

DOI: 10.5846/stxb201810072158

赵安周, 张安兵, 冯莉莉. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析. 生态学报, 2019, 39(1): - .

Zhao A Z, Zhang A B, Feng L L, Wang D L, Cheng D Y. Spatio-temporal characteristics of water-use efficiency and its relationship with climatic factors in the Haihe River basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析

赵安周^{1,2,*}, 张安兵^{1,2}, 冯莉莉¹, 王冬利^{1,2}, 承达瑜^{1,2}

1 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 邯郸 056038

2 河北省煤炭资源综合开发与利用协同创新中心, 邯郸 056038

摘要: 生态水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 是碳-水循环的重要参数之一, 明晰其时空演变特征对水资源短缺地区生态系统的健康发展具有重要的意义。海河流域水资源短缺是区域农业发展的重要制约因素, 基于遥感、气象数据, 利用趋势分析、相关分析等方法分析了海河流域 2000—2014 年总初级生产力 (gross primary productivity, GPP)、蒸散量 (evapotranspiration, ET) 及 WUE 的时空分布特征, 并识别 WUE 对降水、气温及干旱的响应。研究结果表明: (1) 时间上, GPP 和 ET 的变化趋势不显著, WUE 呈现显著的增加趋势, 增速为 $0.0185 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ ($R^2 = 0.6299$, $P < 0.01$); (2) 空间上, WUE 和 GPP 均呈现从东南向西北减小的趋势, 高值区主要分布在华北平原农业生态区和京津唐城镇与城郊农业生态区。从变化趋势来看, 黄土高原农业与草原生态区的 GPP 和 WUE 上升趋势最大; (3) 植被类型中, 农田的 WUE 值最高, 草地的 WUE 最低, 农田、有林草原和草地均呈现显著的增加趋势 ($P < 0.05$); (4) 影响因素上, 降水对 WUE 的影响最大, WUE 由降水、干旱和气温控制的区域分别占整个流域植被面积的 44.44%、39.23% 和 16.01%。

关键词: 水分利用效率; 时空分布; 气候变化; 海河流域

Spatio-temporal characteristics of water-use efficiency and its relationship with climatic factors in the Haihe River basin

ZHAO Anzhou^{1,2,*}, ZHANG Anbing^{1,2}, FENG Lili¹, WANG Dongli^{1,2}, CHENG Dayu^{1,2}

1 School of Mining and Geomatics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2 Hebei Collaborative Innovation Center of the Comprehensive Development and Utilization of Coal Resource, Handan 056038, China

Abstract: Water-use efficiency (WUE) is a key indicator of the interactions between the water and carbon cycles of terrestrial ecosystems. Understanding the spatiotemporal characteristics of WUE and the climatic factors that affect it could guide sustainable management of water resources and ecosystem services in areas lacking water. The Haihe River basin is located in a region sensitive to climate change and human activities, and water shortages have constrained sustainable development of regional agricultural and ecological environments. Using 2000—2014 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and meteorology data, we investigated the spatiotemporal changes in gross primary productivity (GPP), evapotranspiration (ET), and WUE in the Haihe River basin using linear trend analysis, correlation analysis, Mann-Kendall (M-K) tests, and other statistical methods, revealing four key results. (1) The change in annual GPP trended upward non-significantly ($R^2 = 0.1784$, $P > 0.1$), and ET trended downward non-significantly ($R^2 = 0.0269$, $P >$

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0503602); 教育部人文社会科学研究一般项目 (18YJCZH257); 河北省自然科学基金项目 (D2017402159); 河北省高等学校科学技术研究项目 (BJ2018043, QN2018054, ZD2018230); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (1724230057-1)

收稿日期: 2018-10-07; 网络出版日期: 2018-11-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoanzhou@126.com

0.1). Annual WUE significantly increased over 2000—2014 at a rate of $0.0185 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ ($R^2 = 0.6299$, $P < 0.01$). (2) The spatial patterns of average annual WUE and GPP in the Haihe River basin's vegetated areas varied widely, and the annual average WUE and GPP values decreased from the southeast to the northwest. High WUE and GPP values were mainly found in the North China Plain agricultural ecoregion and the Tianjin-Beijing-Tangshan urban and suburban agricultural ecoregion. The lowest WUE and GPP values were mainly found in the East Central Inner Mongolian Plateau typical steppe ecoregion, Loess Plateau agricultural and steppe ecoregion, and the deciduous forest ecoregion northwest of the Yanshan-Taihang Mountains. The WUE of the Haihe River basin increased, with WUE values of 91.11% and 60.17% of the Haihe River basin's vegetated areas increasing and increasing significantly ($P < 0.05$), respectively. That of the Loess Plateau agricultural and steppe ecoregion increased the most significantly. (3) The WUE means and trends among the different land use types also varied significantly. The mean WUE of croplands (CRO) was highest, and the WUE of grasslands (GRA) was lowest. The WUE of CRO, woody savannas (WSA), and GRA each increased significantly ($P < 0.05$). (4) Annual WUE was mainly affected by precipitation, and 41.44%, 33.23%, and 16.01% of WUE estimates in the Haihe River basin's vegetated areas were dominated by inter-annual variation in precipitation, drought, and temperature, respectively. The vegetated areas in which WUE was primarily shaped by precipitation were mainly found in the northern portion of the Yanshan-Taihang Mountains deciduous forest ecoregion, the North China Plain agricultural ecoregion, and the Tianjin-Beijing-Tangshan urban and suburban agricultural ecoregion. The vegetated areas in which WUE was primarily shaped by drought were mainly found in the northeast of the North China Plain agricultural ecoregion and the southern portion of the Yanshan-Taihang Mountains deciduous forest ecoregion. The vegetated areas in which WUE was primarily shaped by temperature were mainly found in the western portion of the Yanshan-Taihang Mountains deciduous forest ecoregion and the East Central Inner Mongolian Plateau typical steppe ecoregion.

Key Words: water use efficiency; spatio-temporal characteristics; climate change; Haihe River basin

水资源是限制我国北方地区社会经济发展的重要因素之一。随着全球气候的变暖、社会经济的发展及其人类活动的加剧,人类生产生活用水挤占生态环境用水的现象严重,如何平衡二者之间的关系逐渐受到国内外学者的广泛关注^[1-2]。生态系统水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)是指植被生态系统每单元碳吸收所损失的水分比率^[3-4]。作为连接生态系统中碳循环和水文循环的纽带,目前已成为生态系统与水文相互关系研究的热点问题^[2,5]。WUE通常被定义为碳增益(GPP)与耗水量(ET)的比值^[6]。作为植被生态系统碳、水循环的重要指示因子以及衡量植被生长状况的监测指标,对其时空演变及其对气候变化响应的研究有助于明晰生态系统碳-水循环对全球气候变化的响应机制,对优化地区水资源管理以及生态环境的健康发展具有重要的意义^[7-9]。

目前,国内外学者采用不同的方法对WUE的时空演变模式和影响因素进行了分析。Sun等^[10]和Xiao等^[11]利用生态过程模型和站点数据估算了中国WUE的时空演变规律及驱动因素,前者指出近30年来中国东北、西南等地区的WUE呈现上升的趋势,后者指出林地和耕地的WUE值高于草地。在区域尺度上,刘宪锋等^[2]和Zhang等^[9]利用MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)的GPP、ET产品和CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型估算的净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)对黄土高原的WUE时空演变进行了分析,认为近些年来黄土高原的WUE呈现显著增加的趋势。黄小涛和罗格平^[12]利用Biome-BGC模型对新疆地区的WUE时空演变规律进行了分析,认为该地区WUE具有显著的区域差异。从影响因素来看,仇宽彪等^[13]采用MODIS-GPP和ET数据对中国中东部农田的WUE时空演变进行了分析,指出降水、气温等气候变化因素是影响中国东部农田WUE变化的主要因素。Yang等^[14]和Liu等^[15]利用站点观测数据和模型模拟的方法对全球及其中国的WUE进行了分析,认为干旱对全球及其中国生态系统的WUE时空演变具有重要的影响。Sharma和Goyal^[16-17]利用MODIS-NPP和ET数据对印度地区的WUE时空演变进

行了分析,指出降水、干旱等水文气候因子是影响该地区 WUE 时空演变的重要因素。Huang 等^[18]采用模型模拟的方法对全球 WUE 的时空演变进行了分析,指出氮沉降、CO₂浓度的变化都会影响 WUE 的时空演变特征。应指出的是,站点观测数据精度较高但是会受到其数量和分布特征的限制,生态模型模拟的尺度较大但分辨率较粗,基于这两种方法很难获得对区域 WUE 时空演变的整体认识^[2,12]。

海河流域是我国水资源紧缺地区之一,近些年来,随着气候变化和人类活动的加剧,水资源短缺、水资源利用率低等问题已经成为限制该地区农业发展的主要因素。虽然已有研究对该地区水资源变化、植被变化进行了全面的分析,但是缺乏对其生态系统水分利用效率时空演变及其影响因素的分析^[19-21]。鉴于此,本文利用 MODIS 产品及其气象数据,对 2000—2014 年海河流域 WUE 时空变化特征进行分析,并探讨降水、气温以及干旱对 WUE 的影响,以期为全球气候变化背景下海河流域水资源安全利用及其生态环境可持续发展提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

海河流域地处华北平原北部,35°—43°N,112°—120°E 之间,包括北京和天津的全部区域、河北的大部分区域以及内蒙古、山西、辽宁、山东、河南的部分区域,总面积达 $3.19 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。地势由西北向东南倾斜,平均海拔 500 m 以上,气候类型为温带大陆性季风气候,年平均降水 530 mm,年均气温 1.5—14℃ 之间,属于半干旱半湿润地区^[22]。东部平原区地势较低,平均海拔在 300 m 以下,是中国主要的粮食主产区。西部地区主要为太行山脉和燕山山脉,地势较高,平均海拔多在 800 m 以上。植被类型主要包括农田 (Croplands, CRO)、草地 (Grasslands, GRO)、混交林 (Mixed Forests, MF)、闭合灌丛 (Closed Shrublands, CSH)、有林草原 (Woody Savannas, WSA)、农牧交错地 (Cropland/Natural Vegetation Mosaic, CRN) 以及非植被 (Non Vegetation, NV),其面积占流域总面积的 90% 以上 (图 1)。根据生态系统类型、地理特征等自然条件 (<http://www.ecosystem.csdb.cn>),将研究区划分为 I 黄土高原农业与草原生态区、II 燕山-太行山山地落叶阔叶林生态区、III 内蒙古高原中东部典型草原生态区、IV 华北平原农业生态区以及 V 京津唐城镇与城郊农业生态区 5 个生态区^[23],其中燕山-太行山山地落叶阔叶林生态区和华北平原农业生态区面积最大,分别占整个流域面积的 49.35% 和 30.54%;西北部的黄土高原农业与草原生态区和内蒙古高原中东部典型草原生态区面积较小,分别仅占整个流域面积的 4.69% 和 5.89% (图 1)。

1.2 数据来源

GPP (MOD17A2)、潜在蒸散发 (Potential Evapotranspiration, PET) 和 ET (MOD16A2) 数据来源于蒙大拿大学密苏拉分校地球动态数值模拟研究组 (Numerical Terradynamic Simulation Group, NTSG) 已经发布的 MODIS 数据产品 (http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/),其时间跨度为 2000—2014 年,时间分辨率为 8d,空间分辨率为 1 km×1 km;增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 数据来源于 EOS/MODIS 数据产品中的 MOD13A2EVI 数据 (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov>),时间分辨率为 16d,空间分辨率为 1 km×1 km。其中 GPP 产品是基于光合有效辐射利用效率模型计算,ET 产品是通过改进的 MOD16 算法计算得到,这些数据精度已与全球多个地区的通量站点数据进行了对比验证,在全球和区域研究中得到广泛应用^[24-27]。植被类型数据来源于 USGS Land Cover Institute (LCI, https://landcover.usgs.gov/global_climatology.php),该数据是基于 2001—2010 年的 MOD12Q1 土地利用数据制作而成,空间分辨率为 500 m×500 m,目前已在全球许多地区得到了应用^[16-17]。通过裁剪得到海河流域植被类型比例为:农田 (55.21%)、草地 (29.19%)、混交林 (5.53%)、闭合灌丛 (3.80%)、农牧交错地 (0.75%)。上述数据需经过拼接、投影转换、裁剪等预处理,将数据重采样到 1 km×1 km,以保证所有数据在空间上可以有效匹配。同时采用最大合成法 (Maximum Value Composite, MVC) 将 GPP、ET、PET 和 EVI 数据合成月数据,进一步合成得到 2000—2014 年海河流域年数据。

气象数据为海河流域 2000—2014 年 35 个气象台站的逐年降水、气温数据,来源于中国气象科学数据共

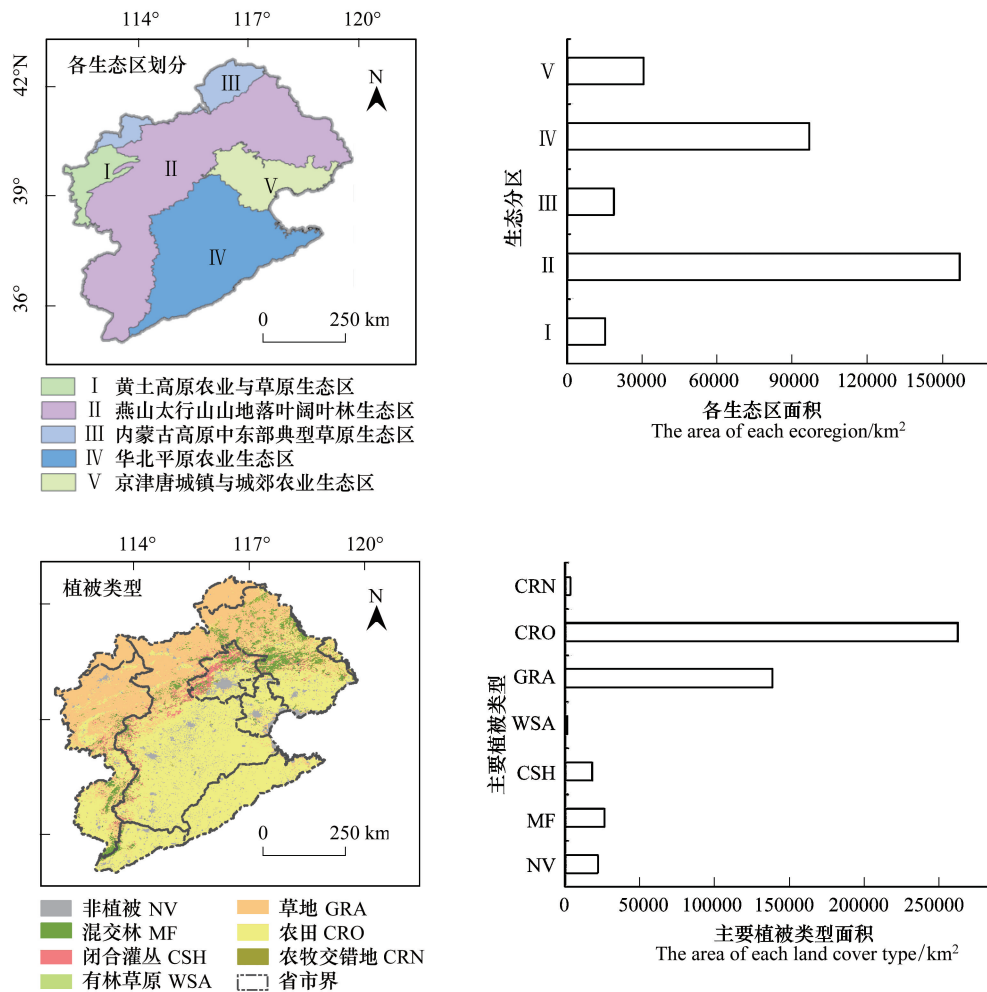


图1 海河流域生态区划分、各生态区面积、植被类型及主要植被类型面积

Fig.1 The ecoregions regionalization map, the area of each ecoregion, vegetation types, and the area of each vegetation type

CRO:农田,Croplands;GRO 草地,Grasslands;MF:混交林,Mixed Forests;CSH:闭合灌丛,Closed Shrublands;WSA:有林草原,Woody Savannas; CRN:农牧交错地,Cropland/Natural Vegetation Mosaic;NV:非植被 Non Vegetation

享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。利用反距离权重法(Inverse Distance Weighted,IDW)插值得到空间分辨率为1 km 的2000—2014 年海河流域逐年的降水量、平均气温数据。

1.3 分析方法

本文的WUE 采用GPP 与ET 的比值表示^[2]：

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (1)$$

式中,WUE 为生态水分利用效率,单位为 $gC\ kg^{-1}H_2O$;GPP 和ET 分别为陆地生态系统总初级生产和蒸散发,其单位为 $gC\ m^{-2}$ 和 mm ,均来源于MODIS 数据产品。

海河流域干旱情况采用基于遥感监测数据的干旱监测指数MDSI(Modified Drought Severity Index),该指数综合考虑了作物生长状况和水分胁迫信息^[28]。借鉴Mu 等^[28]基于MODIS NDVI(Normal Difference Vegetation Index)、PET 和ET 所构建的DSI(Drought Severity Index)方法,考虑到NDVI 在对植物生长茂盛期监测容易达到饱和等缺点,利用EVI 数据替代原方法中的NDVI,构建MDSI 干旱监测指数,具体步骤参考文献^[28]和^[29]。

采用最小二乘线性回归模型来分析2000—2014 年15 年期间海河流域GPP、ET 和WUE 整体变化趋势,

并采用 Mann-Kendall 统计检验法^[30-32]对其变化的显著性进行检验;同时采用 Person 简单相关系数在像元尺度上分析海河流域 WUE 与降水量、气温和 MDSI 的相关性。

2 结果分析

2.1 海河流域 GPP/ET/WUE 时空演变

2.1.1 时间变化特征

2000—2014 年海河流域 GPP 的均值为 596.98 (492.41—684.78 gC m^{-2}),近 15 年 GPP 呈增加的趋势,增速为 $5.07 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($R^2=0.1784$, $P=0.12$) (图 2);就不同的生态区来看,5 个生态区的 GPP 均呈增加的趋势,其中生态区 I 的增速最大,达到 $7.25 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($R^2=0.4875$, $P<0.01$),主要是该区域为国家生态工程重点建设区域,生态工程的实施使得该地区植被覆盖得到了很大提高,生态区 V 的增速最小,仅为 $0.60 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($R^2=0.0027$, $P=0.85$) (图 2)。就 ET 变化来看,近 15 年来海河流域的 ET 呈现微弱减小的趋势,其减小速率为 0.8175 mm a^{-1} ($R^2=0.0258$, $P=0.57$),其中生态区 IV 和 V 的 ET 减小速率最大,但均未通过 0.05 显著性水平检验(图 2)。就 WUE 来看,海河流域近 15 年 WUE 均值为 $1.52 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$,其值从 2000 年的 $1.31 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ 增加到 $1.69 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$,增加了 29.77% (图 2);就其变化趋势来看,WUE 呈显著增加的趋势,增速为 $0.0185 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ ($R^2=0.6299$, $P<0.01$),其中生态区 I 和 IV 增速最为明显,达到了 $0.0243 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ 和 $0.0236 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ ($P<0.01$) (图 2),可以看出,海河流域 WUE 的增加主要是由 GPP 的增加引起的。

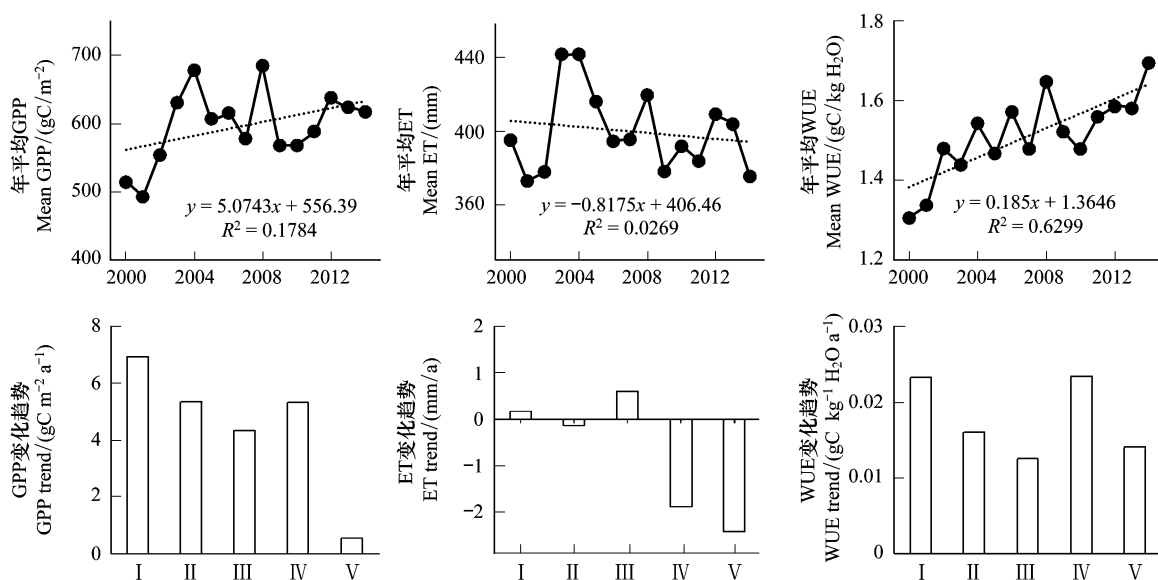


图 2 2000—2014 年海河流域及其不同生态区 GPP、ET 和 WUE 变化趋势

Fig.2 The inter-annual change and trends for the GPP, ET, and WUE in each ecoregion in Haihe River basin

2.1.2 空间变化特征

2000—2014 年海河流域 GPP、ET 和 WUE 的空间变化模式如图 3 所示。海河流域 GPP、ET 和 WUE 空间分布具有显著的空间差异。GPP 的高值区主要分布在生态区 IV 的南部和生态区 II 的南部和东北部地区,GPP 多年平均值高于 600 gC m^{-2} ,主要由于这些地区的植被类型为灌溉农业和林地,其植被长势较好(图 3);低值区主要分布在生态区 I、II 和 III 的西北部地区,其 GPP 多年平均值普遍在 400 gC m^{-2} 以下,主要是由于这些地区植被类型主要为草地,植被较为疏松(图 3)。从变化趋势来看,GPP 整体上呈上升的趋势,呈上升和下降趋势的面积分别占到 84.53% 和 15.47%,其中 32.64% 的区域呈现显著上升的趋势,主要分布生态区 I、II 的西部以及生态区 IV 的东部地区,表明这些地区的植被状况近些年来得到了改善(图 3)。

ET 的空间分布呈从东北向西南减小的趋势,高值区主要分布在生态区 II 的东北部以及生态区 IV 的南部

地区,ET 的多年平均值高于 500 mm,这些地区主要为灌溉农业,ET 较高;低值区主要分布在生态区 I 和生态区 III,ET 的多年平均值普遍在 300 mm 以下(图 3),这些地区主要植被类型为草地,其 ET 较低。就变化趋势来看,呈上升和下降趋势的面积分别占到 42.96%和 57.04%,其中呈现显著上升和下降的区域分别占 9.43%和 15.96%,显著上升的区域主要分布在生态区 II 东北部地区,显著下降的区域主要分布在生态区 V、生态区 II 和 IV 的西部地区(图 3)。

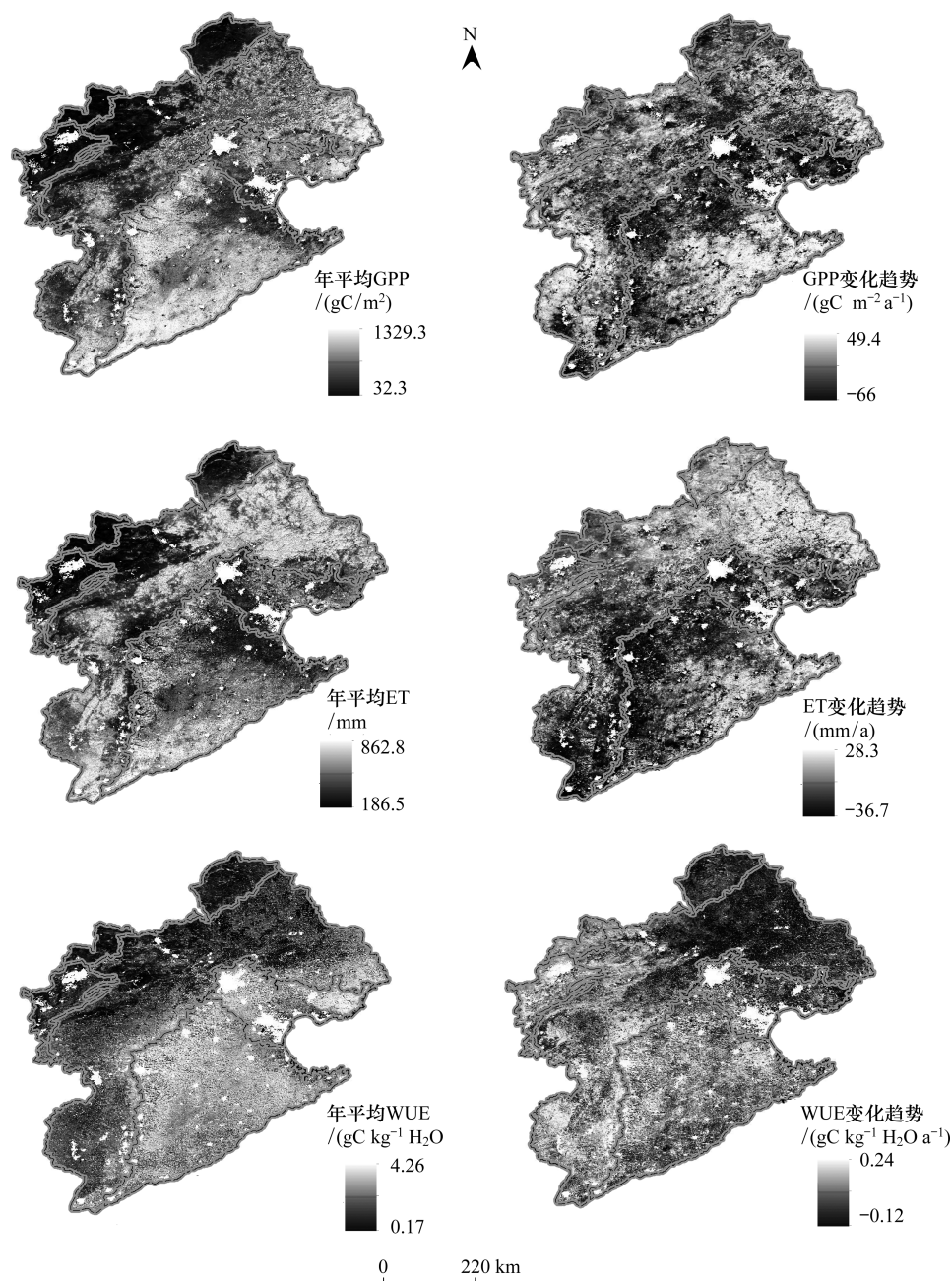


图3 2000—2014 年海河流域 GPP、ET 和 WUE 的空间变化模式及其变化趋势

Fig.3 The spatial patterns and change trend of GPP, ET, and WUE in Haihe River basin from 2000 to 2014

WUE 的空间变化模式同 GPP 类似,均呈现从东南向西北减小的趋势,表明在该流域其 GPP 的变化对 WUE 的影响大于 ET。高值区主要分布在生态区 IV 和 V, WUE 的多年平均值高于 1.5 gC kg⁻¹ H₂O, 低值区主要分布在流域西部的生态区 II、I 和 III, 这些地区的 WUE 多年平均值多低于 1.5 gC kg⁻¹ H₂O(图 3)。就变化

趋势来看,海河流域 2000—2014 年 WUE 整体呈上升和下降的趋势的面积分别占 91.11%和 8.89%,其中呈显著上升和下降的面积分别占 60.17%和 0.57%,表明近 15 年来海河流域的 WUE 得到显著提高(图 3)。

2.2 生态区 WUE 变化比较

在不同的生态区中,近 15 年来生态区Ⅳ和Ⅴ的 WUE 均值最大,分别为 $1.71 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 和 $1.70 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,生态区Ⅰ和Ⅲ的 WUE 均值最小,分别为 $1.31 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 和 $1.24 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 。就显著性变化来看,除流域东北部外,生态区Ⅱ南部、生态区Ⅰ、Ⅲ以及Ⅳ大部分地区 WUE 均呈显著上升的趋势(图 4)。具体来看,生态区Ⅰ 88.67%的区域呈显著的上升趋势,呈显著下降趋势的面积仅占 0.29%,其原因有可能是近些年的退耕还林还草等大规模的生态工程建设有效改善了该地区的生态环境,同时促进了该生态区 WUE 的显著增加;生态区Ⅱ 53.13%的区域呈现显著上升的趋势,主要分布在该生态区的中部和南部地区,仅 0.47%的区域呈显著下降趋势,主要零星分布在该生态区的北部地区;生态区Ⅲ 46.05%的区域呈显著上升的趋势,主要分布在该生态区的西北部地区;生态区Ⅳ和Ⅴ呈显著上升的区域分别占 74.97%和 44.25%,呈显著下降的区域分别仅占 0.30%和 2.42%(图 4)。

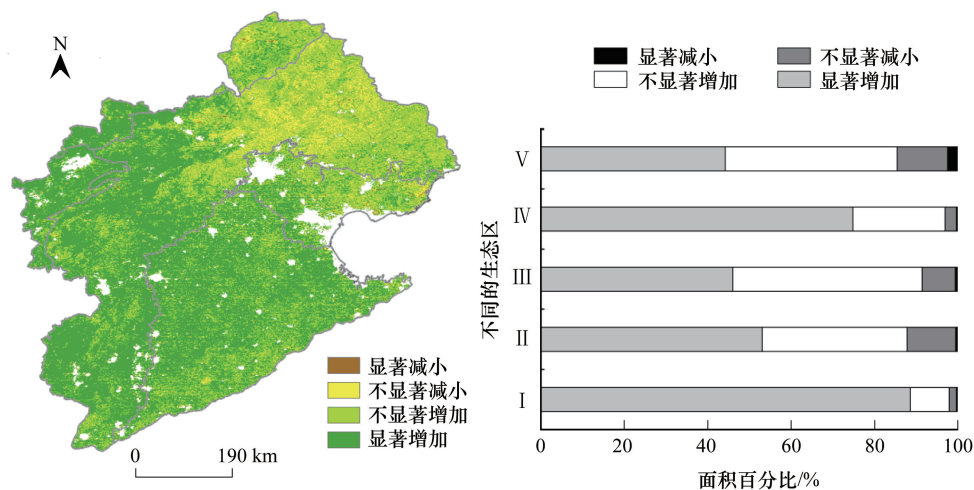


图 4 海河流域不同生态区 WUE 的显著性变化趋势及其面积比例

Fig.4 Significance of WUE values and area proportion in each ecoregion in Haihe River basin

2.3 不同植被类型的 WUE 分析

基于 MOD12Q1 数据,本文进一步分析了不同植被类型 WUE 的变化特征。结果显示,农田的 WUE 值最高,为 $1.62 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,其次为有林草原和闭合灌丛,其值分别为 $1.45 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 和 $1.40 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,草地的 WUE 最低,仅为 $1.30 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,表明不同植被生态系统的 WUE 有所差异(图 5)。就变化趋势来看,海河流域 6 种主要植被类型均呈现上升的趋势,其中农田、有林草地和草地均呈现显著的增加趋势($P < 0.05$),增速分别为 $0.021 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O a}^{-1}$ 、 $0.018 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O a}^{-1}$ 和 $0.017 \text{ gC kg}^{-1} \text{H}_2\text{O a}^{-1}$ (图 5)。

3 气候因子对生态 WUE 的影响

已有研究表明,降水、干旱、气温等气候因子的变化会影响 GPP 和 ET 的时空变化特征,进而影响 WUE^[14]。图 6 显示了 2000—2014 年海河流域年 WUE 与降水、气温和 MDSI 的相关系数。结果表明海河流域 2.67%和 11.18%植被区域的 WUE 与 MDSI 分别呈现显著的正相关和负相关,呈显著负相关的区域远大于显著正相关的区域,主要分布在流域东部的生态区Ⅳ和Ⅴ(图 6);就年 WUE 与气温的相关系数来看,呈显著正相关和负相关的区域分别占流域植被面积的 4.30%和 0.95%,呈显著正相关的区域远大于显著负相关的区域,主要分布在生态区Ⅱ的中部和生态区Ⅰ的南部(图 6);34.52%和 1.47%植被区域的年 WUE 与降水呈显著正相关和负相关,呈显著正相关的区域远大于呈显著负相关的区域,主要分布在生态区Ⅳ的南部、生态区Ⅱ的

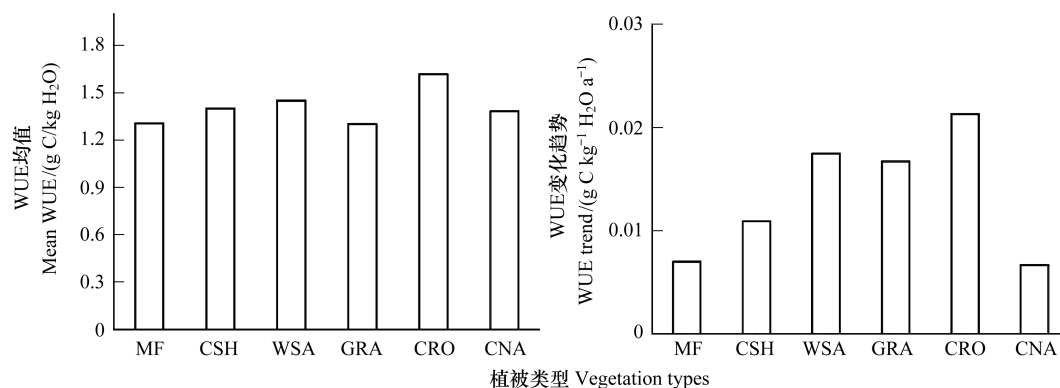


图5 2000—2014 年海河流域主要植被类型的 WUE 均值及变化趋势

Fig.5 Mean and trend of WUE for different vegetation types in Haihe River basin from 2000 to 2014

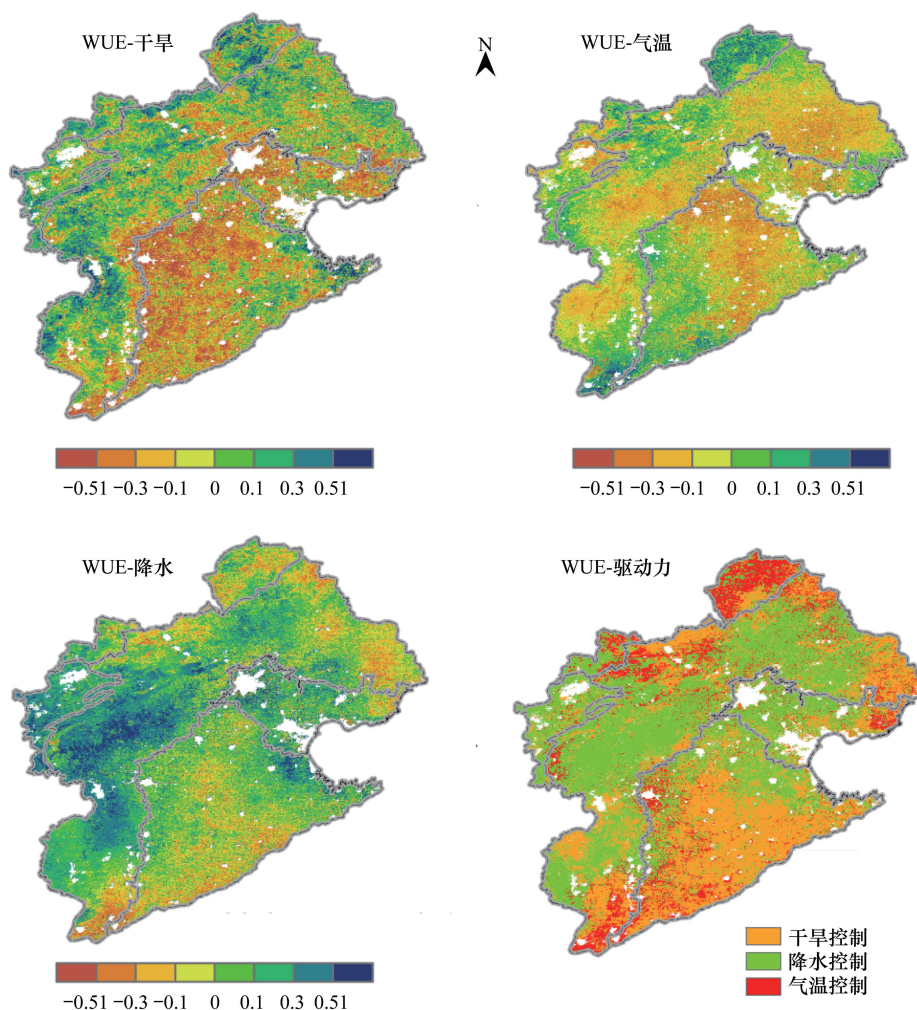


图6 2000—2014 年海河流域年 WUE 与 MDSI、气温、降水的相关系数以及主要驱动力空间分布

Fig.6 Spatial distributions of the correlation coefficients between WUE and MDSI, temperature, and precipitation, and spatial distribution of WUE dominant driver during 2000—2014 over Haihe River basin

西北部、生态区 I 和 III 等地(图 6)。

同时,本文进一步分析了海河流域 WUE 的主导因素空间分布(图 6)。可见,由降水控制的面积最大,占

整个流域植被面积的 44.44%, 主要分布在生态区Ⅱ、生态区Ⅳ和Ⅴ的北部地区。由于干旱控制的面积占整个流域植被面积的 39.23%, 主要分布在生态区Ⅳ和Ⅱ的东北部和南部。由气温控制的面积仅占整个流域植被面积的 16.01%, 主要分布在生态区Ⅱ的西部以及生态区Ⅲ。

4 讨论和结论

4.1 讨论

4.1.1 WUE 时空变化格局以及驱动力分析

海河流域地处半湿润、半干旱地区, 降水是限制该地区植被生长的主要因素^[21]。降水的增加会促使 GPP 增加, 从而使得 WUE 上升。就不同的生态区来看, 本文的研究结果表明, 海河流域不同生态区的 WUE 存在明显差异。流域东部的生态区Ⅳ和Ⅴ的 WUE 均值最大 ($1.71 \text{ gC kg}^{-1}\text{H}_2\text{O}$ 和 $1.70 \text{ gC kg}^{-1}\text{H}_2\text{O}$), 其原因是这两个生态区为传统农耕区, 植被类型主要为农田, 相对于其他植被类型, 农田的 WUE 值最大 (图 5)。流域西北部的生态区Ⅰ和Ⅲ的 WUE 值最低 ($1.31 \text{ gC kg}^{-1}\text{H}_2\text{O}$ 和 $1.24 \text{ gC kg}^{-1}\text{H}_2\text{O}$), 这两个生态区以牧业为主, 其草地面积分别占生态区的 88.22% 和 93.86%, 相对与其他植被类型, 草地的 WUE 值最小 (图 5)。除植被类型外, 降水的分布也是导致海河流域不同生态区 WUE 存在显著差异的原因, 2000—2014 年生态区Ⅳ和Ⅴ的年平均降水量分别达到 542.65 mm 和 561.05 mm, 远高于生态区Ⅰ和Ⅲ (454.63 mm 和 417.91 mm)。就变化趋势来看, 黄土高原农业与草原生态区的 WUE 上升最为显著, 主要是由于该区域作为生态建设的重点区域, 近些年来其植被状况得到了明显的改善, 其 GPP 的提高速度快于耗水量的提升, 进而使得该生态区的 WUE 上升最为显著^[2,9]。

从其驱动力来看, 本文主要分析了降水、气温以及干旱对 WUE 的影响, 相关分析表明降水对该流域 WUE 的变化影响最大, 主要是由于该地区处于半干旱半湿润地区, 降水的增多会促使植被光合作用的增强, 进而使得 GPP 大幅度增加, 而 ET 的增加幅度较小, 从而使得 WUE 增加^[32]; 这与刘宪锋等^[2]人的研究结果类似。除此之外, CO_2 浓度的升高会提高植被的光合作用, 进而使得 WUE 得到升高, 同时太阳辐射、相对湿度、氮沉降、辐射强度、土壤含水量、土地利用变化等因素的变化都会影响 WUE 的变化^[33]。

4.1.2 不确定性分析

本文计算 WUE 采用的 MODIS-GPP 和 ET 产品仍存在一定的不确定性。如估算 GPP 利用的参数最大光能利用效率采用了固定值, 不仅对植被的差异考虑不足, 同时没有考虑气候要素、土壤类型等对该参数的影响^[34]。ET 的计算是在彭曼公式的基础上计算的, 其植被覆盖率、反照率、气候数据等输入参数的不确定性会影响其计算精度^[3]。在影响因素方面, 本文选取了气温、降水以及干旱来分析 WUE 对气候变化的响应。其他因素如 CO_2 浓度、农业灌溉、土壤含水量、生态恢复工程建设也会对 WUE、GPP 的变化有重要影响^[9,13,18]。同时在分析 WUE 与气温、降水以及干旱等气候因素的关系时, 仅仅用了 Pearson's 相关系数等线性方法, 没有考虑气候要素与 WUE 的非线性关系。未来如何考虑多要素对 WUE 的影响及其之间的非线性关系值得进一步深入探究。

4.2 结论

基于 2000—2014 年 MODIS 数据和气象数据, 本文分析了海河流域 WUE 时空演变规律及其对降水、气温和 MDSI 的响应, 可以得到如下结论:

(1) 2000—2014 年 GPP 和 WUE 的均值为 596.98 gC m^{-2} 和 $1.52 \text{ gC kg}^{-1}\text{H}_2\text{O}$, GPP 和 WUE 均呈上升的趋势, 仅 WUE 的变化通过了显著性检验。

(2) 从空间变化来看, WUE 和 GPP 均呈现从东南向西北减小的趋势。高值区主要分布在生态区Ⅳ和Ⅴ, 低值区主要分布在流域西部的生态区Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ。就变化趋势来看, GPP 和 WUE 整体呈现上升的趋势, 其中生态区Ⅰ上升趋势最大。

(3) 就不同的植被类型来看, 海河流域农田的 WUE 值最高, 草地的 WUE 最低, 6 种主要植被类型均呈现

上升的趋势,其中农田、有林草地和草地均呈现显著的增加趋势($P<0.05$)。

(4)从影响因素来看,降水对 WUE 的影响最大,其次为干旱,气温对 WUE 的影响最小,海河流域 WUE 由降水、MDSI 和气温控制的区域分别占整个流域植被面积的 44.44%、39.23%和 16.01%。

参考文献 (References):

- [1] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lv 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.
- [2] 刘宪锋, 胡宝怡, 任志远. 黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素. *中国农业科学*, 2018, 51(2): 302-314.
- [3] 邹杰, 丁建丽, 杨胜天. 近 15 年中亚及新疆生态系统水分利用效率时空变化分析. *地理研究*, 2017, 36(9): 1742-1754.
- [4] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annual Review of Plant Physiology*, 1978, 29(1): 277-317.
- [5] Yu G R, Qiu-Feng W, Zhuang J. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(3): 303-318.
- [6] 邹杰, 丁建丽, 秦艳, 王飞. 遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 145-152.
- [7] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 周莉, 周旺明, 齐光, 齐麟, 叶雨静. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3255-3265.
- [8] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(2): 681-694.
- [9] Zhang T, Peng J, Liang W, Yang Y T, Liu Y X. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000-2010. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 105-122.
- [10] Sun S B, Song Z L, Wu X C, Wang T J, Wu Y T, Du W L, Che T, Huang C L, Zhang X J, Ping B, Lin X F, Li P, Yang Y X, Chen B Z. Spatio-temporal variations in water use efficiency and its drivers in China over the last three decades. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 292-304.
- [11] Xiao J F, Sun G, Chen J Q, Chen H, Chen S P, Dong G, Gao S H, Guo H Q, Guo J X, Hai S J, Kato T, Li Y L, Lin G H, Lu W Z, Ma M G, McNulty S, Shao C L, Wang X F, Xie X, Zhang X D, Zhang Z Q, Zhao B, Zhou G S, Zhou J. Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182: 76-90.
- [12] 黄小涛, 罗格平. 新疆草地蒸散与水分利用效率的时空特征. *植物生态学报*, 2017, 41(5): 506-518.
- [13] 仇宽彪, 成军锋, 贾宝全. 中国中东部农田作物水分利用效率时空分布及影响因子分析. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 103-109.
- [14] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, Zhou Y L, Wang S J, Wu X C. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13799.
- [15] Yang Y, Guan H, Batelaan O, McVicar T R, Long D, Piao S L, Liang W, Liu B, Zhao J, Simmons C T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23284.
- [16] Sharma A, Goyal M K. Assessment of ecosystem resilience to hydroclimatic disturbances in India. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): e432-e441.
- [17] Sharma A, Goyal M K. District-level assessment of the ecohydrological resilience to hydroclimatic disturbances and its controlling factors in India. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1048-1057.
- [18] Huang M T, Piao S L, Zeng Z Z, Peng S S, Ciais P, Cheng L, Mao J F, Poulter B, Shi X Y, Yao Y T, Yang H, Wang Y P. Seasonal responses of terrestrial ecosystem water-use efficiency to climate change. *Global Change Biology*, 2016, 22(6): 2165-2177.
- [19] 曹永强, 张亭亭, 徐丹, 杨春祥. 海河流域蒸散发时空演变规律分析. *资源科学*, 2014, 36(7): 1489-1500.
- [20] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 邱建秀. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应. *地理学报*, 2011, 66(5): 589-598.
- [21] 吴云, 曾源, 赵炎, 吴炳方, 武文波. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析. *资源科学*, 2010, 32(7): 1417-1424.
- [22] He J, Yang X H, Li J Q, Jin J L, Wei Y M, Chen X J. Spatiotemporal variation of meteorological droughts based on the daily comprehensive drought index in the Haihe River basin, China. *Natural Hazards*, 2015, 75(2): 199-217.
- [23] 中国科学院生态环境研究中心. 中国生态系统评估与生态安全数据库. <http://www.ecosystem.csdb.cn/>.
- [24] Zhao M, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [25] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [26] Chen X J, Mo X G, Hu S, Liu S X. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000

- to 2014. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(6): 661-680.
- [27] Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Chen Y J Zhu M J. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: D13113.
- [28] Mu Q Z, Zhao M S, Kimball J S, McDowell N G, Running S W. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(1): 83-98.
- [29] Dorjsuren M, Liou Y A, Cheng C H. Time series MODIS and in situ data analysis for Mongolia drought. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 509.
- [30] Kendall M G. *Rank Correlation Methods*. London: C. Griffin, 1948: 108.
- [31] 汤旭光, 李恒鹏, 聂小飞, 李鹏程. 应用 MODIS 数据监测千岛湖流域植被覆盖动态(2001—2013 年). *湖泊科学*, 2015, 27(3): 511-518.
- [32] Planque C, Carrer D, Roujean J L. Analysis of MODIS albedo changes over steady woody covers in France during the period of 2001—2013. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 191: 13-29.
- [33] 杜晓铮, 赵祥, 王昊宇, 何斌. 陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展. *生态学报*, 2018, 38(23) [2018-10-24].
- [34] Xue B L, Guo Q H, Otto A, Xiao J F, Tao S L, Li L. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 1-18.