doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.035

耕地利用下挠力河流域水分平衡效应研究

周　浩[1]　金　平[2]　夏卫生[1]　谢炳庚[1]

(1.湖南师范大学资源与环境科学学院,长沙 410081;2.湖北省城市规划设计研究院,武汉 430071)

摘要:为明确我国核心粮食产区的气候湿润状况,以商品粮生产基地挠力河流域为研究区,基于 MODIS 遥感数据和常规气象数据,利用区域遥感蒸散模型反演自 2000 年以来该流域典型时间段的气候水分盈亏状况,揭示该流域耕地利用下的水分平衡效应。结果表明:2000 年以来,挠力河流域耕地内部结构变化剧烈,水田急剧扩张,旱地面积持续下降;该流域逐日潜在蒸散量累加值呈现显著的 S 形曲线特征,且在空间上表现出南部和干流北端偏高的特点;该流域常年处于"负"的气候水分盈亏态势,整体呈现由西向南递减的特点;该流域旱地和水田的气候水分盈亏绝对值逐年下降,水田的气候水分盈亏态势愈加严峻。水分亏缺是挠力河流域气候水分平衡的普遍特征,水田用水问题仍将是挠力河流域乃至三江平原地区农业资源综合利用的焦点。本研究可为区域农业结构调整和农田灌溉措施的制定提供理论支持。

关键词:气候水分平衡;潜在蒸散量;水分盈亏;遥感;耕地利用格局;挠力河流域

中图分类号:S152.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)07-0313-10　　**OSID**:

Cultivated Land Change Induced Water Balance Effect in Naoli River Basin

ZHOU Hao[1]　JIN Ping[2]　XIA Weisheng[1]　XIE Binggeng[1]

(1. *College of Resources and Environment*, *Hunan Normal University*, *Changsha* 410081, *China*
2. *Hubei Institute of Urban Planning and Design*, *Wuhan* 430071, *China*)

Abstract: Climatic tendency of warming and drying had been shown distinctly in the mid-latitude zone of the north hemisphere. It was of a series of impacts on the water resources system, especially in the semi-arid regions. Aiming to reveal the water surplus and loss situation by using the remote sensing method in the Naoli River Basin, and then revealing the water balance effect under the cultivated land use change in the basin. The results showed that since 2000, the internal structure of cultivated land in the Naoli River Basin was changed drastically, the paddy field was expanded rapidly from 2000 to 2015, the dryland continued to decrease. The cumulative value of potential evapotranspiration (ET_0) showed obvious S shaped curve increasing feature. This basin was in a state of climate water deficit for many years, and the water deficit in the mountainous areas of Raohe County in the west and northeast was significantly larger than that in the central and southern regions, for its overall trend was from west to south. Along with the rapid changes in the internal structure of the cultivated land in the basin, the average water deficit in dryland and paddy fields showed gradual decline characteristics. The water shortage in the paddy field became more seriously. The amount of water shortage showed the decreasing characteristics year by year. The future water use problem in paddy fields would be the core issue for the comprehensive utilization of agricultural resources in the basin. The research results can be used as references and consultancies for the cultivated land management in Naoli River Basin and also the Sanjiang Plain.

Key words: climate water balance; potential evapotranspiration; water profit and loss; remote sensing; spatial pattern of cultivated land use; Naoli River Basin

收稿日期:2019-09-07　修回日期:2020-02-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502406)和国家自然科学基金项目(41671520)

作者简介:周浩(1990—),男,讲师,博士,主要从事耕地资源综合利用研究,E-mail:zhouhao7404@163.com

通信作者:谢炳庚(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事土地资源管理研究,E-mail:xbgyb1961@163.com

0 引言

干与湿是气候区划的重要依据,气候干湿状况及其变化对粮食生产、耕地结构布局、排灌措施制定以及水资源开发利用等具有广泛的应用价值和重要意义[1-2],而这种干湿状况对我国北方地区的耕地利用影响尤为显著。三江平原由于其特有的粮食生产地位和湿地生态保育功能,一直是全球气候变化研究的热点区域[3-5]。自 20 世纪 80 年代起,三江平原大力推行“以稻治涝”农业结构调整政策,导致该地区水田急剧扩张[6],严重影响了地表水循环过程。在耕地利用背景下,研究三江平原地区的水分平衡效应具有重要的现实意义[7]。

目前,针对气候干湿的评估,国内外学者进行了许多研究工作,评估指标也很多。一类是反映水分供应状况的降水量指标,如降水距平百分率、Z 指数、标准化降水指数、降水温度均一化指标等[8-11];一类是反映水分供需变化的指标,如综合气象干旱指数(CI)、相对湿润度指数、水分盈亏指数等[12-15]。其中,水分盈亏指数综合考虑了降雨和蒸发的共同作用,且能够反映水量收支,进而了解区域气候水分平衡状况。现有研究的研究对象多为较大面积的流域或地区:高歌等[1]对 1961 年以来我国十大主要流域的年以及季度的水分平衡特征和变化成因进行了探讨;张淑杰等[16]、曾丽红等[17]分别对东北地区过去几十年水分盈亏特征及变化趋势进行了探讨,均得出东北地区水分盈亏量呈逐年下降趋势的结论;张顺谦等[18]利用 53 个农业气象站点数据对四川省主要旱作物的生育期水分盈亏量及其与气候变化的关系进行了研究;姚晓军等[19]对西北地区和史建国等[20]对黄河流域的水分盈亏进行了探讨。对于中等或小尺度的流域或地区,由于其境内气象站点数量较少,水分平衡研究存在数据获取上的困难。三江平原地处黑龙江省东北部的边境地带,境内气象站点较少,尤其对于三江平原腹地,气象资料更为匮乏。遥感及 GIS 信息技术在获取偏僻区域信息及用常规手段难以测量得到的水分条件数据上具有独特的优势,能够弥补传统监测资料匮乏的不足[21],将其与传统模型相结合,仅需提供传统气象资料便可计算蒸散量,无需径流、土壤湿度等资料,参数较少,且计算简单[22]。

挠力河流域位于三江平原腹地,是该地区最大的流域。自 21 世纪以来,随着流域境内“两江一湖”和高标准基本农田土地整治工程的实施,水田化改造仍持续推行。本文在提取耕地信息的基础上,利用区域遥感蒸散模型反演 2000、2005、2010、2015 年该流域的气候水分平衡特征,进一步揭示耕地利用下气候水分平衡效应,明确在天然气候状态下由气候条件所主导的耕地水分平衡规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

挠力河流域总面积为 2.49×10^4 km^2(图 1),地处半干旱地带,属中温带大陆性季风气候区,春季干旱频繁,秋季多洪涝灾害,流域多年平均降雨量 518 mm,降雨分布不均匀,主要集中于 6—9 月。该流域呈现西南高、东北低的态势,水系自西南流向东北。地貌类型主要是山地和平原,其中山地占流域面积的 38.3%,主要分布于流域西南部和南部,平原占 61.7%,主要分布于流域北部和中部的内、外七星河及挠力河中游地区。自 1980 年我国进入经济迅速发展期后,流域当地出现了大量的湿地开垦为耕地、水利工程修建和农业结构调整等现象,导致该地区湿地大面积丧失、结构破坏和功能退化[7],水稻面积和结构比率持续上升[23],对水分供需情势造成了强烈影响。

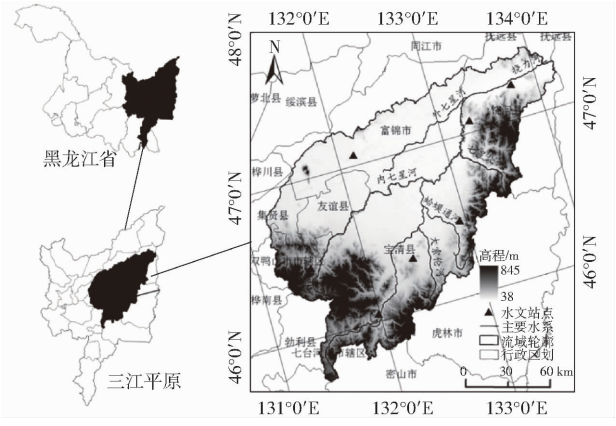


图 1 挠力河流域地理位置示意图

Fig. 1 Location of Naoli River Basin

1.2 数据来源

1.2.1 MODIS 数据

主要采用 MODIS 陆地标准 3 级 Albedo 产品(MCD43B3,1 d)、LST 和 Emis 产品(MOD11A2,1 d)、LAI 产品(MCD15A2,8 d),对数据进行拼接、投影与数据格式转换、裁剪等处理,由于 MODIS 数据在空间上可能存在缺值现象,且不同数据的时间分辨率不一致,需进行空间范围缺值插补和时间序列缺值插补等处理以保证空间分辨率和时间分辨率的一致性,本文采用文献[22]的方法进行数据的空间以及时间插补处理,最终得到时间分辨率 1 d 和空间分辨率 1 km 的反演信息源数据(数据时间点为 2000、2005、2010、2015 年)。

1.2.2 气象站点数据

地面基准气象站点数据来自中国气象数据中心的“中国地面气象资料日值数据集 V3.0”，该数据集经过质量控制，要素数据的质量及完整性相对于以往发布的地面同类数据产品明显提高。由于挠力河流域境内气象站点较少，同时选择域外的富锦气象站和虎林气象站加以辅助，进行降雨和温度数据的插值处理，然后基于 Python 语言编程批处理实现对 2000、2005、2010、2015 年降雨和温度数据的逐日空间插值。

1.2.3 耕地利用数据

挠力河流域多期土地利用/覆被遥感数据源来自美国陆地资源卫星 Landsat TM/OLI 多光谱遥感影像，数据获取自美国地质勘探局（USGS）（http://earthexplorer.usgs.gov/），过程中涉及选用不同的 Landsat 卫星数字产品，辅以中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）的“2010 年中国土地利用现状遥感监测数据”（数据比例尺 1∶100 000，数据精度良好），以 Google Earth 数据为辅助数据源，影像数据在经过大气校正、几何纠正、图像增强等预处理的基础上，进行 543 波段的标准假彩色融合以便区分旱地和水田，采取人机交互式目视解译方法完成耕地信息识别，地类编码和判读与中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）的“中国土地利用现状遥感监测数据”相同。对于历史期（2000、2005、2010 年）耕地利用数据的解译精度验证，通过 Google Earth 软件布控数据的采样网格验证点，最终实现耕地数据的精度验证（解译准确率均大于 85%），而对于 2015 年的耕地利用数据，通过对流域进行实地 GPS 信息样点的比对验证和记录（考察时间为 2016 年 9 月 26—30 日），结合后期的室内数据纠正，完成 2015 年耕地解译数据的精度验证（解译准确率 89.20%）。

1.3 研究方法

Priestley－Taylor 公式物理概念明确[24]，算法简单，选用该公式作为瞬时潜在蒸散遥感反演的基础机制，通过 MODIS 数据模拟卫星过境时刻瞬时潜在蒸散量，并进行瞬时至逐日潜在蒸散量的尺度处理，以实现气候水分平衡研究。

1.3.1 逐日潜在蒸散量遥感估算

（1）瞬时潜在蒸散量

Priestley－Taylor 公式在蒸发达到平衡（即当下垫面与下垫面上方空气的相对湿度相等时的蒸发）的基础上，引入 α 常数，推导出无平流条件下潜在蒸散量的计算方法，公式为

$$ET_0 = \alpha \frac{R_n - G}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \tag{1}$$

式中　ET_0——潜在蒸散量，mm

α——Priestley－Taylor 系数

R_n——地表净辐射量，W/m^2

G——土壤热通量，W/m^2

λ——汽化潜热，MJ/kg

Δ——饱和水汽压-温度曲线斜率，kPa/K

γ——干湿表常数，kPa/K

斜率 Δ 可通过饱和水汽压与大气温度 T_a（K）关系的经验公式计算得到，干湿表常数 γ 可由空气定压比热容、大气压（海拔 H 推算）等计算得到；净辐射通量 R_n 同样采用能量平衡法，基于 MODIS 估算卫星过境时刻估算得到[25]，估算过程将涉及到大气温度 T_a 和 Emis 地表发射率的遥感信息数据（波段 31 和波段 32 的数据），具体参数计算过程见文献[22]，最终得到卫星过境时的瞬时潜在蒸散量。

（2）瞬时潜在蒸散量的逐日尺度转换

由 Priestley－Taylor 公式计算得到的卫星过境时刻的瞬时潜在蒸散量，需要通过尺度转换才能得到逐日潜在蒸散量。由于净辐射 R_n 在一天中呈正弦曲线变化，决定了潜在蒸散量变化也具有正弦变化特征。因此可以采用正弦曲线拟合的方法来实现瞬时潜在蒸散量向逐日潜在蒸散量的转换。一般而言，日出后 1 h 和日出前 1 h 左右的蒸发速率可以认定为 0，而在日变化过程中潜在蒸散量将呈现出正弦曲线的变化趋势，最大潜在蒸散量一半出现在当地的正午时间，通过该最大值可计算出正弦曲线上任何时点的潜在蒸散量（图 2），公式为

$$ET_0(t) = ET_{0_max} \sin \frac{t - (t_{rise} + 1)}{t_{set} - t_{rise} - 2} \pi \tag{2}$$

其中

$$ET_{0_max} = \frac{ET_{0_IN}}{\sin \frac{t_{pase} - (t_{rise} + 1)}{t_{set} - t_{rise} - 2}} \tag{3}$$

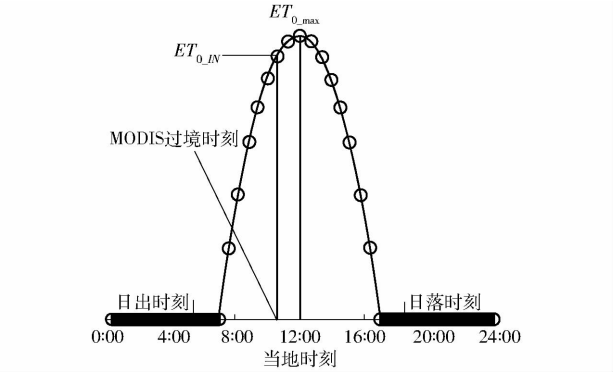


图 2　潜在蒸散量日变化曲线示意图

Fig. 2　Schematic of diurnal variation of ET_0

式中 ET_{0_max}——日最大潜在蒸散量，一般在正午时刻达到

t——模拟时刻

t_{set}、t_{rise}——日落时间和日出时间，对应当地净辐射值变为负和变为正的时间，可通过纬度和日期计算得到

ET_{0_IN}——卫星过境时刻的瞬时潜在蒸散量，mm

t_{pase}——卫星过境时刻的当地时间

日潜在蒸散量总量为

$$ET_0 = \int_{t_{rise}}^{t_{set}} ET_0(t)\,\mathrm{d}t = \int_{t_{rise}}^{t_{set}} ET_{0_max}\sin\frac{t-(t_{rise}+1)}{t_{set}-t_{rise}-2}\pi\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

1.3.2 气候水分平衡

通过气候水分盈亏量（即降雨量与潜在蒸散量的差值）来表征气候水分平衡的一般状态，其目的在于明确没有人为影响的天然状态下由气候条件所主导的水分盈亏情况，可以从整体上反映区域的干、湿状况。当水分盈亏量大于 0 时，水分有盈余，表示气候湿润；当其小于 0 时，水分处于亏缺状态，表示气候干燥；当其等于 0 时，表示水分收支平衡。量值大小反映水分盈亏程度及气候的干湿程度[26]。

2 结果与分析

2.1 耕地变化特征分析

2000 年，挠力河流域耕地总面积 14 338.61 km^2，占流域面积的 60.57%，其中富锦市和宝清县是该流域耕地分布的主要市县，占流域耕地总面积的 68.77%。2015 年流域的耕地面积比例缓慢升至 62.70%，15 年间仅增加 2.13 个百分点，同时富锦市和宝清县的耕地面积比例升至 69.28%，二者为流域耕地扩张的主要核心地区（图 3）。但随着“两江一湖”改造和“高标准基本农田建设”等农田工程措施的陆续实施，农业结构改造仍大力推行，同时水田和旱地存在明显的利益剪刀差，受粮食的经济效

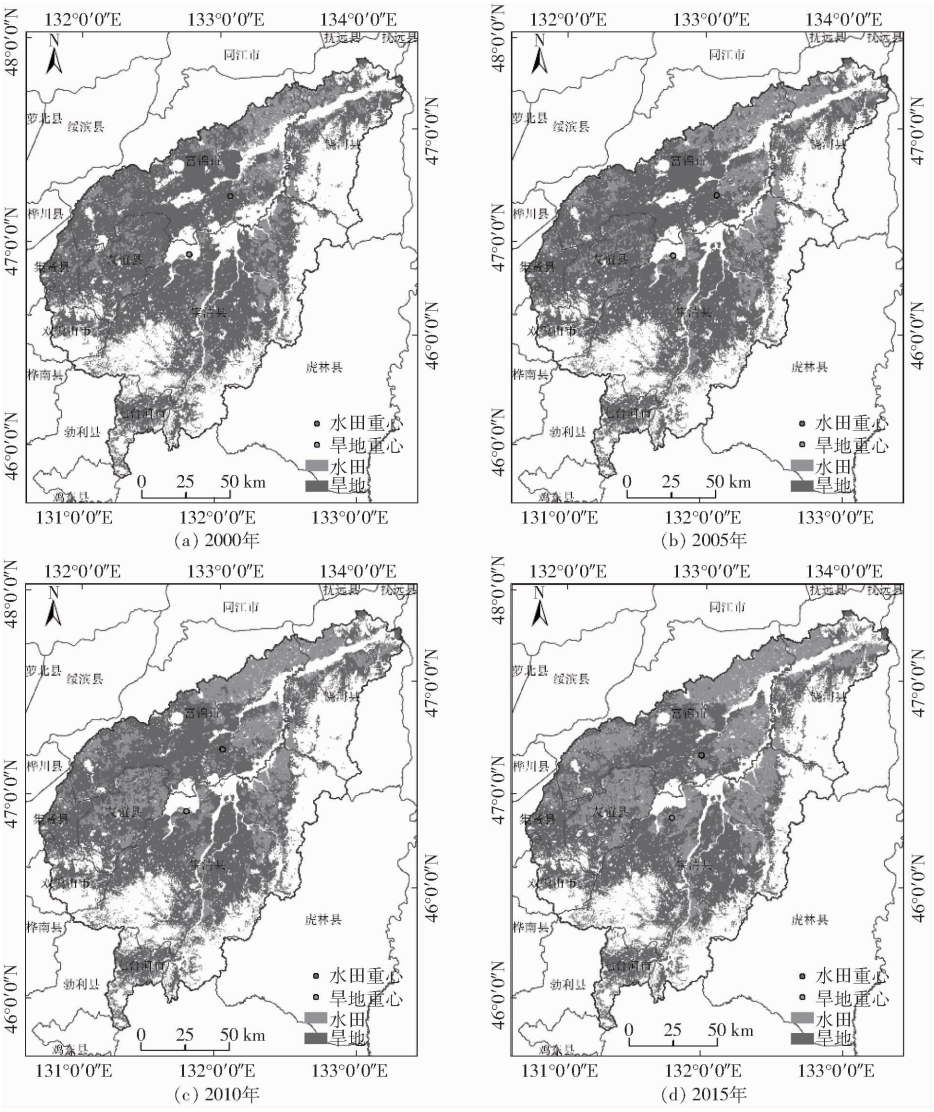


图 3 挠力河流域 4 期耕地分布图

Fig. 3 Cultivated land distribution maps in 2000, 2005, 2010 and 2015

益驱动作用，流域内大量农户实施“旱改水”农业结构调整。尽管 2000 年以来挠力河流域耕地整体扩张较为缓慢，但该流域旱地和水田之间存在明显的“此消彼长”关系，“水田化”（旱地和非耕地转变为水田）现象是最重要的土地利用变化景观类型，具体表现为：研究期内该流域旱地面积持续下降，由 2000 年的 11 916.13 km^2 降至 2015 年的 9 311.47 km^2，面积比例由 50.34% 减为 39.28%，旱地缩减幅度非常明显。与之对应的是水田面积的快速增加，2000 年，挠力河流域水田仅占流域面积的 10.23%，2015 年面积比例上升至 23.39%，变为 5 534.35 km^2。水田占耕地的比例由 2000 年的 16.89% 变为 37.28%，开始进入水田化中期阶段（30% ~ 70%）[6]。2000—2005 年和 2005—2010 年的水田占耕地的比例分别增长 4.32、5.50 个百分点，而在 2010—2015 年间增加了 10.57 个百分点。挠力河流域水田化进程的迅速推进，势必导致流域对水资源的需求压力越来越大。

在空间重心上，挠力河流域的水田重心均位于富锦市境内，且呈现向西南方向缓慢移动的特点，由 2000 年的（132.31° E，46.72° N）（图 3a）移至 2015 年的（132.61° E，46.93° N）（图 3d）。挠力河流域是三江平原境内土地利用开发历史最早、耕地利用与管理手段最为成熟的地区，特别是自 2000 年以来该地区陆续建立多个国家级湿地自然保护区，土地利用结构相对稳定，差别于三江平原其他地区的土地利用特点。挠力河流域的水田整体偏移特征恰好与三江平原水田“北移东扩”的整体特征相反，因此未来需根据三江平原的地区差异性特点制定差别化的耕地管理策略，对于三江平原北部仍处于扩张状态的水田，应尽量优化其水资源供给条件，而水田发展成熟的挠力河流域应在保证其粮食可持续生产的前提下，关注水田开发利用中生态及水资源开发问题。

2.2　潜在蒸散量变化特征

2.2.1　数值变化特征

统计结果显示（图 4），伴随着气候的“暖湿化”变化特点，该流域潜在蒸散量呈现逐年上升的态势，其中 2000、2005、2010、2015 年的潜在蒸散量依次为 910.25、936.84、937.23、964.04 mm。

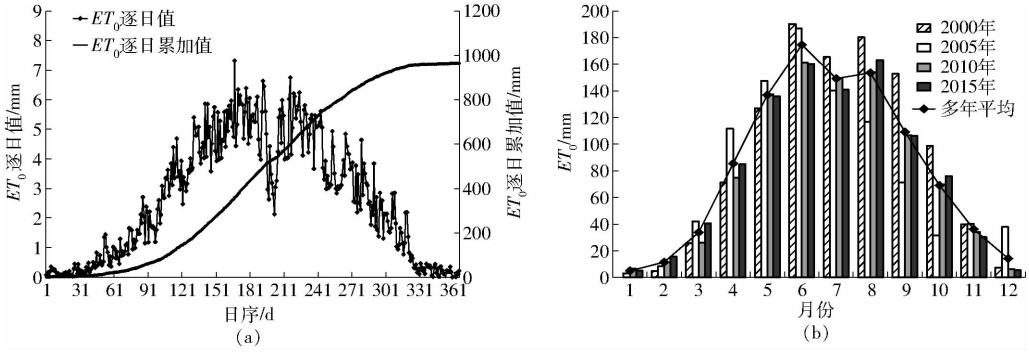


图 4　挠力河流域潜在蒸散量（ET_0）变化特征

Fig. 4　Variation characteristics of ET_0 in Naoli River Basin

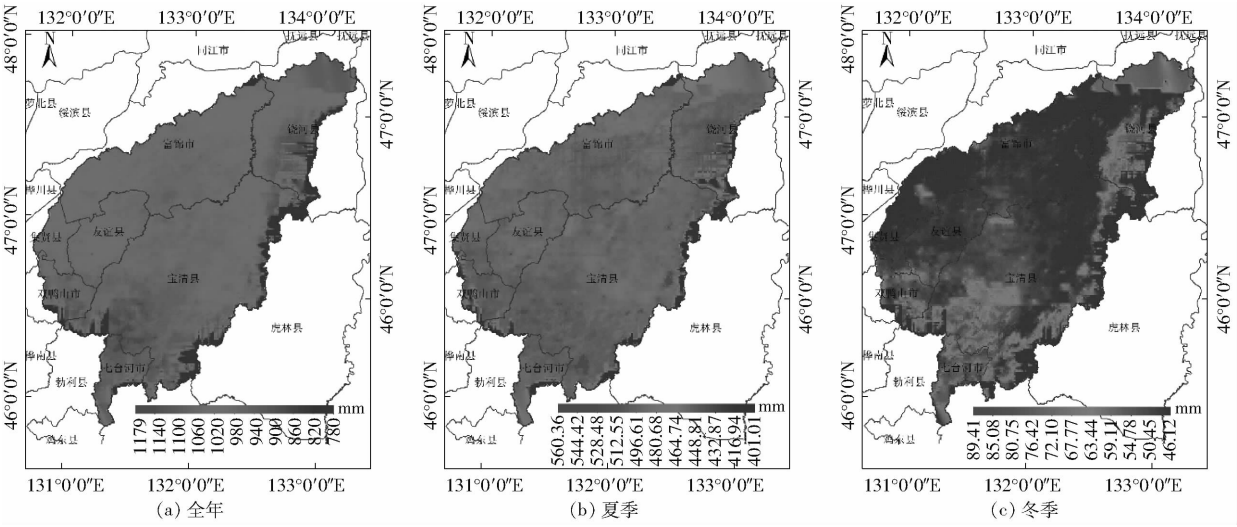
挠力河流域年内潜在蒸散量呈现出明显的阶段性变化特征。以 2005 年的逐日潜在蒸散分析为例（图 4a），其累加值呈现出较为明显的 S 形曲线特征，以 4 月 9 日（第 100 日序）和 9 月 24 日（第 268 日序）突变节点可以将其划分为 3 阶段：①受温度、日照时长等气候要素影响，1 月 1 日—4 月 8 日，逐日潜在蒸散量整体上以 0.30 mm/（10 d）的速率逐日波动式增加，该时间段的累加曲线极其平缓。②随着流域温度逐渐回暖，地面积雪大量融化，潜在蒸散量增加极为迅速，至 6 月 22 日（第 174 日序）达到全年的峰值，为 6.65 mm。尽管之后潜在蒸散量维持较高水平，但已开始进入衰减期。③9 月底以后，挠力河流域呈现降雨显著减少和温度持续下降的特点，地表蒸发能力减弱，潜在蒸散量以 0.16 mm/（10 d）的速率下降，并再次形成增长舒缓的逐日累加曲线。

对于逐月蒸散量，挠力河流域的高蒸散时段主要集中于 5—8 月，共占全年潜在蒸散量的 62.83%（图 4b）。潜在蒸散量主要由温度、日照时长、降雨量等气象要素的综合作用影响，6 月温度未达到年峰值，其潜在蒸散量为 12 个月中最大（174.66 mm），表明温度非该月份潜在蒸散量的关键影响因子。尽管 5 月挠力河流域尚未进入雨季，但其空气相对湿度较低，加之显著的地表温度上升的态势，造成了较为强烈的蒸散作用。对于 1、2、12 月冬季而言，温度较低、日照时长较短且降雨量较少，使得该流域的潜在蒸散量显著偏低。

2.2.2　空间分布特征

空间分布上（图 5），挠力河流域年潜在蒸散量处于 780 ~ 1 179 mm 间，均值为 910.25 mm，流域东

部及南部多山,海拔较高,潜在蒸散量显著偏低,而位于挠力河上游的宝清县相对湿度较低,加之受纬度的影响,导致潜在蒸散量偏高;分别选取冬季(12、1、2 月)和夏季(6、7、8 月)进行潜在蒸散量的空间分布差异特征分析,冬季和夏季的潜在蒸散程度在整体水平以及空间分布上存在显著差异。冬季潜在蒸散量均低于 89.41 mm,平均水平不足全年的 1/10,相对高值区零散分布于流域的宝清县南部山区、东部饶河县境内山区以及北部平原地带。夏季大气相对湿度大且温度较高,该季节潜在蒸散量范围处于 401.01 ~ 560.36 mm 之间,占到全年总值的 1/2 以上,与冬季相比,夏季的潜在蒸散高值区分布更为广泛。



(a) 全年 (b) 夏季 (c) 冬季

图 5 挠力河流域潜在蒸散量的季节性分布

Fig. 5 Seasonal distributions of ET_0 in Naoli River Basin

2.3 气候水分盈亏特征

挠力河流域常年处于气候水分亏缺的状态,且整体上西部的亏缺程度显著大于中部和南部地区,气候水分盈亏量呈现由西向南递减的特征(图 6)。降雨量与潜在蒸散量之间的差值即为气候盈亏量,由于挠力河流域为中小尺度流域,境内不同地区年均降雨量差别不大,一般在 480 mm 以下,多年气候水分平衡的空间分布差异主要由 ET_0 的空间差异所导致。整体而言,富锦市西南部、集贤县西部、友谊县西部、宝清县和七台河市交界处以及饶河县部分地区的气候水分盈亏量偏大,一般在 -630 mm 以上。气候水分盈亏量较少的地区一般分布在流域的挠力河干流右岸和南部山区地带,但基本保持在 -600 mm 的水平。对于年际差异而言,整体上各年份间气候水分盈亏差异较小,空间上表现出显著的分布差异性特征:2000 年,挠力河流域气候水分盈亏量的高值区分布更为广泛,流域的西部地区(包括友谊县西南部、富锦市西南部、集贤县东部和双鸭山市辖区)的盈亏量显著高于东南部的宝清县地区。至 2005 年,高值区在 2000 年的空间分布基础上显著收缩,流域中部地区的气候水分盈亏量呈现下降的态势,宝清县境内大部分地区、富锦市东北部和饶河县境内的盈亏量偏低。2010 年,宝清县西南部和饶河县的山地丘陵区为流域气候水分盈亏的高值集中区域,同时西部地区盈亏量也偏高,流域中部的内、外七星河腹地和北部的富锦市地区的气候水分盈亏量维持在 -580 mm 左右。2015 年气候水分盈亏特征与 2010 年基本保持一致,西部地区整体上维持着较高的水平,宝清县的西南部山区也表现出较高的水分盈亏水平。

对于季节性气候水分盈亏而言,冬季和夏季的盈亏量不但存在较大的区别,而且其值相对空间分布也存在较大的差异,夏季的气候水分盈亏量相对高值区为冬季的低值区(图 7),对于冬季而言,尽管流域整体蒸散水平偏低,但季节性降雨量极少,使得流域冬季的气候水分盈亏量也偏低,处于 -66.26 ~ -23.07 mm 范围内,约占全年盈亏总量的 1/20。降雨量空间插值结果显示,宝清县中部和南部地区降雨量相对偏低,与之对应的是该地区潜在蒸散量偏高,导致气候水分盈亏量较大,而挠力河干流以及内、外七星河沿岸地区的常年气候水分盈亏量平均值仅为 -25 mm;对于夏季而言,流域气候水分盈亏量呈现由西向东逐渐递减的特点,高值区多位于富锦、友谊和集贤地区(盈亏量达到 -270 mm 左右),该地区是粮食生产的核心区域。宝清县中部平原以及南部山区地带气候水分盈亏水平整体偏低,约为 -205 mm,流域北部的入乌苏里江口周边地区整体水分盈亏值也相对较低,约为 -200 mm。

2.4 耕地利用下的气候水分平衡效应

近年来,挠力河流域整体表现出“暖湿化”的气

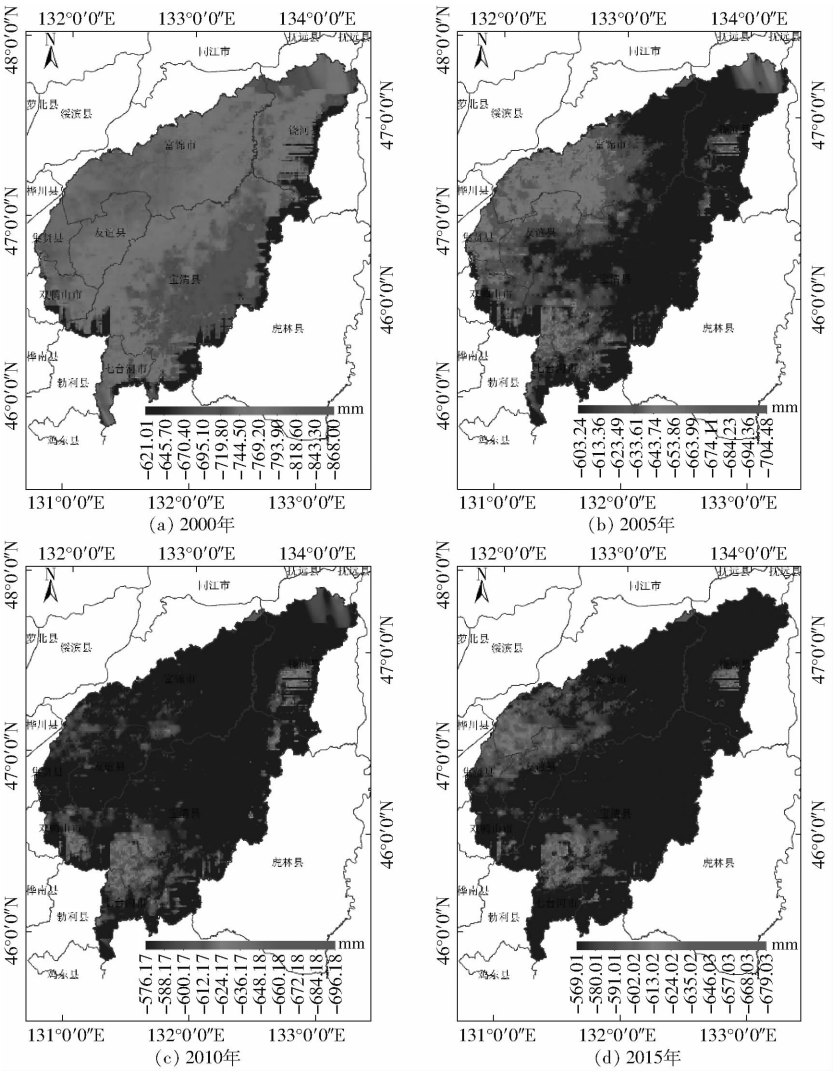


图 6　挠力河流域年际气候水分盈亏量的空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of annual climatic water deficit in Naoli River Basin

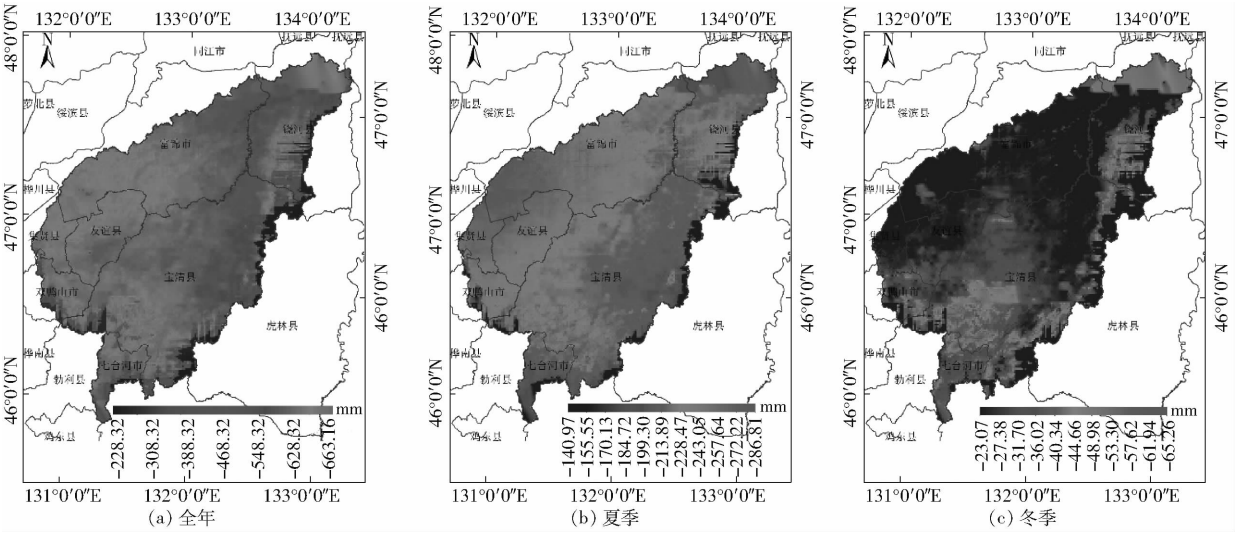


图 7　挠力河流域季节性气候水分盈亏量

Fig. 7　Seasonal climate water balance in Naoli River Basin

候变化特征，在自然气候要素变化条件下，挠力河流域初始层次的气候水分盈亏态势向良性发展。2000—2015 年间，挠力河流域旱地和水田的平均气候水分盈亏量均为负值，且其绝对值表现出逐渐下降的特征，在水田急剧扩张、旱地面积持续下降的土地利用变化背景下，挠力河流域的气候水分盈亏态

势趋好;2000 年,挠力河流域水田的平均气候水分盈亏量达到 -649.63 mm,至 2015 年,流域水田的水分盈亏绝对值降低了 75.60 mm,变为 -574.03 mm,下降幅度达到 11.64%。旱地的平均气候水分盈亏量则由 2000 年的 -659.57 mm 变为 2015 年的 -573.71 mm。

对挠力河流域耕地气候水分盈亏量进行统计(表 1),结果显示,15 年间耕地气候水分盈亏绝对值持续下降,2000 年为 -9.42×10^9 m^3,至 2005 年,盈亏量绝对值下降了 3.80×10^8 m^3,变为 -9.04×10^9 m^3,而至 2010 年则变为 -8.54×10^9 m^3,2010—2015 年间,耕地气候水分盈亏总量绝对值缓慢下降,5 年间下降了 3.00×10^7 m^3;对于水田而言,15 年间流域气候水分盈亏情势愈来愈严重,2000 年总盈亏量达到 -1.57×10^9 m^3,且增长速度越来越快,2005 年气候水分盈亏总值达到 -1.90×10^9 m^3,期间绝对值共增加了 3.30×10^8 m^3,至 2010 年则变为 -2.28×10^9 m^3。至 2015 年,由于期间内水田面积扩张极其强烈,其对应的气候水分盈亏态势迅速恶化,2015 年流域盈亏量达 -3.18×10^9 m^3,相对于 2010 年而言,5 年间绝对值增长幅度达到 39.35%;与水田不同的是,15 年间旱地的气候水分盈亏量的绝对值逐年下降,2000 年盈亏量达到最高的 -7.85×10^9 m^3,随后持续下降,至 2015 年绝对值下降了 2.52×10^9 m^3,变为 -5.33×10^9 m^3,15 年下降幅度达到 2.52×10^9 m^3。

表 1 挠力河流域 2000、2005、2010、2015 年耕地气候水分盈亏量

Tab.1 Statistics of farmland water shortage in Naoli River Basin in 2000, 2005, 2010 and 2015 m^3

耕地类型	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
水田	-1.57×10^9	-1.90×10^9	-2.28×10^9	-3.18×10^9
旱地	-7.85×10^9	-7.14×10^9	-6.26×10^9	-5.33×10^9
耕地	-9.42×10^9	-9.04×10^9	-8.54×10^9	-8.51×10^9

由上文分析可知(表 1),2000—2015 年间,挠力河流域耕地格局整体表现出耕地面积缓慢增长而水田面积急剧扩张的特点,与之对应的是旱地面积的缓慢减少。在气候水分平衡上,耕地格局的变化使得水田的气候水分盈亏量占耕地总盈亏量的比例持续增加,2000 年水田气候水分盈亏量仅占耕地总盈亏量的 16.70%,随着水田化比例的持续提升,2005 年水田气候水分盈亏量相对比例增至 21.10%,2010 年则变为 26.70%,2010—2015 年间,挠力河流域水田扩张尤其剧烈,使得该时间段内水田气候水分盈亏量占耕地气候水分盈亏量的比例上升极其剧烈,增长了 10.64 个百分点,变为 37.34%。水田的扩张对挠力河流域的气候水分平衡影响强烈。

在季节性气候水分盈亏特征上,以 2015 年为例,挠力河流域夏季水田的平均气候水分盈亏量为 -232.40 mm,而旱地的气候水分盈亏量接近于水田,为 -230.47 mm。对于冬季而言,水田的平均气候水分盈亏量的绝对值小于旱地,为 -26.46 mm(旱地为 -28.80 mm);在整体的气候水分平衡上,旱地是挠力河流域面积最大的耕地子类型,2015 年夏季其盈亏量达到 -2.14×10^9 m^3,水田约为 -1.29×10^9 m^3,对于冬季而言,由于地表蒸散能力较弱,旱地的盈亏量达到 -2.68×10^8 m^3,显著高于水田的 -1.46×10^8 m^3。

3 讨论

气候水分平衡表征气候条件的湿润程度,是区域水土资源平衡的初始层次。通过对挠力河流域耕地利用下的气候水分平衡效应研究,揭示该流域耕地利用过程中的初始水分条件状况,为认识挠力河流域的水土资源状况提供基础性认识。尽管该流域耕地主要采取地下水灌溉模式,但天然降水仍然是半封闭式流域唯一的供水“本源”,从长期来看,基于有效降水量与蒸散量来分析水分平衡特征,仍具有较强的实践指导价值和理论意义。挠力河常年处于气候水分亏缺的状态,单纯地利用自然降雨将难以保证该流域的粮食正常生产。从水分盈亏的平均水平上看,初始层次的水分亏缺态势向良性发展,整体盈亏结论与张淑杰等[16]和曾丽红等[17]针对东北地区的研究结论基本一致。然而随着该流域水田的持续增加,使得挠力河流域的气候缺水值也会同步增加,水田的用水灌溉管理将是未来挠力河流域乃至三江平原地区农业资源综合利用的核心问题。

基于遥感(MODIS)和常规气象数据,对逐日潜在蒸散量遥感估算,以获取年际和季节性的潜在蒸散量,进而开展耕地利用格局下气候水分平衡研究,丰富了缺资料流域的水分条件及水资源过程模拟研究。然而,由于 MODIS 系列数据起始于 1999 年 12 月,对于更长时间序列的潜在蒸散遥感估算将难以实现,后续需综合考虑其他遥感信息源数据(如 Landsat 数据)的蒸散反演应用。

本文揭示了耕地利用格局与气候湿润状况的相互匹配程度,其研究实质为水土资源平衡的初始层次,更具理论意义。然而对于耕地实际灌溉策略的制定,还需考虑人类活动的影响,研究人为作用下可供水量与需水量之间的平衡问题,即农田土壤水分平衡。

4　结论

（1）自 2000 年以来，挠力河流域耕地利用变化主要体现在内部结构变化上，即耕地面积缓慢上升，但旱地面积持续下降，而水田面积迅速增加，水田面积比例已由 2000 年的 10.23% 增至 2015 年的 23.39%。

（2）该流域逐日潜在蒸散量累加值呈现出明显的 S 形曲线特征，高蒸散时段主要集中于 5—8 月，其中夏季潜在蒸散量占全年的 1/2 以上，而冬季则不足全年的 1/10，在空间上，宝清县南部蒸散能力明显偏高。

（3）该流域常年处于气候水分亏缺状态，水分盈亏量绝对值呈现由西向南不断递减的趋势。饶河县气候水分盈亏量偏大（约为 -630 mm），而水分盈亏量偏小的地区多分布于挠力河干流右岸和南部山区地带；气候水分盈亏的年际差异较小，在季节性特征上，夏季的气候水分盈亏量相对高值区为冬季的低值区。

（4）研究期内，该流域水田的气候水分盈亏态势逐渐恶化，由 2000 年的 -1.57×10^9 m^3 变为 2015 年的 -3.18×10^9 m^3，旱地气候水分盈亏量绝对值逐年下降，由 2000 年的 -7.85×10^9 m^3 变为 2015 年的 -5.33×10^9 m^3，耕地格局的变化使水田气候水分盈亏量占耕地总盈亏量的比例持续增加。

参　考　文　献

[1] 高歌，许崇育. 1961—2010 年中国十大流域水分盈亏量时空变化特征[J]. 地理学报，2015,70(3):380 - 391.
GAO Ge, XU Chongyu. Characteristics of water surplus and deficit change in 10 major river basins in China during 1961—2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(3):380 - 391. (in Chinese)

[2] HAN L, ZHANG Q, MA P, et al. The spatial distribution characteristics of a comprehensive drought risk index in Southwestern China and underlying causes[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3 - 4):517 - 528.

[3] 吴海燕，孙甜田，范作伟，等. 东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应[J]. 农业资源与环境学报，2014, 31(4):299 - 307.
WU Haiyan, SUN Tiantian, FAN Zuowei, et al. The major food crops in response to climate change and its yield effect in Northeast of China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(4):299 - 307. (in Chinese)

[4] NEWMAN M E, MCLAREN K P, WILSON B S. Long-term socio-economic and spatial pattern drivers of land cover change in a Caribbean tropical moist forest, the Cockpit Country, Jamaica[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 186: 185 - 200.

[5] LIU J, ZHANG Z, XU X, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(4):483 - 494.

[6] 杜国明，李昀，于凤荣，等. 基于遥感的 2000—2009 年三江平原北部耕地变化特征分析[J]. 农业工程学报，2012, 28(1): 225 - 229.
DU Guoming, LI Yun, YU Fengrong, et al. Change characteristics analysis of farmland in Northern Sanjiang Plain in 2000—2009 based on remote sensing[J]. Transactions of the CASE, 2012, 28(1): 225 - 229. (in Chinese)

[7] 周浩，雷国平，张博，等. 1990—2013 年挠力河流域耕地变化下水土资源平衡效应分析[J]，农业工程学报，2015,31(1): 272 - 280.
ZHOU Hao, LEI Guoping, ZHANG Bo, et al. Farmland change induced land and water resource balance in Naoli River Basin from 1990 to 2013[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(1):272 - 280. (in Chinese)

[8] 陆渝蓉，高国栋，李怀瑾. 关于我国干湿状况的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版)，1979, 15(1): 125 - 138.
LU Yurong, GAO Guodong, LI Huaijin. Study on the dry and wet condition of China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1979, 15(1): 125 - 138. (in Chinese)

[9] 胡实，莫兴国，林忠辉. 冬小麦种植区域的可能变化对黄淮海地区农业水资源盈亏的影响[J]. 地理研究，2017,36(5): 861 - 871.
HU Shi, MO Xingguo, LIN Zhonghui. Impacts of possibility planting region change for winter wheat on agricultural water surplus and deficit in Huang - Huai - Hai Region[J]. Geographical Research, 2017, 36(5):861 - 871. (in Chinese)

[10] DAI A, TRENBERTH K E, KARL T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900—1995[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(17):3367 - 3370.

[11] PALMER W C. Meteorological drought[R]. Washington, DC:US Department of Commerce Weather Bureau, 1965.

[12] 赵俊芳，郭建平，徐精文，等. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势[J]. 农业工程学报，2010, 26(8): 18 - 24.
ZHAO Junfang, GUO Jianping, XU Jingwen, et al. Trends of Chinese dry-wet condition based on wetness index[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 18 - 24. (in Chinese)

[13] 贾艳青，张勃. 1960—2016 年中国北方地区极端干湿事件演变特征[J]. 自然资源学报，2019, 34(7): 1543 - 1554.
JIA Yanqing, ZHANG Bo. Spatio-temporal changes of the extreme drought and wet events in Northern China from 1960 to 2016 [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1543 - 1554. (in Chinese)

[14] 孙力，沈柏竹，安刚. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析[J]. 应用气象学报，2003, 14(5): 542 - 552.

SUN Li, SHEN Baizhu, AN Gang. A study of the variation and tendency of surface dry-and-wet state of northeast area in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 542 - 552. (in Chinese)

[15] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993: 179 - 183.

[16] 张淑杰, 张玉书, 蔡福,等. 1961 年至 2007 年东北地区水分盈亏变化趋势及其影响与响应[J]. 资源科学, 2010, 32(4):663 - 670.
ZHANG Shujie, ZHANG Yushu, CAI Fu, et al. Changes of water budget and their effects and responses in Northeastern China from 1961 to 2007[J]. Resources Science, 2010, 32(4): 663 - 670. (in Chinese)

[17] 曾丽红, 宋开山, 张柏. 1951—2008 年东北地区水分盈亏量时空格局[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 858 - 870.
ZENG Lihong, SONG Kaishan, ZHANG Bai. Spatial and temporal structure of water deficit over Northeast China during the period of 1951—2008[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 858 - 870. (in Chinese)

[18] 张顺谦,邓彪,杨云洁. 四川旱地作物水分盈亏变化及其与气候变化的关系[J]. 农业工程学报,2012,28(10):105 - 111.
ZHANG Shunqian, DENG Biao, YANG Yunjie. Change of water budget for dryland crops and its response to climate change in Sichuan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 105 - 111. (in Chinese)

[19] 姚晓军, 张晓, 孙美平,等. 1960—2010 年中国西北地区水分盈亏量时空特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 607 - 616.
YAO Xiaojun, ZHANG Xiao, SUN Meiping, et al. Spatial-temporal characteristics of water deficit in Northwest China from 1960 to 2010[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 607 - 616. (in Chinese)

[20] 史建国, 严昌荣, 何文清,等. 黄河流域水分亏缺时空格局变化研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 113 - 119.
SHI Jianguo, YAN Changrong, HE Wenqing, et al. Study on spatial and temporal variation of water surplus and deficiency in Yellow River basin[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(1): 113 - 119. (in Chinese)

[21] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4):341 - 348.
WU Xianfeng, LIU Changming. Progress in watershed hydrological models[J]. Progress in Geography, 2002, 21(4):341 - 348. (in Chinese)

[22] 杨胜天, 赵长森. 遥感水文[M]. 北京:科学出版社, 2015.

[23] 周浩,雷国平,杨雪昕,等. RCPs 气候情景下三江平原典型流域耕地动态模拟[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10): 121 - 133.
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin, et al. Simulation of cultivated land under RCPs scenarios in typical basin of Sanjiang Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 121 - 133. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171015&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.015. (in Chinese)

[24] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81 - 92.

[25] LIANG S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2):213 - 238.

[26] 魏新光,王铁良,李波,等. 辽宁省玉米地水分盈亏时空分布特征及灌溉模式分区研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23):119 - 126.
WEI Xinguang, WANG Tieliang, LI Bo, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of maize water surplus deficit and irrigation mode partition in Liaoning Province[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(23): 119 - 126. (in Chinese)