

华北平原蒸散和GPP格局及其对气候波动的响应

莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 邱建秀

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 华北平原水资源不足影响农业和经济的可持续发展, 威胁国家的粮食安全。有效地预测区域的蒸散量和用水效率是合理配置农业和生态用水的前提。本文发展了一个基于遥感植被指数的蒸散和植被生产力模型, 利用MODIS遥感信息模拟了华北平原2000-2009年的蒸散和第一性生产力(GPP)。结果表明, 年和生长季累积蒸散和GPP的分布具有纬度地带性, 冬小麦季则更为明显。水分盈亏分析表明, 降水显著低于蒸散的地区主要分布在黄河流域以北, 南部地区降水有盈余。年尺度上, 黄河以北地区水分亏缺0~300 mm; 在小麦生长发育期, 几乎全区水分亏缺0~400 mm; 在玉米生长发育期, 黄河以北地区水分亏缺0~100 mm。此外, 蒸散和GPP的年内变化明显, 既受气候波动的影响, 也受植被的动态响应调节。

关键词: 植被指数; 蒸散; 植被生产力; 华北平原; 气候

1 引言

华北平原是我国重要的商品粮生产基地, 也是政治经济文化中心。然而, 由于降水量偏少, 地表水资源供给不足, 农业灌溉消耗大量的地表和地下水资源, 西北部出山口水库难以有效调节配置“生产、生活和生态”用水, “三生”用水矛盾突出。以往, 水资源管理部门往往以牺牲环境用水和生态健康为代价, 大量取用地表和地下水, 用于保证农业和社会经济稳定发展, 导致一些地区地下水超采、河道干涸、湿地退化、海水入侵等, 河道的长期断流使得一些河床逐步衍变为新的风沙源; 然而, 东部低地平原因浅层地下水位下降, 原先的盐碱地含盐量降低, 土壤质量提高, 作物生产状况有所改善。

农业和生态环境用水主要消耗于植被蒸腾和土壤蒸发(合称蒸散, 以ET表示)。通过调控ET, 减少无效蒸发, 比如改进灌溉方法, 避免大水漫灌, 采用秸秆覆盖等, 可有效提高水资源的利用效率, 改善生态环境。基于ET的用水管理, 逐步成为近年来区域生态环境、农业用水管理理念, 即由供水配置过渡到根据ET分配水权和水资源量。毋庸置疑, 蒸散和地表水文变量的实时监测和定量预报是实现基于ET的用水管理的关键。

地表蒸散由多个因子控制, 包括气候、植物生物物理、土壤特性、地形等, 在空间分布上呈现显著的变异性, 使得区域蒸散的估算变得相当困难。遥感信息具有快捷、连续、经济、面积广等特点, 能够较准确地刻画地表水热特征。其中, 植被指数作为红光和近红外短波辐射反射率的比值, 其时空连续序列能反映植被生长状况的动态变化, 被广泛用于植被长势、物候的监测, 以及植被覆盖度、叶面积指数的反演等。结合遥感信息和地面气象要素的蒸散模型的发展, 为区域蒸散的可靠估算提供了科学基础。迄今, 基于遥感信息的蒸散模型在国内外得到长足发展, 主要有如下几种类型, 即地表温度—通量法^[1]、空气动力学阻力—地表能量

收稿日期: 2011-01-06; 修订日期: 2011-03-13

基金项目: 国家重点基础研究 973 项目 (2010CB428404); 国际合作项目 (0911); 国家自然科学基金项目 (41071024) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2010CB428404; International Cooperation Project, No.0911; National Natural Science Foundation of China, No.41071024]

作者简介: 莫兴国 (1966-), 男, 广西平乐县人, 博士, 研究员, 从事陆地生态系统生态和水文过程的模拟研究。

E-mail: moxg@igsnrr.ac.cn

平衡余项法^[2]、地表温度—植被指数法^[3]、PM (Penman-Monteith) 公式法^[4-5]和双源-PT (Priestley-Taylor) 模型法^[6-7]等。同时,光能利用率模型由于其简便易操作,并与遥感信息结合,被广泛用于区域和全球植被生产力的计算^[8]。这些模型在全球各地得到广泛应用,加深了对蒸散和水分利用过程的理解。

然而,多数蒸散反演研究仍局限于较短时间尺度。基于遥感模型的蒸散反演,只能得到各观测时相的瞬时蒸散值,根据“蒸发比”概念,实现观测日蒸散量的估计。国内研究人员开展了诸多日蒸散遥感反演研究。如基于SEBAL模型,利用Landsat影像进行的区域日蒸散反演^[9-12];基于SEBS模型,利用NOAA AVHRR数据^[13-14]、MODIS数据^[15-18]开展的区域日蒸散量反演;基于双源蒸散模型,利用Landsat资料,对日蒸散^[19]和瞬时蒸散^[20]的反演;基于P-T法,利用MODIS数据反演区域日蒸散^[21]。而关于蒸散的季节、年际波动的报道相对较少。已有研究中,或通过时间序列插值(如傅里叶谐波分析)^[16-17]或利用地面气象资料通过PM公式计算参考作物蒸散,根据作物系数和“参考蒸发比”将日蒸散量反演结果扩展到月、季、年尺度^[22-23]。也有学者利用遥感信息反演晴天的表面阻抗,经平滑处理,代入PM模型估算非晴天蒸散量,得到作物生长季的总蒸散量^[24]。基于光能利用率概念的遥感生产力反演模型,虽然不如基于生理生态机制的过程模型能够更好地阐释植被生长的相关生态过程,但却能较好地描述景观空间异质性,且相对简便易行。鉴于此,一些学者采用光能利用率模型开展了区域或全国尺度的植被生产力及其空间分异性研究^[25-30]。

本文在PM法和双源-PT法的基础上,发展一个简化的遥感蒸散和生产力模型,利用长时间序列的遥感植被指数和气候要素,模拟分析华北平原区域尺度蒸散和生产力的空间格局、季节变化及其对气候波动的响应。研究成果可用于生态环境耗水、用水效率评估,对水文预报、水资源管理和灌溉方案设计等具有指导意义。

2 研究方法、区域与数据

2.1 模型介绍

陆面植被蒸散过程可以看成水汽从两个源(地表土壤和冠层)扩散到大气,这是双源模型的前提假设。令植被蒸腾为 E_c ,土壤蒸发为 E_s ,则蒸散(ET)可表示为:

$$ET = E_c + E_s \quad (1)$$

其中 E_c 的计算由作物潜在蒸腾 E_{cp} 而得:

$$E_c = E_{cp} f_w f_t \quad (2)$$

$$E_{cp} = (\Delta R_{nc} + f_c \rho_c p D / r_a) / (\Delta + \gamma') \quad (3)$$

式中: R_{nc} 为冠层吸收的净辐射, f_c 为植被覆盖度, f_w 和 f_t 分别为水分和温度的胁迫因子, Δ 为温度—饱和水汽压曲线斜率, $\rho_c p$ 为空气比热, r_a 为空气动力学阻力, D 为饱和水汽压差, γ' 为考虑了叶片最小气孔阻力的干湿常数,与植被类型有关。由于植被根系能够吸收深层土壤水分,蒸腾对土壤水分胁迫的响应通常反映在较长时间尺度上,且往往体现于叶面积指数或覆盖度的变化,比如干旱可导致叶片枯黄和凋落,降低冠层覆盖度。本文温度和水分胁迫因子 f_t 和 f_w 分别根据如下表达式计算^[8],

$$f_t = \exp(-(T_a - T_o) / T_o)^2 \quad (4)$$

$$f_w = (D_o - D) / (D_o - D_c) \quad (5)$$

式中: T_o 为植物叶片气孔蒸腾最适宜温度(取22°C), T_a 为气温, D_o 和 D_c 分别为触发气孔收缩和气孔完全关闭时的空气水汽饱和差(设为6.5和38 hPa)。

土壤蒸发由地表潜在蒸发和土壤水分的渗出速率共同限制,取其中较小值,即

$$E_s = \min(E_{sp}, E_{ev}) \quad (6)$$

$$E_{sp} = (\Delta(R_{ns} - G) + (1 - f_c)\rho c_p D/r_a)/(\Delta + \gamma') \quad (7)$$

式中: E_{sp} 为地表潜在蒸发, R_{ns} 为土壤吸收的净辐射, G 为土壤热通量。

土壤水分渗出率 E_{ex} 的计算公式为:

$$E_{ex} = S(t^{0.5} - (t - 1)^{0.5}) \quad (8)$$

式中: S 为土壤脱湿力 (desorptivity), 由土壤质地、孔隙度等因子决定, 土壤脱湿力一般为 3~5 mm/d^{0.5}[31], 本文取 4 mm/d^{0.5}。

植被冠层截获太阳光合有效辐射, 通过光合作用固定能量, 形成光合产物, 同时蒸散消耗水分。根据冠层截获的光合有效辐射和光能利用效率可以计算植物的碳同化量, 即

$$GPP = \varepsilon_{max} APAR * f_i f_w \quad (9)$$

式中: GPP 为第一性生产力 ($gC m^{-2}$); ε_{max} 为光能利用率 ($gC MJ^{-1} PAR$), 冬小麦 (C3 作物) 取 1.6 $gC MJ^{-1} PAR$, 夏玉米 (C4 作物) 取 1.87 $gC MJ^{-1} PAR$, 林地取 0.9 $gC MJ^{-1} PAR$ 。 $APAR$ 为植物吸收的光合有效辐射。

标准化植被指数 (NDVI) 是使用广泛的植被遥感信息, 由红光和近红外光谱反射率计算而得, 广泛用于植被覆盖度的计算。根据 Li 等 (2005)^[32], 植被覆盖度 f_c 可由下式计算

$$f_c = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^a \quad (10)$$

式中: a 为经验常数, 取值在 0.6~1.25 之间, 这里 a 取 0.8。 $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为冠层郁闭和裸地时的 NDVI 值。冠层和地表土壤吸收的净辐射由冠层顶净辐射以植被覆盖度为权重线性分割得到, 即

$$R_{nc} = f_c R_n \quad (11)$$

$$R_{ns} = (1 - f_c) R_n \quad (12)$$

以上构建的模型应用于华北平原蒸散和 GPP 估算, 模拟的空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为天。模拟时段为 2000-2009 年, 共 10 年。

2.2 研究区介绍

华北平原处于 30°00'~40°24'N、112°48'~122°45'E, 包括河北、河南、山东、安徽、江苏、北京及天津等五省二市的大部或部分地区, 总面积约 40 万 km^2 。研究区北起燕山, 西沿太行山、伏牛山, 南抵淮河干流及苏北灌溉总渠, 东临渤海与黄海, 除山东半岛为丘陵区外, 大部分地区地势平坦, 平原面积约 33 万 km^2 , 耕地面积约占总面积的 72%。

该区属于大陆性季风型暖温带半湿润气候, 季节差异明显, 温度的季节变化大, 冬冷夏热。太阳辐射强、潜在蒸散约 1100 $mm yr^{-1}$ 。降水时空分布不均匀, 雨热同季, 全年降雨量约 500~1000 mm , 其中 6-9 月集中了全年降雨量的 80% 左右。该地区以冬小麦—夏玉米复种、一年两熟的种植制度为主, 兼种大豆、油菜、谷子、高粱和棉花等。

2.3 数据来源及处理

卫星资料来源于 2000-2009 年 TERRA 卫星 MODIS 辐射计, 数据为 1 km 分辨率、16 天最大值合成的归一化差值植被指数, 从 MODIS 网站下载。遥感影像图经过严格的几何校正、配准、投影变换等数据处理, 投影方式由原投影转为兰勃特等积方位投影。针对 MODIS 遥感信息, $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别取 0.90 和 0.15。

利用华北地区 88 个气象站逐日气象资料, 通过距离平方反比法空间插值, 得到每个栅格点的气象信息。入射短波和长波辐射根据经验公式由日照时数计算。模型验证采用的水汽和 CO_2 通量观测资料来自中国科学院禹城综合试验站 (116°38'E, 36°57'N) 的中国通量网湿度相关系统 2003-2005 年观测数据。

3 结果分析与讨论

3.1 模型模拟ET的验证和参数的敏感性

选择涡度相关观测点(中国科学院禹城试验站)所在网格及其周围8个格点,运行模型,将模拟结果与涡度相关法观测的日蒸散量进行对比,并剔除缺测和不合理的数据(图1a)。两者具有较好的相关性($R^2 = 0.54$),最佳拟合线的斜率为1.03,均方根误为 0.94 mm d^{-1} 。该观测点2000-2009年10年平均的模拟蒸散量为 694 mm yr^{-1} ,与王菱等^[33]在华北平原以田间实验资料为基础,建立的农田蒸散量和土壤相对含水量、潜在蒸散的函数关系计算得到的多年平均蒸散量 630 mm ,以及与赵静等^[34]结合NOAA/AVHRR数据利用SEBS模型估算得到的华北平原区域陆面蒸散量年平均值 $700\sim 800 \text{ mm}$ 基本吻合。

值得注意的是,不同的灌溉水量,甚至同样灌溉水量在年内的不同分配都会造成农田蒸散约 $100\sim 200 \text{ mm}$ 的差别^[35]。大型蒸渗仪(蒸发面积 3.14 m^2)观测的多年平均蒸散量为 810 mm yr^{-1} ,偏差约为 110 mm 。一般可认为蒸渗仪内作物供水充分、不受水分胁迫,而模拟的像元内包含道路、村庄等,地表覆盖度比田间低,灌溉条件也不一致,因此模拟的蒸散量比蒸渗仪观测值稍少是可接受的。GPP模拟结果与观测值的相关系数为0.70,斜率为0.86(图1b),年总量的差别小于10%。在平坦、植被均匀农田上观测的碳通量,由于混合像元和非植被组分的影响,观测结果往往产生较明显的尺度效应。通过以上对比分析,认为本模型的模拟结果是可信的。

模型中, $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$ 属于敏感参数,将这两个参数分别变化10%,则导致年蒸散量分别变化1.2%和2.2%,GPP则变化2.2%和12.7%。在小麦生长盛期的四、五月份,农田周围其它的植被仍处于返青期,导致像元尺度(1 km)的覆盖度与田间观测的盖度有明显差别,造成像元尺度的估算值与田间观测值的显著偏差,也就是所谓“农区”和“农田”的差别。

华北平原实际蒸散呈典型的双峰变化(图2)。在小麦生长季内,随着温度的升高和降水量的增加,潜在蒸散和实际蒸散开始上升,到小麦生长盛期(DOY 110-140)实际蒸散和潜在蒸散达到年内第一个高峰,到小麦收获(DOY 160-170)实际蒸散形成低值区。当到玉米生长季,降水、温度达到年内最高,作物生长最繁盛,实际日蒸散达到年内最大,玉米生长盛期(DOY 175-275)多数年份实际蒸散与潜在蒸散接近,此后随着叶片衰老,潜在蒸散和实际蒸散下降,至小麦播种期形成一个新的低值区,播种后实际蒸散有一个较快增长,越冬后,实际蒸散和潜在蒸散达到年内最低值。

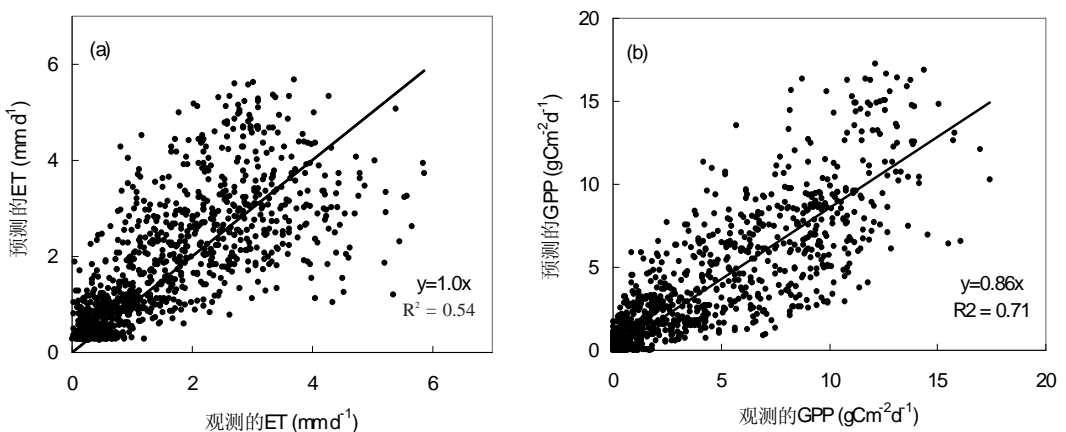


图1 遥感模型模拟的2003-2005年逐日蒸散(a)和GPP(b)与涡度相关观测值对比

Fig. 1 Comparison of simulated daily evapotranspiration (a) and GPP (b) with observation

based on eddy covariance technique during 2003-2005

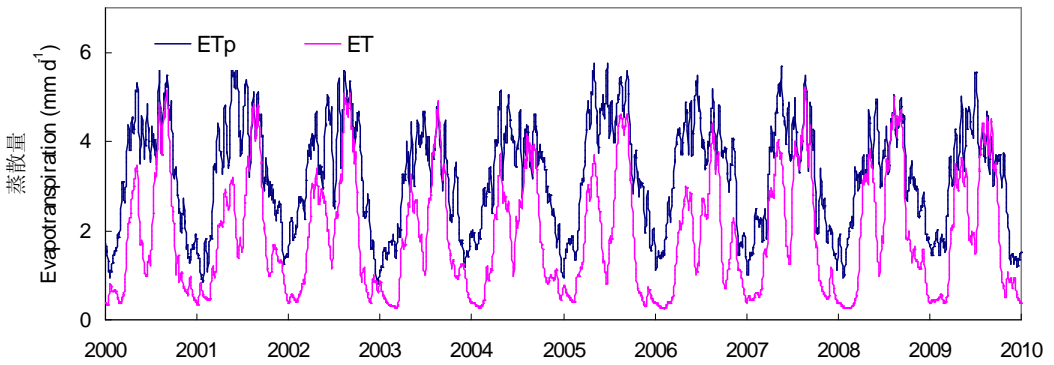


图2 2000-2009年10天滑动平均实际蒸散量和潜在蒸散年变化

Fig. 2 Ten-day running average evapotranspiration (ET) and potential evapotranspiration (ET_p) during 2000-2009

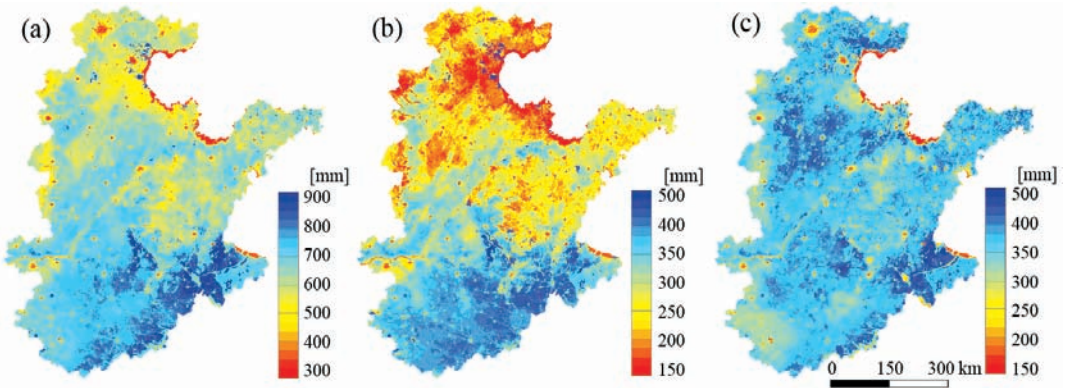


图3 2000-2009年10年平均的年总蒸散量 (a)、冬小麦生育期蒸散量 (b) 和夏玉米生育期蒸散量 (c)

Fig. 3 Decadal averages of evapotranspiration on annual total (a), in winter wheat growing period (b), and in summer maize growing period (c) during 2000-2009

3.2 ET的空间分异性

虽然华北平原大部分为农田,其年蒸散量仍有明显的空间分异性(图2a)。总体上呈现南高北低的趋势,与降水和温度的纬度地带性变化一致。在灌溉条件好的地方,蒸散量较高。具体表现为,在河南省南部、安徽和江苏省北部,降水较丰沛,植被覆盖度高,年蒸散量在700~900 mm间,其中水田和水体的蒸散约850 mm;除河北平原中东部沿河地区、城镇区、山地等外,其它地方年蒸散量基本上在600~750 mm间。河北沧州等低地平原因地下水含盐量高,灌溉水不足,植被盖度较低,年蒸散量也偏低,尤其是冬小麦生育期。城区大部分为建筑物、黄河河道多为河滩地,年蒸散量大约为350~500 mm。整个区域平均蒸腾量占蒸散的60%~70%,这与田间的观测结果一致^[36]。

对夏收和秋收作物而言,其生育期内蒸散量的空间分异性呈现明显的差异,这与降水的季节分配相吻合。在小麦生育期,蒸散由南向北递减的纬度地带性变化非常明显(图3b, c),其中南部地区蒸散量为350~450 mm左右,高值区主要分布在江苏和安徽省北部。山东丘陵区、河北中东部雨养农业区的蒸散量约250 mm,与同期雨量大致相当。沿渤海滩涂,缺乏植被覆盖,多为沙地,蒸散较低,不足200 mm。太行山前平原、北京东部地区灌溉条件较好,蒸散量在300~350 mm之间。

在夏玉米生育期(6月中旬到10月上旬),正是华北地区的雨季,降水基本满足作物需求,蒸散量的空间差异不明显。在江苏北部、胶东半岛东部、河北平原的部分地区出现较高蒸散量,约450 mm,而在河南西部的低丘陵区,土壤保水能力弱,植被较差,蒸散偏低,仅

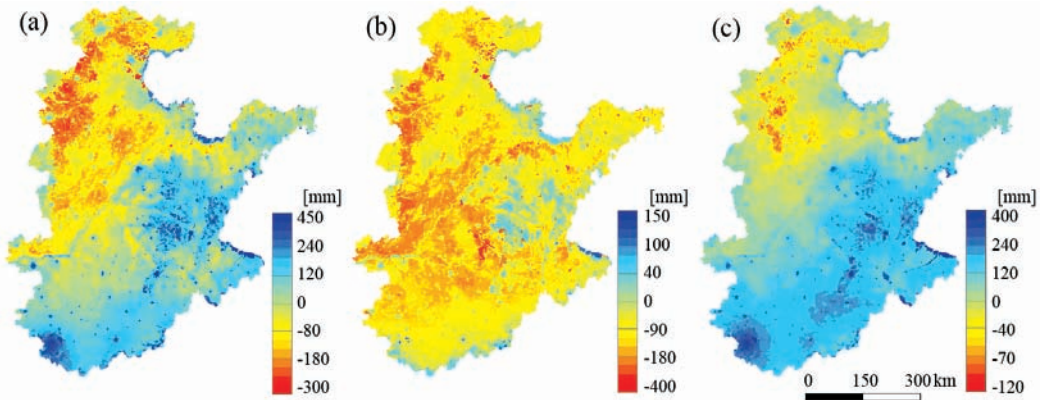


图4 2000-2009年10年平均的年降水量与总蒸散量之差 (a)、冬小麦生育期降水量与蒸散量之差 (b) 和夏玉米生育期降水量与蒸散量之差 (c)

Fig. 4 Decadal averages of the differences between precipitation and evapotranspiration on annual total (a), in winter wheat growing period (b), and in summer maize growing period (c) during 2000-2009

320 mm左右。大部分地区蒸散量在360~420 mm之间。

从降水与蒸散的差值(图4)可以发现,多年平均而言,大致在黄河以南水分有盈余,黄河两岸及以北地区,大部分地区蒸散大于降水,差额来源于上游山区水库和地下水的灌溉补充。灌溉补充的水量有地域差异,最高在太行山、燕山山前平原,大约150~200 mm,占降水的三分之一到四分之一,显示该地区水资源开发利用严重超支。其中,在小麦生育期,若有条件,所有的农田都需要灌溉,且灌溉量大致为200 mm左右,其中太行山前平原灌水量最大,超过200 mm;雨养农田则消耗掉部分前期土壤蓄水。在玉米期,黄河以南降水有100~250 mm盈余,用于补充土壤、地下水 and 地表水,而黄河以北地区,除太行山、燕山山前平原需补充大约50 mm灌水量外,水分收支虽基本持平,仍略显不足。可见,总体而言,华北平原本身水资源供需季节性失衡,春季农业生产用水严重依赖上游山区水库蓄水、黄河来水,以及深层地下水等。

3.3 GPP和水分利用效率的空间分异性

植物消耗水分形成干物质的效率称为水分利用效率,表示为GPP与ET之比(WUE)。华北平原年累积GPP空间分布的分异性不明显,南部地区基本上在1500~2000 gC m⁻²之间(图5),最高值出现在江苏省北部的的水田和灌溉地,沿黄河两岸、太行山前平原因灌溉条件较好,GPP也较高,约1500 gC m⁻²。山东半岛丘陵区、河北中东部低地平原,因灌溉水源或土壤盐碱度高,导致GPP较低,大致在500~1000 gC m⁻²。此外沿海荒滩几乎无植被,GPP很低。在冬小麦生育期内,累积GPP总体上呈现南高北低的格局,主要与降水和灌溉条件有关,其中南部的高值区在700~1000 gC m⁻²间,太行山前平原在500~750 gC m⁻²间,胶东半岛、河北东北部GPP较低,在500 gC m⁻²以下。

在夏玉米生育期,GPP空间分布较为均匀。高值出现在太行山前及中部平原、唐山地区、连云港地区,大致在900~1100 gC m⁻²之间;其它大部分区域GPP约600~800 gC m⁻²,河南西南部等丘陵旱地、南四湖等湿地、北京等城区的GPP较低,在600 gC m⁻²以下。造成夏季北部GPP比南部高的原因,主要是南部云天多,北部地区光照条件比南部好,更有利于光合作用。

水分利用效率的空间格局与GPP类似。根据日光合作用率与蒸散量的关系分析发现,光合作用率与蒸散成线性关系,说明两者的一致性。从年尺度上看,WUE分布较为均匀,大部分地区约2 gC m⁻² mm⁻¹。对冬小麦而言,WUE的空间分异性较大,呈现由南向北递减的趋势,其中灌溉区的效率较高,在2 gC m⁻² mm⁻¹,而旱地偏低,在1.5 gC m⁻² mm⁻¹以下。对玉

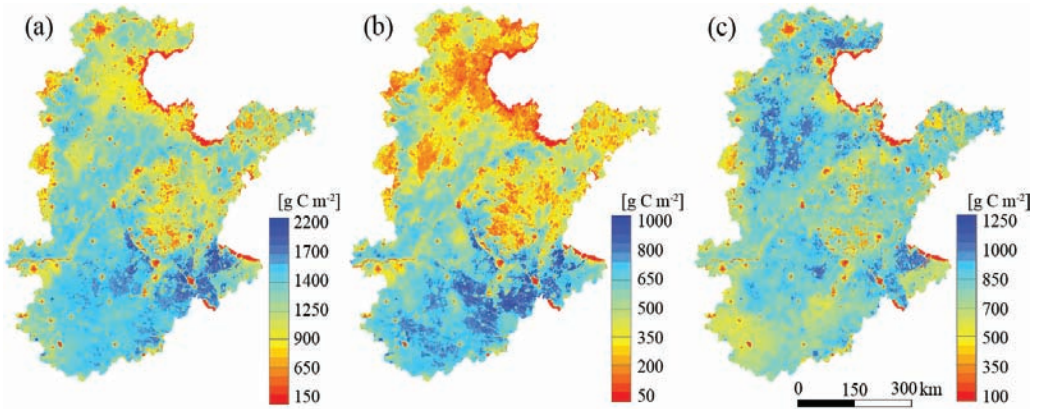


图5 2000-2009年10年平均的年总GPP (a)、冬小麦生育期GPP (b)和夏玉米生育期GPP (c)

Fig. 5 Decadal average of GPP on annual total (a), in winter wheat growing season (b), and in summer maize growing season (c) during 2000-2009

米期而言,用水效率空间分布也较为均匀,即中部地区,尤其是河北平原中西部效率最高,大部分地区WUE约 $2.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 。

3.4 ET和作物光合生产力的年际变化

华北平原气候呈现明显的年际变化,在2000-2009这10年里,年平均降水量为734 mm,其变率(标准偏差/平均值)为15.6%;植被指数的变率为5.8%,其中小麦和玉米期的变率分别为9.9%和4.0%(图6)。实际年蒸散量为658 mm,变率为5.8%(其中冠层蒸腾变率为8.6%、土壤蒸发为7.7%),比大气蒸发力的变率(6.0%)稍低。虽然蒸散的变化小于降水的变化,但其年际变化的极值可达60 mm多,占年总量的10%左右;GPP年际变化的极值差异更可高达25%。因此,植被动态对气候变异的响应是不应被忽略的。据Zhou等^[37]对区域植被指数与温度年距平的分析,发现温度的波动与植被动态变化相当一致。

实际蒸散变率较小的主要原因是该地区的大量灌溉,满足了作物的耗水需求。在灌溉设施齐全的农田,蒸散量的年际波动只有20 mm左右,而雨养地区的蒸散变幅较大。相对而言,小麦生育期内实际蒸散的波动幅度比玉

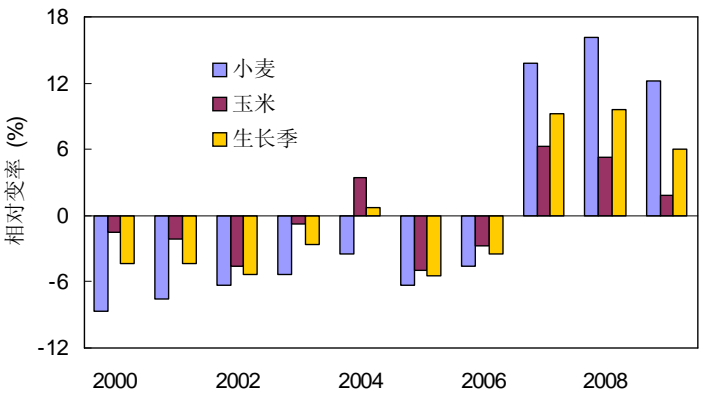


图6 生长季、小麦和玉米生育期累计NDVI的年际相对变率

Fig. 6 Relative anomalies of cumulative NDVI for the whole growing season, winter wheat and maize periods respectively

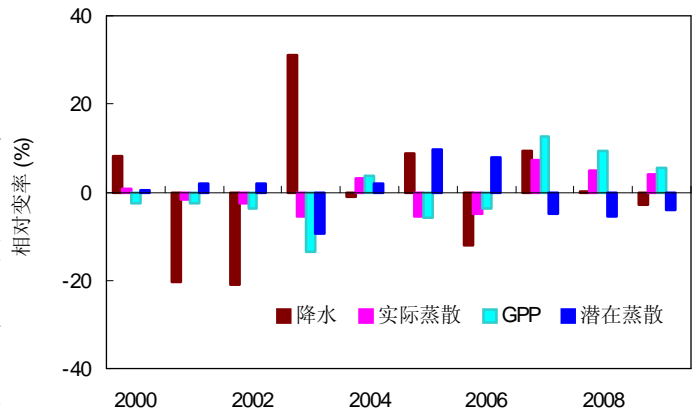


图7 年降水、潜在蒸散、实际蒸散和GPP的年际相对变率

Fig. 7 Relative changes of annual precipitation, potential evapotranspiration, actual evapotranspiration and GPP

米期稍高,可达7.2%。相对于蒸散,作物光合生产力的变化更高一些,约7.6%,其中小麦光合生产力对气候波动的响应尤为敏感,年际变率可达16.7%(图7)。

4 结论

本文建立了简化的遥感蒸散和GPP模型,利用地面气象信息和MODIS卫星遥感信息,模拟分析了华北平原2000-2009年蒸散量、GPP和水分利用效率的时空格局和演变特征。结果表明,黄河以南大部分地区水分有盈余,而北部地区则需要外来水源补充。年尺度上,黄河以北地区水分亏缺0~300 mm;在小麦生长发育期,几乎全区水分亏缺0~400 mm;在玉米生长发育期,黄河以北地区水分亏缺0~100 mm。气候—陆面的相互作用控制着作物蒸散和GPP的年际变化,且冬小麦生育期的变化大于夏玉米期的变化。因此,发展区域植被/作物动态—大气互馈作用的模拟系统将有助于预测作物生态系统对气候变化的响应。

参考文献 (References)

- [1] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 1998, 212: 198-212.
- [2] Kustas W P, Norman J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94(1): 13-29.
- [3] Nishida K, Nemani R R, Running S W et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D9): 4270.
- [4] Mu Q, Heinsch F A, Zhao M et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [5] Leuning R, Zhang Y, Rajaud A et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resources Research*, 2008, 44(10): W10419.
- [6] Norman J, Kustas W, Humes K. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(3/4): 263-293.
- [7] Fisher J B, Tu K P, Baldocchi D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 901-919.
- [8] Zhang K, Kimball J S, Nemani R R et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): W09522.
- [9] Wang Chunmei, Wang Pengxin, Zhu Xiangming et al. Estimations of evapotranspiration and surface soil moisture based on remote sensing data and influence factor. *Transactions of CSAE*, 2008, 24(10): 127-133, 313. [王春梅, 王鹏新, 朱向明等. 区域蒸散和表层土壤含水量遥感模拟及影响因子. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 127-133, 313.]
- [10] Zheng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai et al. Applying Landsat data and SEBAL model to inverse regional evapotranspiration and its parameters estimation. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(3): 255-263. [曾丽红, 宋开山, 张柏等. 应用Landsat数据和SEBAL模型反演区域蒸散发及其参数估算. *遥感技术与应用*, 2008, 23(3): 255-263.]
- [11] Li Hongjun, Lei Yuping, Zheng Li et al. SEBAL model and its application in the study of regional evapotranspiration. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(3): 321-325. [李红军, 雷玉平, 郑力等. SEBAL模型及其在区域蒸散研究中的应用. *遥感技术与应用*, 2005, 20(3): 321-325.]
- [12] Zhang Wanchang, Liu Sanchao, Jiang Jianjun et al. GIS-based retrieval of surface flux and evapotranspiration over Heihe River Basin from remote sensing data. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(B10): 138-145. [张万昌, 刘三超, 蒋建军等. 基于GIS技术的黑河流域地表通量及蒸散发遥感反演. *海洋科学进展*, 2004, 22(B10): 138-145.]
- [13] Zhan Zhiming, Feng Zhaodong, Qin Qiming. Study on land surface evapotranspiration based on remote sensing data on Longxi Loess Plateau of China. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(1): 16-19. [詹志明, 冯兆东, 秦其明. 陇西黄土高原陆面蒸散的遥感研究. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(1): 16-19.]
- [14] Zhang Changchun, Wang Guangqian, Wei Jiahua. Study on water requirements in Yellow River Delta based on remote sensing. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 149-152. [张长春, 王光谦, 魏加华. 基于遥感方法的黄河三角洲生态需水量研究. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 149-152.]
- [15] Zhou Jian, Chen Guodong, Li Xin et al. Application of remote sensing technology to estimate river basin

- evapotranspiration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 39(6): 679-687. [周剑, 程国栋, 李新等. 应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发. *水利学报*, 2009, 39(6): 679-687.]
- [16] Xi Ge, Liu Shaomin, Jia Li. Estimation of regional evapotranspiration and ecological water requirement of vegetation by remote sensing in the Yellow River Delta wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5356-5369. [奚歌, 刘绍民, 贾立. 黄河三角洲湿地蒸散量与典型植被的生态需水量. *生态学报*, 2008, 28(11): 5356-5369.]
- [17] Xiong Jun, Wu Bingfang, Yan Nana et al. Research on temporal reconstruction of evapotranspiration by using remote sensing. *Progress in Geography*, 2008, 27(2): 53-59. [熊隽, 吴炳方, 闫娜娜等. 遥感蒸散模型的时间重建方法研究. *地理科学进展*, 2008, 27(2): 53-59.]
- [18] Li Fapeng, Xu Zongxue, Li Jingyu. Characteristics of the spatial and temporal distribution for regional evapotranspiration in the Yellow River Delta based on MODIS data. *Transactions in CSAE*, 2009, (2): 113-122. [李发鹏, 徐宗学, 李景玉. 基于MODIS数据的黄河三角洲区域蒸散发量时空分布特征. *农业工程学报*, 2009, (2): 113-122.]
- [19] Shen Yanjun, Xia Ju, Zhang Yongqiang et al. Dual-source remote sensing model for estimating land surface evapotranspiration and its application in North China Plain. *Advances in Water Sciences*, 2006, 17(3): 371-375. [沈彦俊, 夏军, 张永强等. 陆面蒸散的双源遥感模型及其在华北平原的应用. *水科学进展*, 2006, 17(3): 371-375.]
- [20] Zhang Wanchang, Gao Yongnian. Estimation of regional evapotranspiration using two source energy balance model and ETM+ imagery. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(4): 523-528. [张万昌, 高永年. 区域土壤植被系统蒸散发二源遥感估算. *地理科学*, 2009, 29(4): 523-528.]
- [21] Zhou Chuan, Niu Zheng. Operational retrieving of land surface evapotranspiration based on remote sensing technology. *Transactions of CSAE*, 2009, (7): 124-130. [周川, 牛铮. 基于遥感技术的地表蒸散发业务化反演. *农业工程学报*, 2009, (7): 124-130.]
- [22] Liu Chaoshun, Gao Zhiqiang, Gao Wei. Retrieval evapotranspiration and land surface temperature in response to land use/cover change based on remote sensing data. *Transactions of CSAE*, 2007, 23(8): 1-8. [刘朝顺, 高志强, 高伟. 基于遥感的蒸散发及地表温度对LUCC响应的研究. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 1-8.]
- [23] Tian Hui, Wen Jun, Ma Yaoming et al. Estimation of summer evapotranspiration using satellite remote sensing data over the Heihe river basin. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 18-24. [田辉, 文军, 马耀明等. 夏季黑河流域蒸散发量卫星遥感估算研究. *水科学进展*, 2009, 20(1): 18-24.]
- [24] Wu Bingfang, Xiong Juan, Yan Nana et al. ETWatch for monitoring regional evapotranspiration with remote sensing. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 671-678. [吴炳方, 熊隽, 闫娜娜等. 基于遥感的区域蒸散量监测方法——ETWatch. *水科学进展*, 2008, 19(5): 671-678.]
- [25] Zhang Jie, Pan Xiaoling, Gao Zhiqiang. Estimation of net primary productivity of the oasis-desert ecosystems in arid west China based on RS-based ecological process. *Arid Land Geography*, 2006, 29(2): 255-261. [张杰, 潘晓玲, 高志强. 基于遥感—生态过程的绿洲—荒漠生态系统净初级生产力估算. *干旱区地理*, 2006, 29(2): 255-261.]
- [26] Hou Yingyu, Liu Qinhua, Yan Hao et al. Variation trends of China terrestrial vegetation net primary productivity and its responses to climate factors in 1982-2000. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1546-1553. [侯英雨, 柳钦火, 延昊等. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1546-1553.]
- [27] Yan Huimin, Liu Jiyuan, Cao Mingkui. Spatial pattern and topographic control of China's agricultural productivity variability. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(2): 171-180. [闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用. *地理学报*, 2007, 62(2): 171-180.]
- [28] Li Wei, Zhang Guoming, Li Zhaojun. The spatio-temporal pattern of net primary productivity of terrestrial ecosystem in East Asia region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4173-4183. [李伟, 张国明, 李兆君. 东亚地区陆地生态系统净第一性生产力时空格局. *生态学报*, 2008, 28(9): 4173-4183.]
- [29] Lu Ling, Li Xin, Frank Veroustraete. Terrestrial net primary productivity and its spatial-temporal variability in western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1026-1032, i1005. [卢玲, 李新, Frank Veroustraete. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. *生态学报*, 2005, 25(5): 1026-1032, i1005.]
- [30] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese Terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424. [朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.]
- [31] Choudhury B J, DiGirolamo N E. A biophysical process-based estimate of global land surface evaporation using satellite and ancillary data: I. Model description and comparison with observations. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(3/4): 164-185.
- [32] Li F, Kustas W P, Prueger J H et al. Utility of remote sensing-based two-source energy balance model under low-and high-vegetation cover conditions. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(6): 878-891.
- [33] Wang Ling, Ni Jianhua. Research of actual evapotranspiration in farmland: A case study in Huang-Huai-Hai River region. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(6): 784-794. [王菱, 倪建华. 以黄淮海为例研究农田实际蒸散量. *气象学报*, 2001, 59(6): 784-794.]

- [34] Zhao Jing, Shao Jingli, Cui Yali et al. Estimating regional evapotranspiration in North China Plain with remote sensing method. *Urban Geology*, 2009, 4(1): 42-48. [赵静, 邵景力, 崔亚莉等. 利用遥感方法估算华北平原陆地蒸散量. *城市地质*, 2009, 4(1): 42-48]
- [35] Jiang Jie, Zhang Yongqiang. Soil-water balance and water use efficiency on irrigated farmland in the North China Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 61-65. [姜杰, 张永强. 华北平原灌溉农田的土壤水量平衡和水分利用效率. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 61-65.]
- [36] Mo Xingguo, Liu Suxia, Yu Huning et al. Seasonal variation of energy budget and evapotranspiration partitioning in wheat field. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(6): 536-542. [莫兴国, 刘苏峡, 于沪宁等. 冬小麦能量平衡及蒸散分配的季节变化分析. *地理学报*, 1997, 52(6): 536-542.]
- [37] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D17): 20,069-20,083.

Patterns of Evapotranspiration and GPP and Their Responses to Climate Variations over the North China Plain

MO Xingguo, LIU Suxia, LIN Zhonghui, QIU Jianxiu

(Key Lab. of Water Cycle & Related Land Surface Processes,

Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Insufficient water resources is a major constraint on sustainable development of agriculture and socio-economy, and an imminent threat to national food security. Present situation attached particular importance to assurance of water supply for agriculture and ecology, which was on the basis of effective predication for regional evapotranspiration and water use efficiency (WUE). In this paper, an evapotranspiration and gross primary production (GPP) model based on vegetation index from Terra-MODIS was developed, and evapotranspiration and GPP in the North China Plain (NCP) during the period 2000-2009 were simulated. Results indicated that longitudinal trend was noticeable for both evapotranspiration and GPP distribution, especially in winter wheat growing season. With respect to water balance, it is concluded that regions with higher evapotranspiration than precipitation were mainly distributed to the north of the Yellow River, while the southern NCP showed a rainfall surplus. Affected and regulated by both climatic fluctuation and dynamic response of vegetation, both evapotranspiration and GPP illustrated considerable inter-annual variation. The research results can provide guidance to assessment of water consumption for ecological environment and water use efficacy.

Key words: vegetation index; evapotranspiration; gross primary production; North China Plain; climate