and water use data for two large densely-populated mid-latitude basins. *Journal of Hydrology*, 2017, 547: 585-599.
- [16] 徐小任, 徐勇. 黄土高原地区人类活动强度时空变化分析. *地理研究*, 2017, 36(4): 661-672.
- [17] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- [18] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.
- [19] 王凤娇, 梁伟, 傅伯杰, 金朝, 闫娜娜. 近年来的黄土高原耕地时空变化与口粮安全耕地数量分析. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 161-171.
- [20] Zhao G, Mu X, Wen Z, Wang F, Gao P. Soil erosion, conservation, and Eco - environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 499-510.
- [21] Nalder I A, Wein R W. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92(4): 211-225.
- [22] Price D T, McKenney D W, Nalder I A, Hutchinson M F, Kesteven J L. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(2/3): 81-94.
- [23] Huang Z W, Hejazi M, Li X Y, Tang Q H, Vernon C, Leng G Y, Liu Y L, Döll P, Eisner S, Gerten D, Hanasaki N, Wada Y. Reconstruction of

- global gridded monthly sectoral water withdrawals for 1971-2010 and analysis of their spatiotemporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(4): 2117-2133.
- [24] Zhang Y, Huang M B, Lian J J. Spatial distributions of optimal plant coverage for the dominant tree and shrub species along a precipitation gradient on the central Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 69-84.
- [25] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 黄土丘陵半干旱区天然草地土壤水分调控研究. *草地学报*, 2003, 11(4): 296 - 300.
- [26] 刘延惠. 六盘山香山河小流域典型植被生长固碳及耗水特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [27] 郭明春. 六盘山叠套沟小流域森林植被坡面水文影响的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2005.
- [28] 刘敏. 青海黄土高寒区主要生态树种耗水特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [29] 张华. 黄土半干旱区主要造林树种耗水量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [30] 张卫强. 黄土半干旱区主要树种光合生理与耗水特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [31] 田晶会. 黄土半干旱区水土保持林主要树种耗水特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [32] 王幼奇. 陕北小流域植被耗水过程及环境因素影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [33] 沈芳. 黄土半干旱区刺槐林地实际蒸散量测算方法对比研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [34] 赵世伟. 黄土高原子午岭植被恢复下土壤有机碳—结构—水分环境演变特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [35] 沈振西. 宁夏南部柠条、沙棘和华北落叶松的液流与蒸腾耗水特性[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2005.
- [36] 杨宪龙. 黄土高原北部典型灌丛降水再分配特征及其蒸散耗水规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [37] 熊伟. 六盘山北侧主要造林树种耗水特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
- [38] 刘建立. 六盘山叠套沟坡面生态水文过程与植被承载力研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [39] 邓铭江, 龙爱华, 李江, 邓晓雅, 张沛. 西北内陆河流域“自然-社会-贸易”三元水循环模式解析. *地理学报*, 2020, 75(7): 1333-1345.
- [40] 陈睿智, 桑燕芳, 王中根, 李宗礼. 1956-2010 年甬江流域降水变化特性分析. *地理科学进展*, 2012, 31(9): 1149-1156.
- [41] Aziz O I A, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1/4): 282-294.
- [42] Yue S, Wang C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 2002, 38(6): 4-1-4-7.
- [43] Zhang Q, Liu C L, Xu C Y, Xu Y P, Jiang T. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/4): 255-265.
- [44] Moreira A A, Ruhoff A L, Roberti D R, Souza V D A, de Rocha H R, de Paiva R C D. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 131-147.
- [45] Trenberth K E, Smith L, Qian T T, Dai A, Fasullo J. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(4): 758-769.
- [46] 傅伯杰, 徐廷达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. *地球科学进展*, 2010, 25(7): 673-681.
- [47] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 刘宇, 王帅, 周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [48] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Yao X L, Zhou J. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2883-2892.
- [49] Jägermeyr J. Agriculture's historic twin-challenge toward sustainable water use and food supply for all. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, 4: 35.
- [50] Yang Y T, Shang S H, Jiang L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 164: 112-122.
- [51] Zhou F, Bo Y, Ciais P, Dumas P, Tang Q H, Wang X H, Liu J G, Zheng C M, Polcher J, Yin Z, Guimberteau M, Peng S S, Ottle C, Zhao X N, Zhao J S, Tan Q, Chen L, Shen H Z, Yang H, Piao S L, Wang H, Wada Y. Deceleration of China's human water use and its key drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(14): 7702-7711.
- [52] 冯朝红. 黄土高原粮食安全与生态建设的响应关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [53] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1990-2010.
- [54] Wu Q F, Si B C, He H L, Wu P T. Determining regional-scale groundwater recharge with GRACE and GLDAS. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 154.
- [55] Xie X W, Xu C J, Wen Y M, Li W. Monitoring groundwater storage changes in the Loess Plateau using GRACE satellite gravity data, hydrological models and coal mining data. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 605.
- [56] 畅建霞, 姜瑾. 引汉济渭调水工程水资源配置研究. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 110-118.
- [57] Oliveira P T S, Nearing M A, Moran M S, Goodrich D C, Wendland E, Gupta H V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. *Water Resources Research*, 2014, 50(9): 7100-7114.