

基于 SEBS 模型估算辽西北地区蒸散发及时空特征

王蕊¹, 张继权¹, 曹永强², 郭恩亮¹, 李丹君¹, 马齐云¹

(1. 东北师范大学 环境学院自然灾害研究所, 长春 130117; 2. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 蒸散发是陆面过程中的重要环节, 联系着陆面水循环和地表能量平衡。采用 MODIS 数据, 逐月选取 2013 年 12 期遥感数据, 并分季度求其平均值作为四季代表, 结合 SEBS 模型, 对辽西北地区地表蒸发蒸腾量进行了估算, 并为了验证遥感反演精度, 提取不同土地利用类型的蒸散发量。同时, 利用 Penman-Monteith 公式计算辽西北地区近 50 年潜在蒸散发值, 通过一元线性趋势分析法、小波分析法、IDW 反距离加权法和 R/S 分析法分析其时空分布特征。结果表明: 辽西北地区 2013 年蒸散发量夏季>春季>秋季>冬季; 近 50 年来潜在蒸散发值由高到低依次为夏季、春季、秋季和冬季, 且具有明显的区域性。同时, 经验证, 遥感手段反演蒸散发值误差约为 7.5%, 表明该方法在研究区应用合理可行。研究结果可为辽西北地区水资源分配和管理提供科学参考。

关键词: 蒸散发; 遥感估算; SEBS 模型; 辽西北地区

中图分类号: P426.2; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0382-06

Estimation of Evapotranspiration and Analysis of Temporal-Space Characteristic in Northwest of Liaoning Province Based on SEBS Model

WANG Rui¹, ZHANG Jiquan¹, CAO Yongqiang², GUO Enliang¹, LI Danjun¹, MA Qiyun¹

(1. School of Environment/Natural Disaster Research Institute, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: Terrestrial evapotranspiration is the key connection of a wide array of Earth system processes, which links water cycles and energy balances over land. This paper selected 12 sensing data from NASA as the representative of four seasons, combined with the SEBS model to reckon the evapotranspiration of land surface and analyzed the ET of different land use types to verify the precision of remote sensing. To analyze the temporal-spatial characteristic, trend analysis, wavelet analysis, IDW and R/S analysis method based on Penman-Monteith were selected. The results show that the ET in northwest of Liaoning Province decreased in the order: summer>autumn>spring>winter; the evapotranspiration decreased in the order: summer>spring>autumn>winter; the error of evapotranspiration estimating is about 7.5% in meantime, indicating that the method is reasonable to be applied in the study area. The results can provide a scientific reference for water resources allocation and management in northwest of Liaoning Province.

Keywords: evapotranspiration; estimating by remote sensing; SEBS model; northwest of Liaoning Province

蒸散发(ET)包括地表、植物表面的蒸发量以及通过植物表面和体内的蒸腾量,是水量循环之间的关键环节,地表蒸散发通常是指土壤蒸发和植物蒸腾量之和^[1-2]。它为农作物的生长发育提供重要的水分和能量,是陆表生态体系和水文循环的纽带,控制着重要的水文过程,对研究流域水文循环和水资源情况起着至关重要的作用^[3]。因此,准确估算区域地表蒸散

发值,分析区域水资源分布情况成为研究热点和难点。早期有关蒸散发的研究多为采用波文比法、涡度相关法以及土壤水量平衡法等样地尺度、景观尺度的测量,不能提供区域蒸散发的空间分布特征^[4-5]。遥感数据能够提供非均质性的地表能量平衡过程和与地表覆盖情况紧密相关的参数,准确有效地反映时空的连续性和动态性^[6-8]。因此借助遥感手段对地表蒸

收稿日期:2016-12-16

修回日期:2016-12-29

资助项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2412016KJ046);公益性行业(气象)科研专项储备项目(2015001);国家自然科学基金(41571491);国家自然科学基金(51279072)

第一作者:王蕊(1993—),女,辽宁省锦州市人,硕士研究生,主要从事农业气象灾害风险评估等方面的研究。E-mail:wangr967@nenu.edu.cn

通信作者:张继权(1965—),男,吉林省九台市人,教授,博士学位,主要从事环境灾害风险评估与管理等方面研究。E-mail:zhangjq022@nenu.edu.cn

散发进行估算是目前最前沿的研究方向,近年来出现了许多遥感反演蒸散发的模型。其中 SEBS 模型是基于 SEBAL 模型基础上发展的遥感模型,具有较高的通量估算精度和应用价值,是目前国内外学者反演蒸散发量中应用最为广泛的模型之一。Vinukollu 等通过 SEBS 模型和传统的 Penman-Monteith, Priestley-Taylor 采用 3 种方法估算全球尺度的蒸散发值^[9];Gokmen 等基于 SEBS 模型,在水分胁迫条件下集成土壤水分参数估算蒸散发^[10];Alkhaier 等基于 MODIS 数据,采用 SEBS 模型分析了温度、地下水位深度、地表显热通量和日蒸散发之间的关系^[11];陆静等人基于 MODIS 数据,使用 SEBS 模型估算中国南方亚热带常绿松树种植园得蒸散发值,并验证了该模型的适用性^[12];吕明全等人基于遥感数据和气象数据研究了 1960—2013 年三峡库区蒸散发时空分布^[13];李琴等人基于 SEBS 模型,选取 30 a 遥感数据反演中亚 5 国及新疆地区日实际蒸散发量^[14];马亮和魏光辉以新疆塔里木盆地西缘的阿克苏地区为例,基于彭曼模型计算值为标准,评价了 H-S, P-T 和 McCloud 模型的适用性^[15]。

辽西北地区是重干旱区,属暖温带,半湿润、半干旱大陆性季风气候,降水量由东南向西北递减,西部降水量最少,多年平均水资源量不足以维持原有生态系统的最低水资源量,属于资源性缺水区域^[16-17]。在已有的研究中,对辽西北地区蒸散发量的研究较少,因此,本文通过 MODIS 数据,采用 SEBS 模型估算研究区蒸散发现状,结合土地利用类型和彭曼模型估算其模拟精度,并进一步分析研究区近 50 a 蒸散发量分布特征,最后采用变标度极差分析法对辽西北地区未来蒸散发趋势加以分析,以期对区域水资源综合管理、分配与规划提供理论支持与科学依据,对进一步研究该区域旱涝灾害特征并提供防御措施具有重要的研究意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 区域概况及数据来源

辽西北地区是辽宁省重点干旱区域,素有“十年九旱”之称,主要包括朝阳、阜新、锦州、葫芦岛、铁岭 5 县市以及沈阳的康平、法库县^[18]。该区域多年平均降水量为 450~700 mm 左右,降水多集中在夏季,年际变化很大^[19]。本文选取辽西北地区及其周边 27 个气象台站 50 a 的气象数据(图 1),数据来源于气象科学数据共享服务网,包括日照时数、日最高最低气温、平均相对湿度、平均风速等,时间序列为 1961—2010 年。遥感数据来源于 NASA 数据中心,为了更

准确的估算 2013 年不同季节蒸散量的变化情况,本文选取 2013 年内平均每月一景无云或少云遥感影像,应用 MODIS 投影变换软件 MRT 工具对数据进行重采样及投影变换的处理,主要提取 1~7, 1~19, 31, 32 波段。并用 MODIS LDOPE 工具对云量的分布进行检测,进行除云处理工作,并评价各个波段数据的质量。最终应用内嵌于 ILWIS 中的 SEBS 模型进行数据处理、应用和分析。

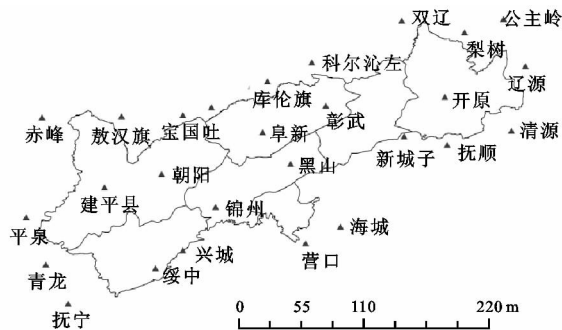


图 1 辽西北地区气象台站

1.2 基于 SEBS 的遥感 ET 估算模型

本文基于能量平衡原理及 SEBS 模型^[20],得到能量平衡公式如下:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (1)$$

式中: R_n 是地表净辐射通量 (W/m^2); λET 是潜热通量 (W/m^2); λ 为水的汽化热 (J/kg); ET 为实际蒸散量 [$kg/(m^2 \cdot s)$]; G 是土壤热通量 (W/m^2); H 是显热通量 (W/m^2)。

地表净辐射通量 (R_n) 的公式如下:

$$R_n = (1 - \alpha) \times R_{swd} + \epsilon \times R_{lwd} - \epsilon \times \sigma \times T_0^4 \quad (2)$$

式中: α 为地表反照率; R_{swd} 为向下的短波辐射; R_{lwd} 为向下的长波辐射; ϵ 为地表发射率, 又称辐射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, T_0 为遥感反演的地表辐射温度 (K)。其中 α 、 ϵ 、 T_0 能从遥感数据的可见光至热红外波段得到。

土壤热通量 (G_0) 的计算公式如下:

$$G_0 = R_n \times [\Gamma_c + (1 - f_c) \times (\Gamma_s - \Gamma_c)] \quad (3)$$

式中: R_n 为净辐射通量 (W/m^2); Γ_c 为植被在完全覆盖的情况下, G_0 与净辐射的比值; Γ_s 为裸土条件下 G_0 与净辐射的比值; f_c 为植被覆盖率。

显热通量 (H) 的计算公式如下:

$$H = \frac{\rho C_p \Delta T}{r_a} \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度 (kg/m^3); C_p 为比热容 [$J/(kg \cdot K)$]; ΔT 为温度差 (K); r_a 为空气动力学阻抗 (s/m)。

通过以上公式,进而求出 λET 。

1.3 Penman-Monteith 公式

本文依据 FAO^[21] 推荐的 Penman-Monteith 公

式计算辽西北地区的日蒸散发值,时间序列为 1961—2010 年。其公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C); R_n 为地表净辐射(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)); r 为干湿表常数; T 为 2 m 高处日均气温(°C); U_2 为 2 m 高处风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(KPa)。

2 结果与分析

2.1 辽西北地区遥感反演地表蒸散发

本文通过计算瞬时潜热通量以及卫星过境瞬间提供的每个参量,得到蒸发比;利用蒸发比,由地表通量和各项因子并通过日照时数等地表参数的引入,最终通过转换获得实际的日蒸散量。结果见图 2,春季蒸散发最高值最大,但全区范围内高值点较少,夏季值整体较高,辽西北地区 2013 年区域平均蒸散发量

大小依次为夏季>春季>秋季>冬季。春季 ET 分布范围较广且均匀,其低值区大多分布在中北部,主要是因为该地植被覆盖率低,植被稀疏,因此蒸散量较低;夏季植被覆盖率最高,ET 值明显增加,其高值区分布在朝阳、阜新一带,主要是因为该地区属于辽西北旱区,夏季温度高,蒸散发量明显增加,低值区出现在锦州、葫芦岛等地,该地区靠近海洋,温度相对低,蒸散发值也相对降低;秋季 ET 值没有明显下降;而冬季气温骤降,植被覆盖率减少,ET 值进一步降低,由西部向东部逐渐降低。综上所述,蒸散发量季节变化较为明显。由图 2 可以看出,春季蒸散发量分布范围较广且均匀;夏季表现为中部地区相对东西部地区较高;秋季蒸散发分布整体均匀,只有西部零星高值区;冬季各地区出现差异,由西部向东部逐渐降低。辽西北地区季节内蒸散发时空差异较大,易发生春旱、秋旱,城市缺水问题较为严重。因此,辽西北地区水资源配置应考虑到区域蒸散发的四季变化情况进行合理优化。

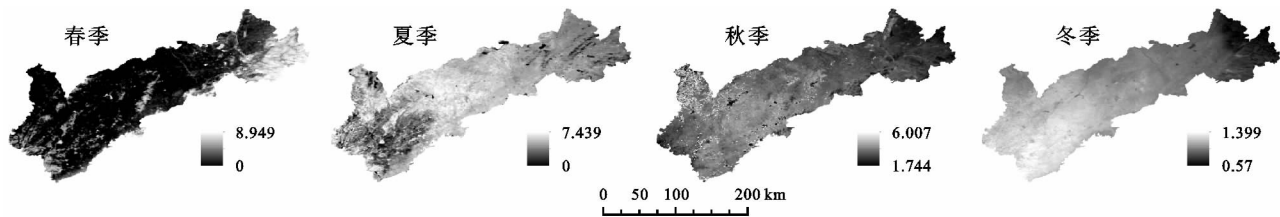


图 2 辽西北地区不同季节日蒸散量(ET)空间分布

2.2 辽西北地区不同土地利用类型蒸散发值

为进一步探究辽西北地区蒸散发的空间分布特征,本文统计了该地区典型土地利用类型的蒸散发量,从箱状图(图 3)可见,虽然蒸散发量在季节上整体趋势相同,但是不同土地类型的蒸散发量具有明显的差异性。辽西北地区土地主要以耕作为主,该地区是玉米主要种植区之一,因此其农田的比例相对较大,其蒸散发值也较高。林地、草地植被覆盖率次之,因此其蒸散发量也相对较高,各个土地利用类型蒸散发值季节分布大小为夏季>春季>秋季>冬季。各个季节不同土地利用类型的蒸散发量变化大小依次为农田、草地、林地和水面。春季、夏季各土地利用类型蒸散发值变化幅度较小,变化不明显,农田蒸散发值最大为 8 mm/d 左右,水面蒸散发值最小为 0.5 mm/d 左右;秋季农田蒸散发的最低值为 3.24 mm/d,最高值为 4.68 mm/d,落差较小;冬季温度低,植被凋落、水面冰冻,因此各个土地利用类型的蒸散发量最低。在各个土地利用类型中,水面蒸散发值最小,主要由于辽西北地区气候干旱,水资源匮乏,经济发展水平较低,水面干枯,城市缺水现象严重,造成蒸散发量极少。

2.3 遥感 ET 与传统 P-M 模型值的对比

为验证 SEBS 模型估算蒸散发值的精度,本文根据 2013 年不同土地利用分布提取农田中各日蒸散发值,结合 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和作物参照法计算研究区与遥感影像所对应的实际日蒸散发值,并求其平均值,与之进行对比,结果见图 4。SEBS 模型的计算结果与实际测量的结果相差不大,误差大约在 7.5% 左右,根据以往研究可知,本研究结果在允许接受的范围内^[22]。总体来说,本文利用 ILWIS 软件,采用 SEBS 模型计算得到的辽西北地区 2013 年蒸散发时空分布上是合理可靠的。

2.4 辽西北地区近 50 a 参考作物蒸散发值时空分布特征

2.4.1 时间分析 本文利用均一化模型 RHtest 对气象数据进行了均一化处理,然后根据 Penman-Monteith 公式计算了近 50 a 辽西北地区日参考作物蒸散发值。采用一元线性回归法对不同季节全区蒸散发平均值进行分析(图 5,图 6),结果表明辽西北地区 50 a 来日均蒸散发值季节差异性较大,整体呈下降趋势,但是各季节变化趋势差异性较小。1980 年蒸散发量下降速率最大,

蒸散发值由高到低依次为夏季、春季、秋季和冬季。其中 50 a 间夏季和春季蒸散发值波动较大,冬季和秋季蒸散发值相对平缓。春、夏、秋和冬季全区平均蒸散发值分别以 0.020 mm/50 a,0.025 mm/50 a,0.019 mm/50 a 和 0.011 mm/50 a 的速率减少,与近 50 a 蒸散发季节变化趋势一致。春季蒸散发倾向率

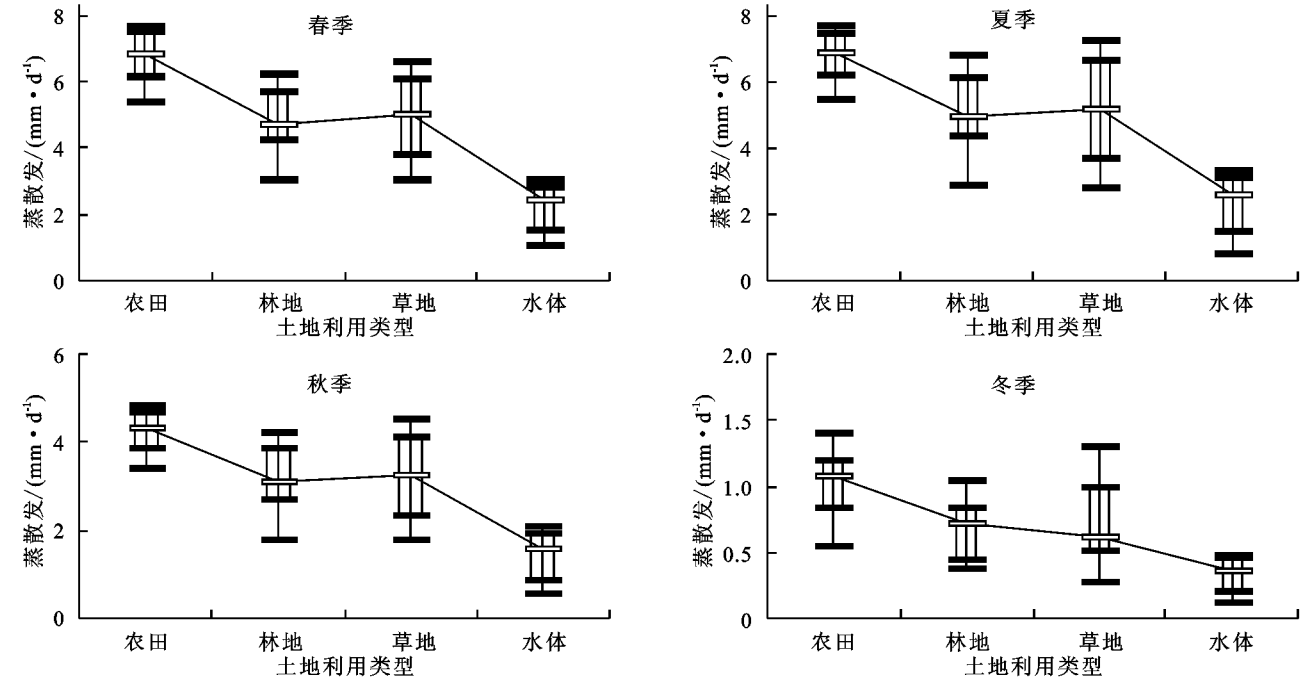


图 3 辽西北地区不同季节不同土地利用类型蒸散发值

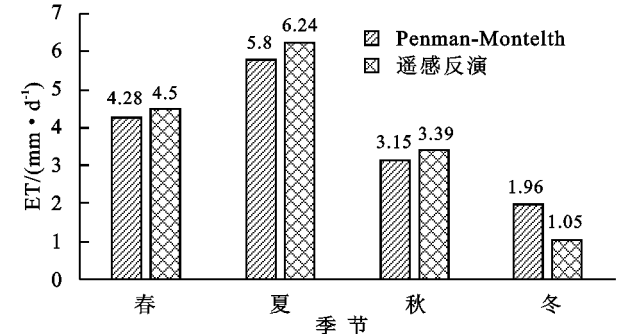


图 4 两种方法下日蒸散发量结果对比

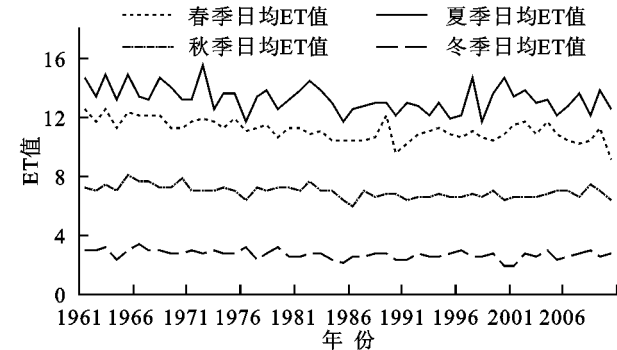


图 5 1961—2010 年辽西北地区近 50 a

参考作物蒸散发时间变化趋势

2.4.2 空间分析 本文利用反距离加权法对辽西北地区参考作物蒸散发值进行空间插值(图 7),春季蒸

区间为一 0.054 8~0.001 6 mm/50 a;夏季蒸散发倾向率降幅区间为 0.005 1~0.004 1 mm/50 a;秋季蒸散发倾向率值区间为一 0.039 5~0.012 1 mm/50 a;冬季蒸散发倾向率值区间为一 0.024 3~0.005 9 mm/50 a,且全区蒸散发倾向率均为中部地区最高,向四周递减的趋势。

散发范围为 4.24~13.47 mm;夏季范围为 4.81~15.43 mm;秋季范围为 2.70~8.40 mm;冬季范围为 1.08~3.36 mm。辽西北地区蒸散发空间分布具有明显的区域性,春、夏两季蒸散发值由北部向南部逐渐减少,其较高的地区位于朝阳、阜新和康平县一带,该地区温度较高且干燥,植被覆盖率较多,因此其蒸散发值较高。秋季蒸散发值高值区位于辽西北西部和北部地区,包括锦州、朝阳、建平等地。冬季蒸散发值高值区分布在辽西北西部地区,由中北部向中南部逐渐降低。总体而言 4 个季节蒸散发低值区均位于辽西北中南部黑山县。且四季平均日蒸散量排序为夏季>春季>秋季>冬季,这是由于春季随着气温的回升,农作物耕种,此时蒸散发值较高,夏季气温升高,太阳辐射较强,降水充沛,农作物逐渐成熟,其蒸散发量达到最大,到了 9 月份,气温逐渐降低,其蒸散发值也随之减少,冬季寒冷,作物枯萎,需水量大幅度下降,相应蒸散发量也达到最小。其分布规律与遥感反演的结果基本一致,且与蒸散发 50 a 间总体变化趋势一致。

2.4.3 未来变化趋势 变标度极差分析法(简称 R/S 分析法)是一种研究时间序列的分形理论,R/S→∞时,则说明所分析的时间序列存在 Hurst 现象,H 称为

Hurst 指数。当 $0.5 < H \leq 1$ 意味着时间序列具有持久性, H 越接近于 1, 持久性越强。其中分维度指数 $D=2-H$, 因此当 $D < 1.5$ 时, 时间序列具有长期有效性。为预测未来蒸散发季节变化特征, 本文基于 R/S 基本理论, 借助 Matlab 软件, 计算辽西北内部 9 个站点不同季节尺度日蒸散发值的 Hurst 指数, 并计算其分维数 D (表 1)。年尺度下各站点 H 值均大于 0.5, 且分维数均小于 1.5, 因此在将来的一段时间内, ET_0 仍然保持着与过去相同的变化趋势, 通过各站点近 50 a 蒸散发值分布可知, 在未来一段时间内, 除彰武、阜新两站点呈上升趋势

外, 其余 7 个站点均为下降趋势, 各个地区蒸散发值均具有持续性。9 个站点中阜新市 H 值最大为 0.976 4, 因此其持续性最强。季节尺度上, 各站点四季 H 值均小于 0.5, D 值均大于 1.5, 意味着未来各个季节变化趋势与过去相应季节变化一致, 且具有持续性。春、夏和秋季阜新 Hurst 指数分别为 0.979 1, 0.869 1, 0.955 2, 均为全区最大值, 持续性最强, 冬季 H 值为 0.891 3, 为全区第二, 持续性较强, 其季节尺度与年尺度变化趋势一致。分析可知辽西北地区蒸散发值未来趋势变化具有较强的稳定性。

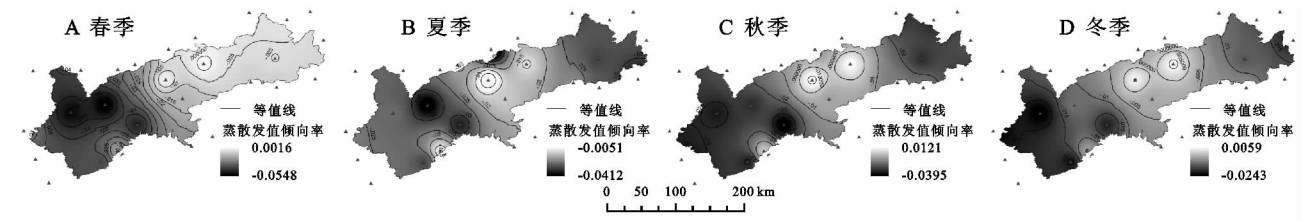


图 6 1961—2010 年辽西北地区不同季节参考作物蒸散发倾向率变化

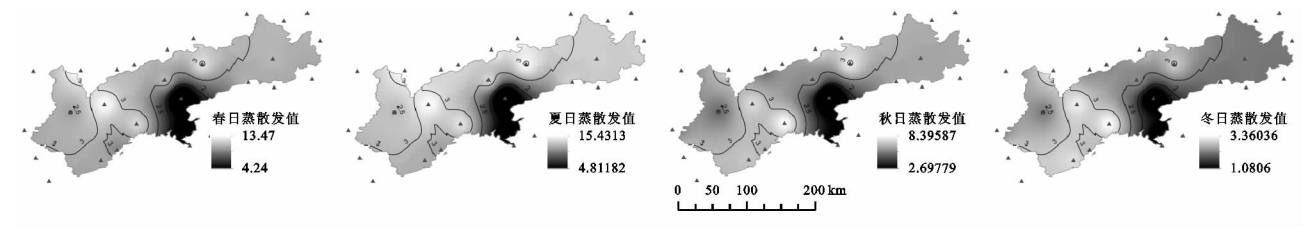


图 7 辽西北地区不同季节参考作物蒸散发值空间分布

表 1 各站点不同时间尺度的 Hurst 指数和分维数

站点	H (春)	D (春)	H (夏)	D (夏)	H (秋)	D (秋)	H (冬)	D (冬)	H (年)	D (年)
黑山	0.8408	1.1592	0.7307	1.2693	0.6767	1.3233	0.6430	1.3570	0.7657	1.2343
彰武	0.8406	1.1594	0.6693	1.3307	0.8007	1.1993	0.7345	1.2655	0.8219	1.1781
阜新	0.9791	1.0209	0.8691	1.1309	0.9552	1.0448	0.8913	1.1087	0.9764	1.0236
开原	0.8901	1.1099	0.7657	1.2343	0.8425	1.1575	0.7710	1.2290	0.9124	1.0876
朝阳	0.8487	1.1513	0.7443	1.2557	0.8049	1.1951	0.8481	1.1519	0.8858	1.1142
建平	0.8468	1.1532	0.7488	1.2512	0.8914	1.1086	0.9166	1.0834	0.8167	1.1833
锦州	0.7547	1.2453	0.6472	1.3528	0.7766	1.2234	0.8187	1.1813	0.7358	1.2642
绥中	0.6931	1.3069	0.7475	1.2525	0.7239	1.2761	0.7781	1.2219	0.7067	1.2933
兴城	0.8366	1.1634	0.8297	1.1703	0.8853	1.1147	0.7667	1.2333	0.8831	1.1169

3 结论

(1) 辽西北地区下垫面蒸散发季节变化明显, 植被覆盖情况和地表温度是影响蒸散发的主要因素。春季 ET 分布范围均匀, 该地植被覆盖率低, 植被稀疏, 因此蒸散量较低; 夏季植被覆盖率最高, ET 值明显增加; 秋季植被覆盖率较高, 因此 ET 值没有明显下降; 而冬季气温骤降, 植被覆盖率减少, ET 值进一步降低。总体来说辽西北地区 ET 值较均匀, 没有明显的高低之分, 在所研究站点的数据上分析能够得出在辽西北地区偏西北地区蒸散发值相对较高, 中南部

地区相对较低, 只有部分低值区呈零星的分布, 其区域分异并不明显。

(2) 蒸散发量在不同土地类型中具有明显的差异性, 4 个季节整体趋势相同。蒸散发量的季节分布为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 且各土地利用类型中蒸散发值由大到小分别为农田、草地、林地和水体。

(3) 本文利用 Penman-Monteith 公式和作物参照法计算的日蒸散发量验证遥感反演的农田日蒸散发量, 其误差值约为 7.5%, 证明遥感手段反演区域蒸散发量值方法合理可行, 可为区域水资源合理优化配置提供科学参考依据。

传统的蒸散发估算模型多是基于观测站单点或田间尺度的计算,采用经验统计模型,对地表观测数据的依赖性过高。本文依据地表能量平衡方程,采用内嵌于 ILWIS 软件中的 SEBS 模型,对各个波段拉伸偏移量、水汽含量、气溶胶光学厚度以及臭氧含量等参数进行校正,结合显热通量、土壤热通量、净辐射通量等地表参数,进而计算区域蒸散发。结果表明采用 SEBS 模型有效消除了地表温度和气象数据对蒸散发估算带来的不确定性,具有较高的精度。同时选用 Penman-Monteith 公式计算辽西北地区日潜在蒸散发,对模型模拟的结果进行验证,得到合理可靠的结果,其误差在前人所研究的允许误差之内^[22]。

本文也存在一定不足,由于数据的缺失,站点气象数据不完善,彭曼公式所采用的气象数据,只是对点上蒸散发的估算,不能对大区域结果进行验证。但文中采用此模型对辽西北地区蒸散发进行估算及验证,仍可为该地区有关蒸散发的研究提供科学依据,日后将重点研究基于长时间序列的遥感数据,使用 SEBS 模型的蒸散发时空特征分析。

参考文献:

- [1] 施云霞. 基于 SEBAL 模型的新疆精河绿洲蒸散发研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2016.
- [2] 党素珍,蒋晓辉,董国涛,等. 泾河上游流域实际蒸散发变化趋势及成因分析[J]. 水土保持研究,2016,23(2):143-147.
- [3] 汤秋鸿,黄忠伟,刘星才,等. 人类用水活动对大尺度陆地水循环的影响[J]. 地球科学进展,2015(10):1091-1099.
- [4] 李洋,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河下游胡杨群落的蒸散发观测研究[J]. 新疆环境保护,2013,35(1):1-7.
- [5] 李念,孙维君,秦翔,等. 祁连山老虎沟地区高寒草甸蒸散发估算[J]. 干旱区资源与环境,2016(6):173-178.
- [6] 张荣华,杜君平,孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述[J]. 地球科学进展,2012,27(12):1295-1307.
- [7] 王健美,杨国范,周林滔. 基于 SEBS 模型反演凌河流域尺度地表蒸散发量[J]. 灌溉排水学报,2016,35(2):95-99.
- [8] 白娟,杨胜天,董国涛,等. 基于多源遥感数据的三江平原日蒸散发量估算[J]. 水土保持研究,2013,20(3):190-195.
- [9] Vinukollu R K, Wood E F, Ferguson C R, et al. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(3):801-823.
- [10] Gokmen M, Vekerdy Z, Verhoef A, et al. Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,121(138):261-274.
- [11] Alkhaier F, Su Z, Flerchinger G N. Reconnoitering the effect of shallow groundwater on land surface temperature and surface energy balance using MODIS and SEBS[J]. Hydrology & Earth System Sciences & Discussions, 2012,16(7):1833-1844.
- [12] Lu J, Li Z L, Tang R, et al. Evaluating the SEBS-estimated evaporative fraction from MODIS data for a complex underlying surface[J]. Hydrological Processes, 2013,27(22):3139-3149.
- [13] Lv Ming-quan, Chen Ji-long, Mirza Z A, et al. Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in the Three Gorges Reservoir area during 1960—2013 [J]. International Journal of Climatology, 2016,36(14):4497-4511.
- [14] 李琴,陈曦,包安明,等. 基于 SEBS 模型干旱区蒸散发量研究[J]. 遥感技术与应用,2014,29(2):195-201.
- [15] 马亮,魏光辉. 新疆塔里木盆地西缘参考作物蒸散发模型的适用性评价[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(8):132-137.
- [16] 郑帅,李德明,郭成久,等. 辽西北地区风力侵蚀过程分析[J]. 水土保持研究,2015,22(4):138-142.
- [17] 张艺萌,张雪松,郭婷婷,等. 辽西北地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响[J]. 中国农业气象,2015(2):203-211.
- [18] 梁文章,孙玉华,孙宝杰. 辽西北地区水资源量趋势分析[J]. 东北水利水电,2011,37(2):37-38.
- [19] 张继权,严登华,王春乙,等. 辽西北地区农业干旱灾害风险评价与风险区划研究[J]. 防灾减灾工程学报,2012,32(3):300-306.
- [20] 曾丽红,宋开山,张柏,等. SEBAL 模型与 MODIS 产品的松嫩平原蒸散发量研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(1):140-147.
- [21] Djaman K, Irmak S, Kabenge I, et al. Evaluation of FAO-56Penman-Monteith Model with Limited Data and the Valiantzas Models for Estimating Grass-Reference Evapotranspiration in Sahelian Conditions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2016,142(11):04016044.
- [22] 曹永强,张亭亭,徐丹,等. 海河流域蒸散发时空演变规律分析[J]. 资源科学,2014,36(7):1489-1499.