

变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的 时空协同演变

陈永喆^{1,2}, 崔艳红^{1,2}, 张才金^{1,2}, 崔英杰^{1,2}, 王怡璇^{2,3}, 白亮亮⁴, 郭建英⁵,
刘廷玺^{2,3}, 卢静⁶, 徐于月⁷, 龙笛^{1,2}

(1. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084; 2. 黄河流域内蒙古段水资源与水环境综合治理协同创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 4. 水利部海河水利委员会科技咨询中心, 天津 300170; 5. 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓荒漠草原生态水文野外科学观测研究站, 内蒙古 呼和浩特 010020; 6. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 7. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 为了探明我国干旱和半干旱区植被和水的时空演变规律, 通过集成多源卫星遥感观测数据、再分析数据集与模型模拟数据, 得到了黄河流域内蒙古段的降水、蒸散发、径流、表层土壤含水率、陆地总水储量变化信息, 解析了2003—2018年不同土地利用类型区植被与水资源的时空演变特征, 探讨了植被与各水文要素之间的相互作用规律。结果表明: 黄河流域内蒙古段东部森林植被覆盖度的提升促使蒸散发增加, 年均蒸散发量和径流量之和较降水量高16.5 mm, 导致土壤水和地下水储量下降; 农田年平均净灌溉耗水量为101.3~108.9 mm, 并因农田植被覆盖度逐年增大而增加; 虽然草地区域年均蒸散发和径流量之和低于降水量, 但草地植被覆盖度的持续增大导致水分盈余量显著降低, 草地的耗水正接近其生态水文阈值; 陆地总水储量等效水高以 (7.5 ± 1.9) mm/a的速率下降, 区域地下水呈现亏缺趋势; 降水的年际波动对植被覆盖度和蒸散发的影响逐渐减弱, 对森林表层土壤含水率变化的影响也逐渐减弱。

关键词: 植被; 水文要素; 生态恢复; 时空演变; 黄河流域内蒙古段

中图分类号: X143

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)02-0141-09

Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin//CHEN Yongzhe^{1,2}, CUI Yanhong^{1,2}, ZHANG Caijin^{1,2}, CUI Yingjie^{1,2}, WANG Yixuan^{2,3}, BAI Liangliang⁴, GUO Jianying⁵, LIU Tingxi^{2,3}, LU Jing⁶, XU Yuyue⁷, LONG Di^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin, Hohhot 010018, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 4. Science and Technology Advisory Center, Haihe Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Tianjin 300170, China; 5. Desert Grassland Eco-Hydrology Field Research Station, North Foot of Inner Mongolia Yinshan, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China; 6. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 7. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to investigate the spatiotemporal evolution rule of vegetation and water in arid and semi-arid areas of China, this study obtained the information of precipitation, evapotranspiration, runoff, surface soil moisture and total land water storage variations in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin by integrating multi-source satellite remote sensing observation, reanalysis datasets, and model simulation data. The spatiotemporal evolution characteristics of vegetation and water resources in different land use types from 2003 to 2018 were analyzed, and the interaction patterns between vegetation and various hydrological elements were explored. The results indicate that the increase of forest

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0009); 国家自然科学基金项目(52079065)

作者简介: 陈永喆(1994—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事生态遥感和水文遥感研究。E-mail: yongzhechen@126.com

通信作者: 崔艳红(1991—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事生态水文和水土保持研究。E-mail: cui1519326449@163.com

vegetation coverage in the eastern part of the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin leads to the increase of evapotranspiration. The sum of annual evapotranspiration and runoff is 16.5 mm higher than the precipitation, resulting in the decrease of soil moisture and groundwater storage. The annual irrigation water consumption in farmlands ranges from 101.3 to 108.9 mm, and increases with the annual increase of cropland vegetation cover. Although the sum of annual evapotranspiration and runoff in grassland areas is lower than the precipitation, the continuous increase of grassland vegetation coverage significantly reduces the water surplus, resulting that the water consumption of grassland is approaching its eco-hydrological threshold. Total land water storage equivalent water height decreases at a rate of (7.5 ± 1.9) mm per year, indicating a trend of groundwater depletion in the region. The interannual fluctuation of precipitation shows a gradually diminishing impact on vegetation coverage and evapotranspiration, as well as a decreasing influence on the changes of surface soil moisture in forests.

Key words: vegetation; hydrologic components; ecological restoration; spatio-temporal evolution; Inner Mongolia section of the Yellow River Basin

陆地水资源变化受各种水循环通量的控制^[1], 而水循环过程不仅随温度、辐射、降水等气象条件变化而变化, 也与陆地植被变化密切相关。植被覆盖度增大可导致其蒸腾量增加, 进而导致地表蒸散增加^[2]。此外, 植被覆盖度增大可提高冠层截留和降雨的下渗率, 从而减少雨季的地表径流^[3], 且蒸发循环也会导致降水量增加^[4]。另一方面, 植被的空间分布与年际动态也受到水资源时空分布的影响^[5], 且不同地区降水变化对植被的影响不同^[6-7]。旱区(一般指干燥指数低于 0.65 的区域)植被通常面临较强的水分胁迫, 对水资源变化较为敏感^[8]; 同时, 由于旱区水资源量相对有限, 植被覆盖度增大会导致蒸散作用加强, 进而容易造成土壤水分亏缺^[9]、河川径流减少^[10]。可见旱区植被与水资源之间存在紧密的相互作用, 以及复杂的协同演变机制。在全球气候变暖、极端气候事件频率和强度增大的背景下^[11], 旱区植被与水资源的时空演变对旱区生态系统的稳定和社会经济高质量发展有着重要的影响。

我国是世界上旱区面积最大的国家, 旱区总面积约 660 万 km², 主要分布在北方和西南地区^[12]。由于旱区人口众多(约 5.8 亿人), 人类活动(如土地利用变化、取水等)很大程度上影响着我国旱区植被与水资源的时空演变^[12]。已有研究表明, 大规模植被恢复后黄土高原的植被需水量正接近其水资源承载力极限^[13], 华北地区的生态保护与恢复是引起土壤含水率显著减小的主要原因^[13], 同时, 农业发展伴随的地下水超采导致该区域地下水水位持续下降^[14]。黄河流域内蒙古段是我国北方典型的干旱半干旱地区, 不仅分布有大面积的灌溉农田, 也是 21 世纪初以来林草植被恢复和水土保持工程的重点实施区域之一^[15]。本文通过集成多源卫星遥感观测数据, 再分析数据集与模型模拟数据, 分析黄河流域内蒙古段降水、蒸散发、径流、表层土壤含水率、陆地总水储量(terrestrial water storage, TWS)变

化信息, 对 21 世纪以来气候变化和生态恢复活动共同影响下的旱区植被与水资源时空演变与相互作用机制进行探讨, 以为黄河流域内蒙古段以至我国其他干旱区的生态恢复与水资源优化配置提供参考。

1 研究区概况

黄河流域内蒙古段位于 39.1°N ~ 41.8°N, 106.3°E ~ 112.8°E, 总面积为 9.64 万 km², 年均气温为 5.0 ~ 8.5℃, 其西北部、中北部、东部、东北部和南部分别属于内蒙古自治区巴彦淖尔市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市。根据中国逐年 30 m 土地利用数据集 (CLCD)^[16], 得到黄河流域内蒙古段 2010 年土地利用空间分布(图 1)。黄河沿岸分布着大量灌溉农业区(灌区), 其中巴彦淖尔市境内为河套灌区, 包头市境内有磴口灌区和黄河南岸灌区, 呼和浩特市境内则有麻地壕灌区。鄂尔多斯市主要土地利用类型为草地和裸地, 其中库布齐沙漠和毛乌素沙地主要分布在鄂尔多斯市西部。由于植被覆盖度低, 生态环境脆弱, 库布齐沙漠和毛乌素沙地也是近年来生态恢复的重点区域之一^[17]。河套灌区东部有研究区内最大的湖泊湿地——乌梁素海, 而森林主要分布在降水量较高的区域, 包括呼和浩特市麻地壕灌区以北地区和乌兰察布市。

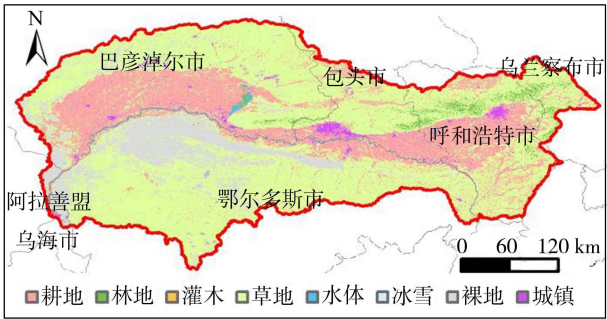


图 1 黄河流域内蒙古段 2010 年土地利用空间分布
Fig.1 Spatial distribution of land use in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin in 2010

2 研究数据与方法

2.1 基础数据

植被叶面积指数与降水、径流、表层土壤含水率数据的来源见表 1。此外,还采用了由重力卫星 GRACE 和 GRACE-Follow On 联合反演的 3 种陆地总水储量等效水高距平值数据,分别是 Center for Space Research (CSR) 的 RL06 Mascons (version 02) 产品、Jet Propulsion Laboratory (JPL) 的 RL06.1_v03 Mascons 产品和 Goddard Space Flight Center (GSFC) 的 RL06v2.0 Mascons 产品,名义空间分辨率分别为 0.25°、0.5°和 0.5°,而实际分辨率均为约 3°×3°^[18]。

2.2 蒸散发计算

通过将微波遥感反演的植被光学厚度和土壤水分信息同化至全球陆地蒸发阿姆斯特丹模型(global land evaporation Amsterdam model, GLEAM),得到时间动态较为合理的地表蒸散发数据^[26]。由于 GLEAM 对农田灌溉考虑不足且部分参数不确定性较大,使得 GLEAM 数据空间分布不确定性较大^[28],难以反映灌溉农田的实际蒸散发。为克服这一缺陷,本文基于彭曼方法^[29],通过改进热传输空气动力学粗糙度长度和土壤热通量计算方法^[30],提升了蒸散发估算的精度。输入数据包括中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)基础气象数据、Breathing Earth System Simulator (BESS)下行短波辐射数据^[27]、MODIS 土地利用数据 IGBP 分类和 GLASS 叶面积指数数据。彭曼方法获得的蒸散发在空间格局上较为可靠,而 GLEAM 在模拟蒸散发的年际变异上具有较高的准确性。因此,本文通过直方图匹配的方式,利用彭曼方法得到的蒸散发结果校正 GLEAM v3.6a 蒸散发数据的空间分布。这种数据融合方法可使模拟的蒸散发在空间分布和时间动态方面均更可靠^[31]。

2.3 分析方法

本文基础水平衡量是将年降水量减去蒸散发和

径流损失得到(式 1)。通过面积加权平均,可分别获取研究区农田、森林和草地的植被覆盖度(采用叶面积指数表征)与各水文要素的年际变化,而各水文要素的年际变化趋势则采用最小二乘回归法计算。此外,还采用式(2)计算了全时段以及不同时段内植被与各水文要素年际变异间的皮尔逊相关系数以分析其协同演变规律。

$$W_b = P - ET - R \tag{1}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{2}$$

式中:W_b为基础水平衡量;P 为降水量;ET 为蒸散发量;R 为径流量;r 为皮尔逊相关系数;x, y 为两个任意变量。

3 结果与分析

3.1 植被与水文要素的空间分布格局

图 2 为黄河流域内蒙古段 2003—2018 年植被与水文要素的空间分布。由图 2(a)(b)(c)可见,黄河流域内蒙古段植被覆盖度较高的区域主要分布在土壤含水率较高的灌溉农田和降水量较高的东部地区;蒸散发与植被叶面积指数的空间格局基本一致(图 2(a)(d));径流深的空间分布受降水量和植被覆盖度的影响,在南部地区较高(图 2(e));除灌溉农田外,基础水平衡量在东北部的森林区域也多为负值,表明这些区域的土壤水很可能逐渐亏缺,而地下水储量也可能因森林根系较深而逐渐亏缺^[32]。此外,南部草地区域水分多呈盈余状态(图 2(f))。

3.2 植被与水文要素的时序变化

2003—2018 年黄河流域内蒙古段农田和草地叶面积指数均显著增大(图 3(a)),年均增速分别为(6.9±2.3)×10⁻³(年均变化率(1.6±0.5)%)和(5.7±2.7)×10⁻³(年均变化率(2.0±1.0)%),而森林叶面积指数变化不显著(p=0.054)。农田和草地

表 1 研究数据来源
Table 1 Research data sources

变量	数据来源	空间分辨率
土地利用	中国土地利用数据集 (CLCD) ^[16]	30 m
土地利用	MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type CMG Yearly L3 土地利用数据 IGBP 分类 (https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12C1.061)	0.05°
叶面积指数	全球陆表特征参量数据集 (GLASS) ^[19]	250 m ~ 0.1°
降水、风速、气压、温度、比湿	中国区域地面气象要素驱动数据集 (CMFD) ^[20]	0.1°
径流(地表水+地下水)	饥荒早期预警系统网络陆面数据同化系统 (FLDAS) 数据产品 ^[21]	0.1°
表层土壤含水率	全球长时间序列表层土壤水数据集 (RSSM) ^[22]	0.1°
陆地总水储量	CSR Mascons ^[23] 、JPL Mascons ^[24] 和 GSFC Mascons ^[25]	0.25 ~ 0.5°
蒸散发	GLEAM v3.6a 数据集 ^[26]	0.1°
下行短波辐射	Breathing Earth System Simulator (BESS) ^[27]	0.05°

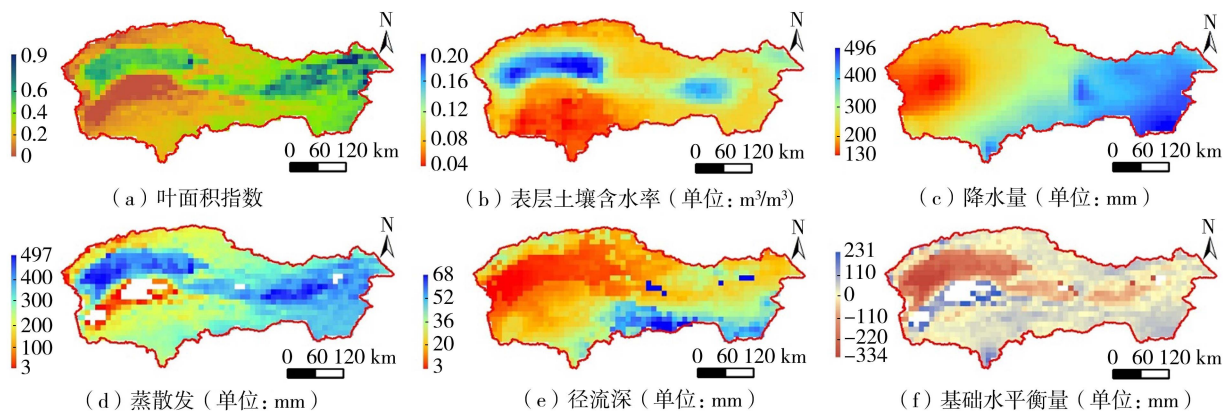


图2 黄河流域内蒙古段 2003—2018 年植被与水文要素的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of vegetation and hydrological elements in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin from 2003 to 2018

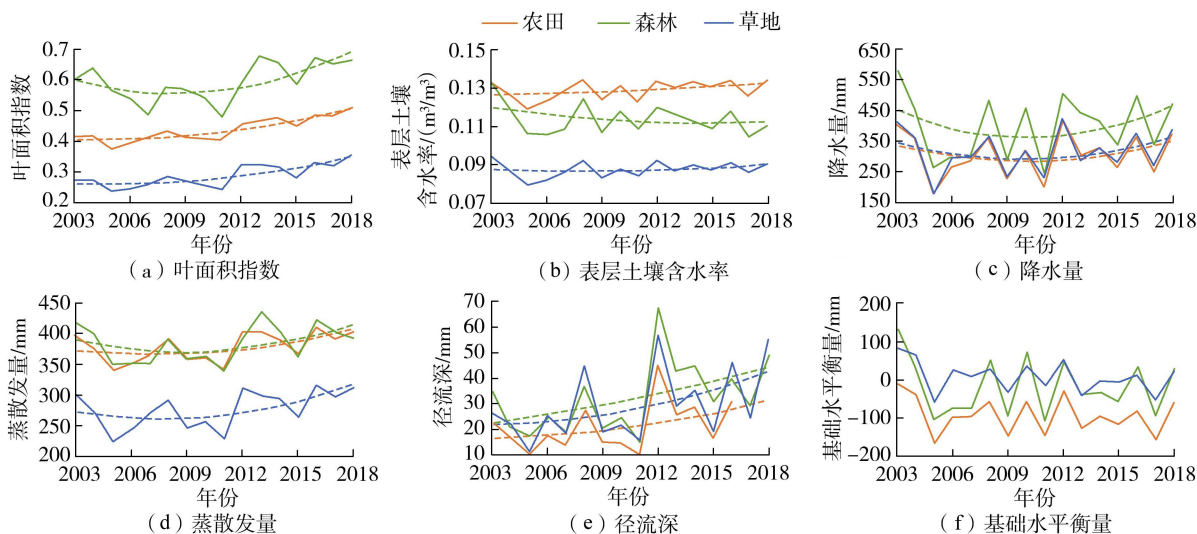


图3 2003—2018 年农田、森林和草地区域植被与水文要素的年际变化

Fig. 3 Interannual variations of vegetation and hydrological elements in farmlands, forests and grasslands from 2003 to 2018

的叶面积指数呈加速增大趋势,而森林叶面积指数则先减小后增大,最低值出现在 2011 年。

森林、草地、农田区域的降水量均在 2003—2011 年呈减少趋势,之后呈增加趋势(图 3(c)),整体变化不显著($p=0.76 \sim 0.85$)。蒸散发先略有减小后增大(图 3(d))。2011 年后径流深高于 2011 年前(图 3(e)),但蒸散发变化与径流变化的相关性在所有植被类型区均不显著。森林和草地的基础水平衡量在 0 值上下波动,2003—2018 年平均基础水平衡量分别为 (-16.5 ± 48.9) mm 和 (8.9 ± 41.4) mm(图 3(f))。这表明研究区森林土壤水分(或土壤水与地下水)整体呈亏缺状态,而草地土壤水分略有增加(不考虑土壤水与地下水交换)。遥感反演的表层土壤含水率变化可佐证该推论:2003—2018 年森林和草地表层土壤含水率变化趋势分别为 $(-5.1 \pm 9.0) \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{a})$ (变化率 $(-0.5 \pm 0.7) \%$, $p=0.24$) 和 $(1.8 \pm 4.7) \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{a})$

(变化率 $(0.2 \pm 0.5) \%$, $p=0.42$) (图 3(b))。在基础水平衡量为负的年份,森林和草地区域的表层土壤含水率大多低于前一年,而在降水量高于蒸散发与径流损失的年份,表层土壤含水率也相应上升。农田区域降水量持续低于蒸散发与径流之和,年基础水平衡量为 (-92.4 ± 48.9) mm,但表层土壤含水率却以 $(4.2 \pm 5.5) \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{a})$ (变化率 $(0.3 \pm 0.4) \%$, $p=0.12$) 的速率上升。经推算可得 2003—2018 年黄河流域内蒙古段农田年平均净灌溉耗水量为 101.3 ~ 108.9 mm。

黄河流域内蒙古段陆地总水储量显著下降($p < 0.01$)。CSR Mascons、JPL Mascons 和 GSFC Mascons 数据表明陆地总水储量等效水高的变化趋势分别为 (-5.8 ± 1.0) 、 (7.2 ± 1.3) 、 (-9.5 ± 0.9) mm/a。由于该区域地表水储量变化较小,甚至略有增加^[33],陆地总水储量的下降主要反映了地下水储量的下降。

3.3 植被与水文要素年际变化趋势

图 4 为 2003—2018 年植被与水文要素年均变化量(图中阴影区域表示变化在 95% 置信区间内显著)。河套灌区以及研究区中、南部草地植被覆盖度明显提升(图 4(a)),而表层土壤含水率仅在灌溉农田区域显著提升,在呼和浩特东部至乌兰察布一带显著下降(图 4(b))。绝大部分地区降水量无显著变化(图 4(c)),而西部和东南部区域蒸散发显著增大(图 4(d)),导致河套灌区西部和库布齐沙漠至毛乌素沙地一带的基础水平衡量显著降低(图 4(e))。这表明尽管目前库布齐沙漠至毛乌素沙地一带降水量基本满足草地蒸散发需求,表层土壤含水率也尚未下降(图 4(b)),但进一步的草地恢复可能会导致年土壤含水量变化由盈转亏。

黄河流域内蒙古段南部陆地总水储量下降速度高于北部、东部高于西部(图 4(f)),其中呼和浩特市南部是下降最快的区域,这与黄河流域下游包括临近的华北平原地区的地下水超采有关^[18]。

3.4 植被及各水文要素间的相互作用

旱区植被生长与水文要素之间存在密切联系。黄河流域内蒙古段实际蒸散发与潜在蒸散发呈负相关关系($r=-0.60 \sim -0.33$),表明该地区的蒸散发主要受水分而非热量或辐射条件限制。表层土壤含水率与实际蒸散发之间呈显著正相关关系,而农田和草地的表层土壤含水率与实际蒸散发相关性($r=0.81 \sim 0.82$)强于森林($r=0.59$),这主要是由于乔木的蒸腾主要依赖于较深层土壤水,甚至可能是地下水^[32]。表层土壤含水率与植被叶面积指数之间的相关性也表现为农田最大($r=0.65, p<0.01$)、草地次之($r=0.57, p=0.02$)、森林最小($r=0.23, p=0.39$),其机制除林地表层土壤含水率与根系土壤水分的解耦外,可能还与植树造林导致的叶面积指数增大有关。另外,农田、森林和草地的实际蒸散

发、表层土壤含水率与降水量的相关性均极显著($p<0.01$),表明实际蒸散发和表层土壤含水率的变化直接受降水量控制。对于农田区域,虽然表层土壤含水率与叶面积指数的相关性显著($r=0.66, p<0.01$),但降水量与叶面积指数无显著相关性($r=0.45, p=0.08$),其可归因于灌溉水的补给。相反地,虽然森林表层土壤含水率与叶面积指数相关性不显著,但其降水量与叶面积指数显著相关,表明降水除影响表层土壤含水量外,还影响深层土壤含水量,进而导致森林叶面积指数发生变化。

4 讨论

4.1 不同土地利用类型区适宜的生态水文阈值和水资源管理方案

黄河流域内蒙古段森林区域的年平均基础水平衡量为 -16.5 mm ,表现为表层土壤含水率下降(图 3(b)),并可能导致地下水水位下降。由于森林区域的年平均降水量为 399.5 mm ,年平均径流损失为 32.5 mm ,可得保持土壤水分平衡时的年平均蒸散发为 367.0 mm 。而 2003—2018 年实际年均蒸散发为 383.5 mm (图 3(d))。因此黄河流域内蒙古段森林植被覆盖度应至少减小 4.3% (即 16.5 mm 与 383.5 mm 的比值),这需在控制造林密度的同时,适当间伐生长不良的林木。

在干旱半干旱草地,如库布齐沙漠至毛乌素沙地区域,由于大规模造林种草,导致年基础水平衡量(即水分盈余量)显著下降(图 4(e)),长此以往将导致地下水水位下降,生态恢复不可持续。因此,在干旱半干旱稀疏草地区域,后续的生态恢复应以自然恢复为主,避免大规模造林种草。

黄河流域内蒙古段陆地总水储量等效水高以 $5.8 \sim 9.5\text{ mm/a}$ 的速率下降,其中呼和浩特市南部地下水水位下降最快。地下水过度消耗将导致地下

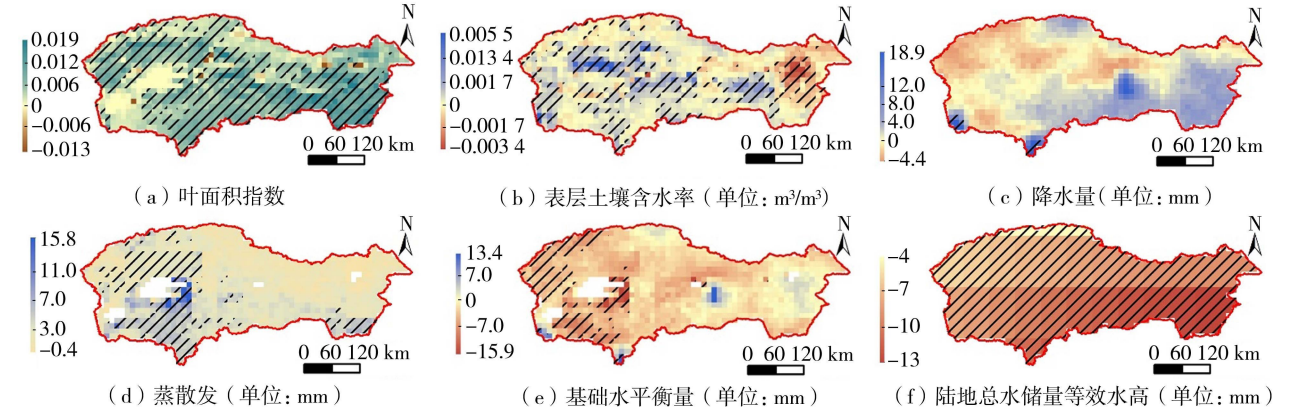


图 4 2003—2018 年植被与水文要素年均变化量
Fig. 4 Annual changes of vegetation and hydrological elements from 2003 to 2018

水抽取困难、水质恶化和河湖水位下降、地面沉降等生态、环境和地质问题^[34]。陆地总水储量等效水高下降速率虽不及华北平原(15.5 mm/a^[35]),但与黄河中游同期平均水平(8.0 mm/a^[36])接近,远高于西北内流区(1.3~2.8 mm/a^[37])。因此,未来应加强对黄河流域内蒙古段及周边区域地下水超采治理,扼制地下水水位进一步下降。

此外,灌溉农田区域地下水水位下降速率较缓,主要是由于灌溉渠道内的黄河水不断向土壤、地下渗漏,且农田排水系统尚不完善所致。灌溉农田地下水水位升高导致潜水蒸发严重,造成地表水资源浪费、土壤次生盐碱化等问题^[38]。因此,完善灌区农田排水系统、改进灌溉方式(如改漫灌为喷灌、滴灌)、有效控制渠道渗漏损失至关重要。

4.2 不同区域植被与各水文要素间的相互作用强度变化与内在机制

在气候变化与生态恢复的背景下,黄河流域内蒙古段不同类型植被生长与各水文要素间的相互作用强度正发生转变。降水量与叶面积指数的相关性逐渐减弱,其中,农田降水量与叶面积指数相关性减弱最为明显(图 5(a))。这可能是由于二氧化碳施肥效应、肥料施用、灌溉效率提升导致粮食产量增加的同时,降低了气象干旱对农作物生长的影响^[39]。此外,草地和森林的降水量与叶面积指数的相关性也出现不同程度的减弱,可能与造林种草等生态恢复活动有关。

由于叶面积指数变化对实际蒸散发的影响在较高水平保持稳定甚至有所上升(图 5(b)),而降水量与叶面积指数相关性则减弱,导致降水变化对农

田、森林、草地蒸散发的影响逐渐降低(图 5(c))。表层土壤含水率基本受降水变化的控制,但也受蒸散发的影响,特别是在蒸散发较强的森林区(图 5(f))。因此,降水与蒸散发之间逐渐解耦可能是森林降水量与表层土壤含水率相关性减弱(图 5(d))的主要原因。

土壤含水率与叶面积指数之间通常存在正相关关系^[40]。然而,造林种草在增大叶面积指数的同时,也会增加蒸散发,消耗土壤水分,这可能是黄河流域内蒙古段特别是森林、草地区域表层土壤含水率与叶面积指数的正相关关系逐渐减弱的主要原因(图 5(e))。其中,森林表层土壤含水率与叶面积指数相关性远低于农田和草地,且 2011 年后森林表层土壤含水率与叶面积指数的解耦速率明显加快。这可能是由于森林水分条件较充足、根系较深,使其叶面积指数变化受表层土壤含水率的影响较小。此外,2003—2011 年森林表层土壤含水率的持续下降,可能导致根系转而吸收更深层的土壤水分^[41]甚至是地下水^[32]。在水分条件转好且造林强度较高的 2011—2018 年,更深层的土壤水分满足了森林叶面积指数迅速增大的水分需求;但对表层土壤水分来说,降水补给的增加可能被因土壤水力梯度变化导致的表层土壤水分下渗补给量的增加所抵消,因而表层土壤含水率未呈上升趋势(图 3(b)),且与叶面积指数逐渐解耦。相似地,森林表层土壤含水率与实际蒸散发的相关性也在 2011 年后迅速降低(图 5(f))。

以上结果表明,黄河流域内蒙古段森林需水量总体超过环境的水分补给量,致根系延伸。长此以

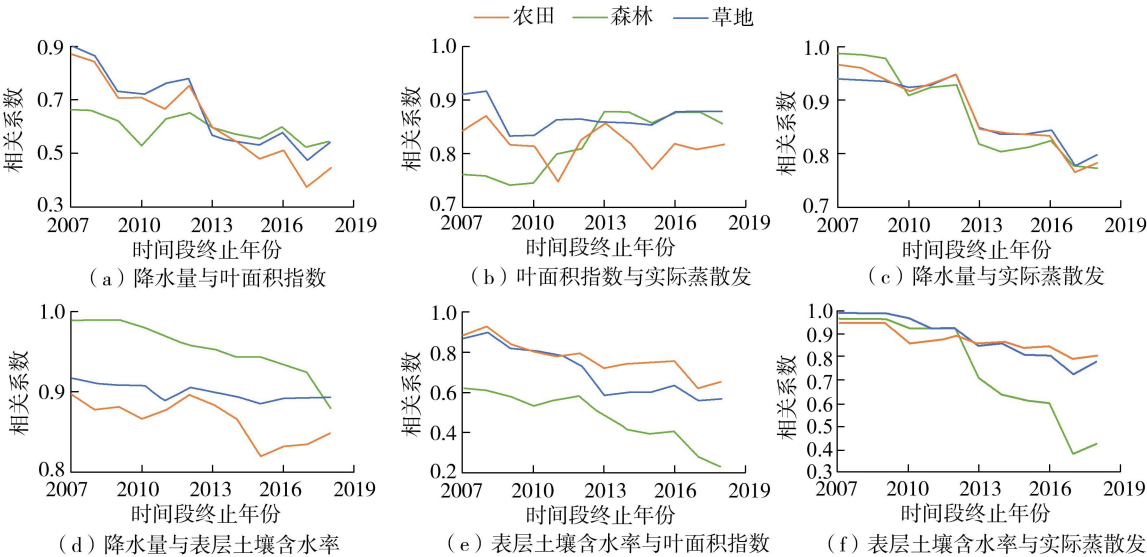


图 5 2003—2018 年农田、森林、草地区域植被及水文要素间的相关性(起始年为 2003 年)

Fig. 5 Correlations between vegetation and various hydrological elements in farmlands, forests and grasslands from 2003 to 2018 (The starting year is 2003)

往,将导致由表层逐渐发展至深层的土壤水分亏缺,最终限制该区域森林的生长。

5 结 论

a. 2003—2018 年黄河流域内蒙古段农田和草地的叶面积指数均加速增大;森林叶面积指数受降水年际波动的影响,先略有减小,2011 年后明显增大。森林年均降水量较蒸散发量与径流量之和低 16.5 mm,导致土壤水分甚至地下水亏缺;草地年均降水量略高于蒸散发量和径流量之和,但库布齐沙漠至毛乌素沙地一带的草地正从水分盈余转变为亏缺;此外,陆地总水储量整体以 5.8~9.5 mm/a 的速率下降,呼和浩特市南部地下水水位下降最快。

b. 黄河流域内蒙古段植被与水文要素间相互作用强度正发生变化。由于人类活动成为该地区叶面积指数增大的重要驱动因素,农田、森林、草地叶面积指数的变化受降水变化的影响逐渐降低;由于叶面积指数增大贡献了额外的蒸散发,降水变化对蒸散发年际波动的制约作用也有所减弱;此外,森林表层土壤含水率与降水的相关性逐渐降低,表明森林深层土壤水分亏缺可能已导致表层土壤含水率的下降。

c. 黄河流域内蒙古段植被和水资源管理应在以下方面进行优化:①黄河流域内蒙古段的森林植被覆盖度可削减约 4%,尤其是呼和浩特东北至乌兰察布一带需在控制造林强度的同时,适当间伐生长不良的林木;②库布齐沙漠至毛乌素沙地一带的造林种草量已基本达到生态水文阈值,应调整为自然恢复为主;③控制呼和浩特市以及临近的华北平原区的地下水开采量,同时完善灌区农田排水系统、降低渗漏损失。

参考文献:

[1] 韩煜娜,左德鹏,王国庆,等. 变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 199-207. (HAN Yu' na, ZUO Depeng, WANG Guoqing, et al. Evolution pattern and attribution analysis of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 199-207. (in Chinese))

[2] 陈晓菲,任立良,江善虎,等. 赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析[J]. 水资源保护, 2014, 30 (2): 33-37. (CHEN Xiaofei, REN Liliang, JIANG Shanhu, et al. RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang Basin [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (2): 33-37. (in Chinese))

[3] 杨秋侠,李学良. 基于效益-成本的绿色基础设施规模

设计[J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 36-41. (YANG Qiuxia, LI Xueliang. Scale design of green infrastructure based on benefit-cost analysis [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 36-41. (in Chinese))

[4] LI Yue, PIAO Shilong, LI L Z X, et al. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China [J]. Science Advances, 2018, 4 (5): eaar4182.

[5] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 515-520. (in Chinese)) .

[6] 薛联青,肖颖,刘远洪,等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护, 2023, 39 (4): 32-41. (XUE Lianqing, XIAO Ying, LIU Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4): 32-41. (in Chinese)) .

[7] 郝伟罡,李锦荣,郭建英,等. 荒漠草原植被动态变化及其与水热的响应关系[J]. 水资源保护, 2014, 30 (5): 56-59. (HAO Weigang, LI Jinrong, GUO Jianying, et al. Dynamic changes of vegetation in desert grassland and precipitation and temperature responses [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (5): 56-59. (in Chinese))

[8] SHEN Qin, GAO Guangyao, LYU Yihe, et al. River flow is critical for vegetation dynamics: lessons from multi-scale analysis in a hyper-arid endorheic basin [J]. Science of the Total Environment, 2017, 603-604: 290-298.

[9] DENG Lei, YAN Weiming, ZHANG Yongwang, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: evidence from northern China [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 366: 1-10.

[10] WANG Shuai, FU Bojie, PIAO Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2016, 9 (1): 38-41.

[11] 龙笛,韩忠颖,王一鸣. 变化环境下澜沧江-湄公河流域干旱趋势[J]. 水科学进展, 2022, 33 (5): 766-779. (LONG Di, HAN Zhongying, WANG Yiming. Projection of future droughts across the Lancang-Mekong River under a changing environment [J]. Advances in Water Science, 2022, 33 (5): 766-779. (in Chinese))

[12] LI Changjia, FU Bojie, WANG Shuai, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2 (12): 858-873.

- [13] 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.
- [14] 孙思琦, 陈永喆, 王聪, 等. 华北地区生态保护与恢复的水资源效应研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 97-106. (SUN Siqi, CHEN Yongzhe, WANG Cong, et al. Water resource effectiveness of vegetation conservation and restoration in North China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 97-106. (in Chinese))
- [15] 刘晓林, 杨胜天, 周旭, 等. 1980 年以来黄河内蒙古段十大孔兑流域土地利用变化时空特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 30-36. (LIU Xiaolin, YANG Shengtian, ZHOU Xu, et al. Spatial-temporal characteristics of land use changes in the ten tributaries of Yellow River in Inner-Mongolia since 1980[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(1): 30-36. (in Chinese))
- [16] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [17] LIU Qingfu, ZHANG Qing, YAN Yongzhi, et al. Ecological restoration is the dominant driver of the recent reversal of desertification in the Mu Us Desert (China) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122241.
- [18] 龙笛, 杨文婷, 孙章丽, 等. 海河平原地下水储量变化的重力卫星反演和流域水量平衡[J]. *水利学报*, 2023, 54(3): 255-267. (LONG Di, YANG Wenting, SUN Zhangli, et al. GRACE satellite-based estimation of groundwater storage changes and water balance analysis for the Haihe River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(3): 255-267. (in Chinese))
- [19] MA Han, LIANG Shunlin. Development of the GLASS 250-m leaf area index product (version 6) from MODIS data using the bidirectional LSTM deep learning model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 273: 112985.
- [20] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 25.
- [21] MCNALLY A, ARSENAULT K, KUMAR S, et al. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications [J]. *Scientific Data*, 2017, 4: 170012.
- [22] CHEN Yongzhe, FENG Xiaoming, FU Bojie. An improved global remote-sensing-based surface soil moisture (RSSM) dataset covering 2003-2018 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(1): 1-31.
- [23] SAVE H, BETTADPUR S, TAPLEY B D. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(10): 7547-7569.
- [24] WATKINS M M, WIESEM D N, YUAN D, et al. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120: 2648-2671.
- [25] LOOMIS B D, FELIKSON D, SABAKA T J, et al. High-spatial-resolution mass rates from GRACE and GRACE-FO: global and ice sheet analyses [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(12): e2021JB023024.
- [26] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1903-1925.
- [27] RYU Y, JIANG Chongya, KOBAYASHI H, et al. MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 812-825.
- [28] YANG Xiuqin, YONG Bin, REN Liliang, et al. Multi-scale validation of GLEAM evapotranspiration products over China via China FLUX ET measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(20): 5688-5709.
- [29] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193: 120-145.
- [30] ZHANG Caijin, LONG Di, LIU Tingxi, et al. Grassland greening and water resource availability may coexist in a warming climate in northern China and the Tibetan Plateau [J]. *Earth's Future*, 2023, 11(12): e2023EF004037.
- [31] 张才金, 龙笛, 崔英杰, 等. 遥感反演蒸散发在灌溉用水管理中的应用综述 [J]. *水利学报*, 2023, 54(9): 1087-1098. (ZHANG Caijin, LONG Di, CUI Yingjie, et al. Applications of remote sensing retrieval of evapotranspiration in irrigation water management: a review [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(9): 1087-1098. (in Chinese))
- [32] CRAMER V A, THORBURN P J, FRASER G W. Transpiration and groundwater uptake from farm forest plots of *Casuarina glauca* and *Eucalyptus camaldulensis* in saline areas of southeast Queensland, Australia [J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 39(2/3): 187-204.
- [33] CAO Hongye, HAN Ling, LI Liangzhi. Changes in extent of open-surface water bodies in China's Yellow River Basin (2000 - 2020) using Google Earth Engine cloud platform [J]. *Anthropocene*, 2022, 39: 100346.
- [34] LONG Di, YANG Wenting, SCANLON B R, et al. South-to-North Water Diversion stabilizing Beijing's groundwater

levels[J]. Nature Communications, 2020, 11(1):3665.

- [35] YANG Wenting, LONG Di,SCANLON B R, et al. Human intervention will stabilize groundwater storage across the North China plain[J]. Water Resources Research,2022, 58(2):e2021WR030884.
- [36] 任立良,王宇,江善虎,等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J]. 水资源保护,2022, 38(4): 26-32. (REN Liliang, WANG Yu, JIANG Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection,2022,38(4):26-32. (in Chinese))
- [37] YIN Zijun, XU Yuyue,ZHU Xiaoyun, et al. Variations of groundwater storage in different basins of China over recent decades [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126282.
- [38] 王学全,高前兆,卢琦. 内蒙古河套灌区水资源高效利用与盐渍化调控[J]. 干旱区资源与环境,2005, 19(6):118-123. (WANG Xuequan,GAO Qianzhao, LU Qi. Effective use of water resources and salinity and

waterlogging control in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(6) :118-123. (in Chinese))

- [39] XU Hang, SONG Jianfeng. Drivers of the irrigation water rebound effect: a case study of Hetao irrigation district in Yellow River Basin, China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 266 : 107567.
- [40] 张志才, 陈喜, 魏玲娜, 等. 森林植被对红壤坡地土壤水的影响 [J]. 水资源保护, 2011, 27 (1) : 15-19. (ZHANG Zhicai, CHEN Xi, WEI Lingna, et al. Effect of forest vegetation on soil moisture in sloping land with red soil [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (1) : 15-19. (in Chinese))
- [41] BARBETA A, MEJÍA-CHANG M, OGAYA R, et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest [J]. Global Change Biology, 2015, 21 (3) : 1213-1225.

(收稿日期:2023-08-28 编辑:熊水斌)

(上接第 106 页)

- [18] 邱锡鹏. 神经网络与深度学习[M]. 北京:机械工业出版社, 2020: 448.
- [19] 徐嘉远, 邹磊, 夏军, 等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 104-110. (XU Jiayuan, ZOU Lei, XIA Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 104-110. (in Chinese))
- [20] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [21] 丁紫玉, 方国华, 闻昕, 等. 考虑预报不确定性的水风光互补系统两阶段决策研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(4): 49-59. (DING Ziyu, FANG Guohua, WEN Xin, et al. Two-stage decision making model of a hydro-wind-photovoltaic hybrid system considering forecast [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(4): 49-59. (in Chinese))
- [22] 黄显峰, 颜山凯, 李大成, 等. 对水电效益影响最小的水风光互补运行方式研究[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 15-20. (HUANG Xianfeng, YAN Shankai, LI Dacheng, et al. Research on hydro - photovoltaic complementary rules for minimum influence on hydropower benefit[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 15-20. (in Chinese))
- [23] SUTSKEVER I, MARTENS J, DAHL G, et al. On the

importance of initialization and momentum in deep learning [C]//Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning, IEEE, 2013: 1139-1147.

- [24] 姜淞川, 陆建忠, 陈晓玲, 等. 基于 LSTM 网络鄱阳湖抚河流域径流模拟研究 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(1): 128-139. (JIANG Songchuan, LU Jianzhong, CHEN Xiaoling, et al. Theresearch of streamflow simulation using long and short term memory (LSTM) network in Fuhe River Basin of Poyang Lake [J]. Journal of Central China Normal University(Natural Science), 2020, 54(1): 128-139. (in Chinese))
- [25] 王秀杰, 乔鸿飞, 曾勇红, 等. 基于 TVF-EMD、GRA 和 LightGBM 的日径流预报模型应用研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 135-142. (WANG Xiujie, QIAO Hongfei, ZENG Yonghong, et al. Application of daily runoff forecasting model based on TVF-EMD, GRA and LightGBM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 135-142. (in Chinese))
- [26] 陈珺, 黄燕华, 洪朋, 等. 基于机器学习模型的河道水位预测 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 9-14. (CHEN Jun, HUANG Yanhua, HONG Peng, et al. Prediction of river water level based on machine learning model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 9-14. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-20 编辑:王芳)