

基于CLM模型的月尺度中亚陆表蒸散和土壤水分模拟估算

姜 勃^{1,2}, 田 静^{1*}, 苏红波¹

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 论文基于CLM 4.5模拟1980—2009年月尺度中亚陆表蒸散发和土壤水分, 并和GLDAS、GLEAM数据产品进行对比, 结果表明CLM 4.5模拟的蒸散和土壤水分区域平均值和其他产品具有较好的一致性。从CLM 4.5模拟的陆表蒸散结果分析可知: 全年蒸散大部分集中于春夏2季, 在5月达到一年的最大值, 夏季中亚的蒸散高值区集中在哈萨克斯坦北部和东北部、东南部的山地区, 对应主要的农田区和林地区, 植被蒸腾占主导因素; 春季东南部天山山脉和帕米尔高原是蒸散高值区, 主要因为该地区春季降水量较大, 且积雪开始融化, 水量充足, 地表蒸散发充分; 蒸散低值区主要在西南的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦, 地表覆盖以荒漠为主, 植被覆盖较少, 降水也较少, 导致地面蒸散量较低。模拟的表层土壤水分结果表明: 冬季陆面蒸散低, 降水大多储存在表层土壤内或者以积雪的形式覆盖在地面上, 春季气温升高, 积雪融化下渗到土壤中, 土壤水分持续增加, 4月份达到峰值; 夏季蒸散增加, 降水减少, 土壤水分持续下降, 9月份达到最低值; 进入秋冬季后蒸散降低, 土壤水分呈上升趋势。中亚土壤水分高值区集中在北部和东北部的林地、农田区, 以及天山山脉和下游的阿姆河、锡尔河流域区, 西南部的荒漠区依然是低值区。一年中, 夏季降水较少, 由于地面蒸发的作用, 土壤水分持续较少, 蒸散也随之降低。三者之间相关性很高; 冬季降水和土壤之间的相关性较高, 尤其是裸地区; 在植被覆盖较大的情况下, 春季降水和蒸散相关性较高, 土壤水分和降水、蒸散之间相关性较低, 会出现负相关情况。CLM 4.5模拟的结果为进一步中亚地区的水问题研究奠定基础。

关键词: 陆表蒸散; 土壤水分; CLM 4.5; 中亚

中亚通常指哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦5国和中国的新疆地区, 本文特指中亚5国。受中国“一带一路”倡议的影响, 中亚5国作为丝绸之路经济带的核心区域备受重视, 其存在的资源环境问题也成为多国学者研究的热点, 水资源问题就是热点之一^[1-2]。中亚地区地处欧亚大陆腹地, 属于典型的温带大陆性气候。由于降水稀少, 蒸发量大, 中亚地区成为世界上主要的干旱区, 水资源本十分匮乏, 1991年苏

联解体造成的水资源规划管理混乱更引发了一系列水资源问题, 再加上近几十年来明显的气候变化影响, 中亚已经被列为国际上水问题十分严重的地区之一^[3]。了解中亚地区的水循环过程, 厘清水循环要素的时空分布特征是解决地区水问题的基础。由于中亚地区观测数据的缺乏且数据获取难度较大, 因此遥感数据和模型模拟就成为重要的研究手段^[4]。李琴等^[5]基于SEBS模型反演了中亚地区生长季内的地表蒸散量, 分析了地表蒸散空间变化

收稿日期: 2019-02-18; 修订日期: 2019-09-29。

基金项目: 中国科学院战略先导研究项目(XDA2004030201); 国家自然科学基金项目(41671354)。[Foundation: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No. XDA2004030201; National Natural Science Foundation of China, No. 41671354.]

第一作者简介: 姜勃(1990—), 男, 江苏淮安人, 博士生, 主要从事陆面过程及定量遥感研究。E-mail: jiangb.17b@igsnr.ac.cn

*通信作者简介: 田静(1979—), 女, 辽宁阜新, 副研究员, 主要从事定量遥感及生态遥感应用方面的研究。

E-mail: tianj.04b@igsnr.ac.cn

引用格式: 姜勃, 田静, 苏红波. 基于CLM模型的月尺度中亚陆表蒸散和土壤水分模拟估算[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 433-442. [Jiang Bo, Tian Jing, Su Hongbo. Estimation of monthly evapotranspiration and soil moisture in the Central Asia. Progress in Geography, 2020, 39(3): 433-442.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.008

和年际变化的规律。李超凡等^[6]基于全球MODIS和AVHRR蒸散数据集分析了近20 a中亚地区NPP和ET的时空特征。张建财等^[7]基于LPJ模型模拟了1982—2012年NPP和ET的空间分布和变化特征,指出NPP和ET的空间分布基本一致,年际变化呈波动上升趋势。总体来说,目前中亚地区地表蒸散相关研究所用数据类型较为单一,还存在不确定性,且与土壤湿度的联系较少。本文利用CLM(Common Land Model) 4.5陆面过程模型模拟研究中亚地区2大水循环要素——土壤水分和地表蒸散,目标之一是评价CLM模型在该地区的适用性,目标之二是阐述中亚地区土壤水分和地表蒸散的时空变化特征,从而为进一步研究中亚地区的水问题奠定基础。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区概况

本文以中亚5国为研究区,西起里海,东至中国新疆,南起阿富汗,北至俄罗斯(35°N~56°N, 46°E~87°E)。地势整体由东南向西北呈递减态势,海拔最高处在天山山脉和帕米尔高原,最低处在里海周围,大体分为3个区域:东南部的天山山脉和帕米尔高原,以吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦2国为主,林地、草地和农田分布较多;中西部的卡拉库姆沙漠、克孜勒姆沙漠等,以土库曼斯坦和乌兹别克斯坦为主,基本为荒漠地,由于阿姆河和锡尔河的灌溉,有部分农业区;北部的山丘平原区,以哈萨克斯坦为

主,植被覆盖呈带状分布,中间是草地,最北部是耕地,以雨养田为主^[8]。图1显示了中亚5国的土地利用/覆盖分类^[9]。研究区年均降水量小于300 mm,且主要集中在东南山区,荒漠区的年降水量则小于100 mm。气温日变化和季节性变化较大,夏季日照时间长,太阳辐射充足,地面蒸发量要远大于降水量,导致地表极度缺水。

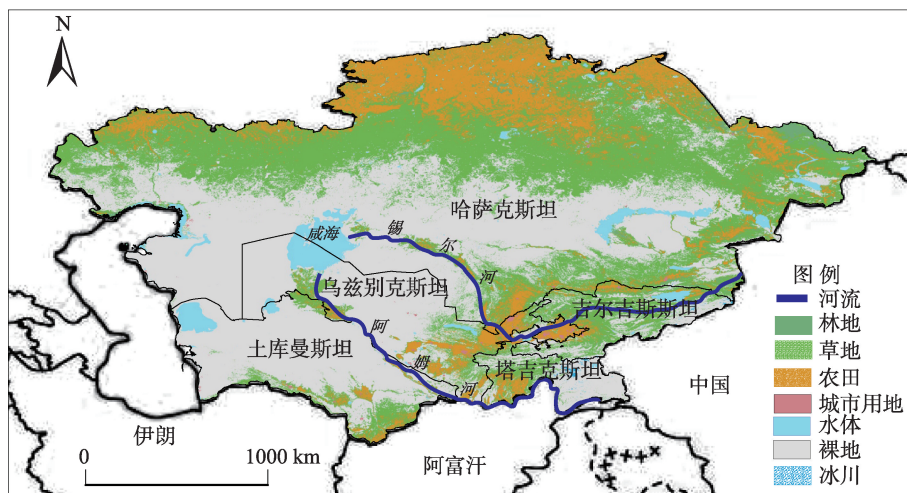
1.2 数据与方法

1.2.1 CLM模拟地表蒸散和土壤水分的方法介绍

CLM是目前世界上发展较为完善的新一代陆面过程模式之一。它综合了生物圈-大气圈传输陆面模式^[10](Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, BATS)、中国科学院大气物理研究所陆面模式^[11]和NCAR的陆面过程模式^[12]等几个陆面模式的优点,改进了一些物理过程的参数化方案。CLM 4.5已经耦合到地球系统模式(Community Earth System, CESM)的陆面模块。CLM 4.5模型将下垫面分为5大类:冰川、湿地、植被区、湖泊和城市。植被区被分为16种不同的植被类型(包括裸地)。陆表蒸散发分有、无植被2种情况。无植被情况下,陆表蒸散主要是裸土蒸发(E_{soil}),计算公式为:

$$E_{soil} = -\frac{\rho_{atm}(q_{atm} - q_{soil})}{r_{aw} + r_{soil}} \quad (1)$$

式中: ρ_{atm} 为大气密度, q_{atm} 和 q_{soil} 分别是空气和土壤表层比湿, r_{aw} 和 r_{soil} 分别是空气和土壤中水汽传导阻抗。土壤水分含量转化为土壤水基质势影响到地面比湿,从而影响到地表蒸发,土壤水汽传导阻抗也与土壤孔隙度和土壤水分含量有关。有植被



注:本图基于自然资源部标准地图服务网下载的审图号为GS(2016)1663号的标准地图制作,底图无修改。

图1 中亚5国土地利用/覆盖分类

Fig.1 Land use / land cover classification of the five Central Asian countries

情况下,总蒸散分为植被蒸腾和裸土蒸发,植被蒸腾 E_v 的计算公式为:

$$E_v = -\frac{\rho_{\text{atm}}(q_s - q_{\text{sat}})}{r_{\text{total}}} \quad (2)$$

式中: $q_{\text{sat}}^{T_v}$ 是某一植被温度 T_v 下的饱和水汽比湿; q_s 是冠层比湿; r_{total} 是从冠层到空气的水汽总传导阻抗,包括冠层尺度边界阻抗和叶片正反面的气孔阻抗。植被蒸腾和植物的生理过程以及冠层内水分含量有关。冠层比湿与大气和冠层之间的空气导度是影响植被蒸腾的重要因子。

CLM 4.5应用理查德方程计算土壤中的水分传输,模拟共分为15层,从表层的0.0071 m至35.1776 m,且随着深度的增加,每层的厚度也在不断加深。计算公式为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

式中: k 为水力传导系数; θ 是土壤体积含水量; t 是时间; z 是土壤柱的高度(向上为正); ϕ 是土壤水势,为土壤基质势和重力势之和,土壤基质势和土壤中颗粒物吸附力和毛细管作用力有关,重力势是从参考面到土壤中某一深度的垂直距离。

1.2.2 模型输入数据

本文采用CRUNECIP 7.0再分析资料作为CLM 4.5的大气强迫数据,该数据由1901—2002年CRU TS 3.2全球0.5°月平均气象数据和1948—2016年NCEP 2.5°全球每6 h实时气象资料同化合成。数据内容包括气温、降水、太阳长短波辐射、气压、比湿和风速信息。地面数据包括各下垫面覆盖比例、地面高程,各植被种类覆盖信息^[13]、冠层高度、叶面积指数。土壤光谱信息^[14](用来计算地表反照率)、土壤质地和有机物含量数据来源于IGBP土壤数据库。模型先用1980年以前的数据进行预热,模拟时间从1980年开始至2009年结束。

1.2.3 其他地表蒸散和土壤水分的产品数据

由于难以获取研究区实测的地表蒸散和土壤水分数据,因此本文采用交叉验证的方法对模型估算结果进行评价,即利用目前普遍应用的产品数据与本模型模拟的结果进行比较。使用的产品为GLEAM (Global Land-surface Evaporation Amsterdam methodology)和GLDAS (Global Land Data Assimilation System)。GLEAM的地表蒸散产品已经成功用于许多研究^[15-17]。产品以遥感数据为主进行估算,将地表蒸散分为植被蒸腾、冠层截留、土壤蒸

发3个主要组成部分。先应用Priestley-Taylor方程计算土壤和植被的潜在蒸散量,再根据土壤和植被中的水得出一个转换系数,将潜在蒸散转换为真实蒸散,最后再加上冠层截留蒸发的部分。GLEAM数据集中的表层土壤水产品是由集合卡尔曼滤波同化AMSR-E微波数据所得0~5 cm土壤体积含水量。GLDAS是由美国航空航天局戈达德空间飞行中心NASA/GSFC、美国海洋和大气局NOAA和国家环境预报中心NCEP联合研发的全球高分辨率离线的陆面模拟系统^[18]。本文所使用的是GLDAS-2版本的产品数据,地表蒸散和土壤水分产品由Noah陆面模式模拟所得,其使用的气象强迫数据也是CRUNECIP 7.0,与本文使用数据相同。

2 结果分析

2.1 CLM地表蒸散模拟结果的交叉对比验证

整个中亚地区内CLM地面蒸散月平均模拟值与GLEAM、GLDAS产品之间的对比如散点图2所示。总体来说,模拟值比较接近2种产品蒸散值,与GLEAM之间的差异($R^2=0.892$, RMSD=6.217 mm)小于与GLDAS之间的差异($R^2=0.778$, RMSD=6.268 mm)。这种差异主要体现在2个方面:①蒸散量较小时(ET<10 mm),模拟值与GLEAM之间吻合较好,但小于GLDAS蒸散值;②蒸散量较大时(ET>30 mm),模拟值要偏小于GLEAM蒸散值,偏大于GLDAS蒸散值,随着地表蒸散量的增加,与GLEAM产品相比,CLM的模拟值由高估逐渐变成低估,而与GLDAS产品相比则由低估逐渐变成高估,转折点都在18 mm附近。图3显示了3种数据地表蒸散月平均值的对比,可以进一步说明它们的差异。3种数据的季节变化特征十分一致,都呈现出夏季高、冬季低的特点,主要因为夏季植被蒸腾旺盛而冬季气温较低,太阳辐射不足,没有植被活动。冬季时(12月—翌年2月),CLM模拟蒸散月均值为3.53 mm,和GLEAM值较为接近(2.77 mm),而GLDAS值相对较大(8.11 mm);春季时(3—5月)地表蒸散持续增加,5月CLM模拟值达到了一年中最大(38.34 mm),与GLEAM一致(45.76 mm),而GLDAS最大值会持续到6月,且相对较小(33.75 mm);从夏季(6—8月)开始到秋季(9—11月)结束,地表蒸散都是呈持续递减的趋势,9月过后3种数据递减趋势产生差异,其中GLEAM蒸散持续降低最明显,而CLM模拟值10月与9月基本一致。

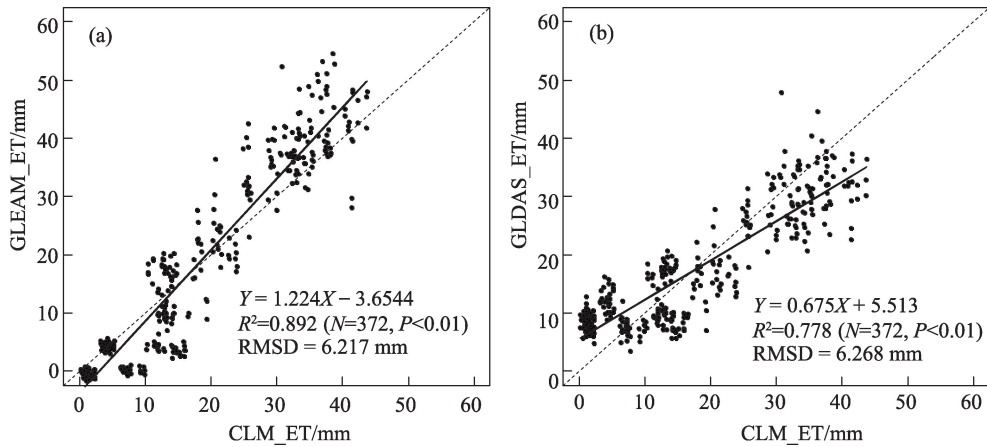


图2 1980—2009年CLM模拟的月平均地表蒸散(ET)与GLEAM和GLDAS地表蒸散产品的对比
Fig.2 Scatter plot of monthly evapotranspiration (ET) between common land model (CLM) simulations and GLEAM, GLDAS products, 1980—2009

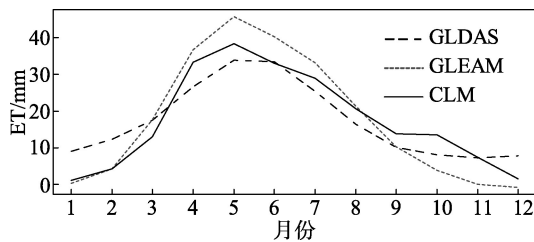


图3 3种地表蒸散(ET)数据的月均值对比
Fig.3 Time series of monthly mean evapotranspiration (ET) of the three products

图4显示了3种数据年总蒸散量的年际变化。可以看出30 a间3种数据的时间变化趋势较为一致,但在几个年份上存在差异。1993、1997和2002年,CLM模拟值处在一个波谷的位置,与其他2种数据相反。另外,1998—2004年,CLM模拟的年总蒸散量与另外2种产品在蒸散量的大小上存在较大的差异。

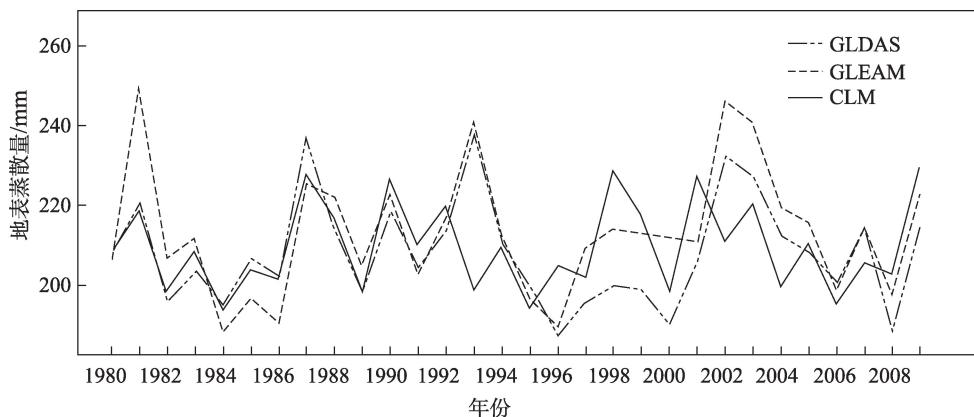


图4 3种数据地表蒸散年均值对比
Fig.4 Time series of annual mean evapotranspiration (ET) of the three products

气象数据、地物覆盖数据以及植被蒸腾和裸地蒸发算法的差异都有可能造成上述3种地表蒸散结果的差异。总体上,在相关性、季节变化和年度变化上,CLM模型模拟的地表蒸散结果与GLEAM和GLDAS的结果具有一致性。

2.2 CLM土壤水分模拟结果的交叉对比验证

图5显示了整个中亚地区内CLM模拟的月平均土壤水分含量与GLEAM和GLDAS产品的对比。从散点图可以看出,模拟值比较接近其他2种产品数据,和GLEAM数据之间 R^2 为0.833,RMSD为0.046 m^3/m^3 ;和GLDAS数据之间 R^2 为0.839,RMSD为0.035 m^3/m^3 。CLM模拟结果整体上低于其他2种产品。图6显示了3种产品月均值对比,可以进一步说明这3种数据间的差异。3种数据的季节变化特征基本一致:冬季时CLM模拟的土壤含水量月均值为0.205 m^3/m^3 ,且变化不大;GLEAM月均值为

0.265 m³/m³, 在2月有一个波谷;GLDAS月均值为0.247 m³/m³。从春季开始, 表层土壤含水量都呈持续递减趋势; 夏季时, 由于太阳辐射最强, 地表蒸散

较大, 土壤含水量最低, CLM模拟值为0.142 m³/m³, GLEAM为0.168 m³/m³, GLDAS为0.156 m³/m³; 9月后3种数据呈递增趋势。图7显示了3种数据的土

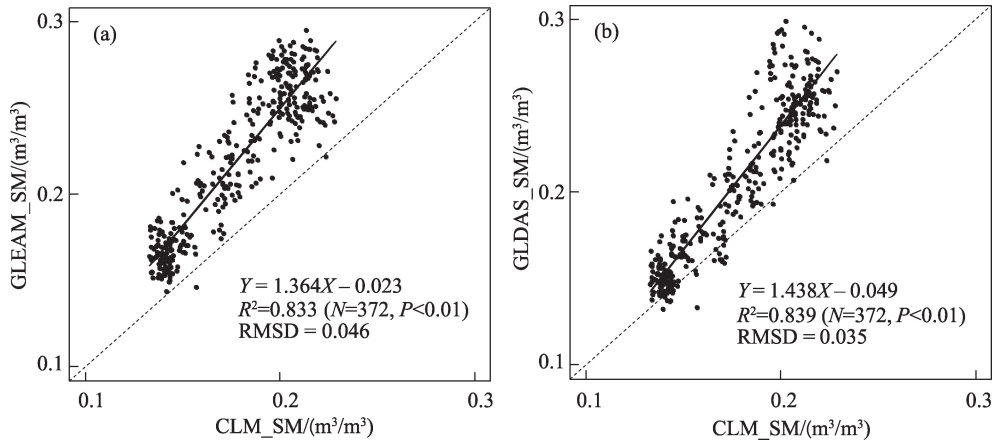


图5 1980—2009年CLM模拟月平均土壤水分含量(SM)与GLEAM和GLDAS土壤水分产品的对比
Fig.5 Scatter plot of monthly mean soil moisture (SM) between common land model (CLM) simulations and GLEAM, GLDAS products, 1980–2009

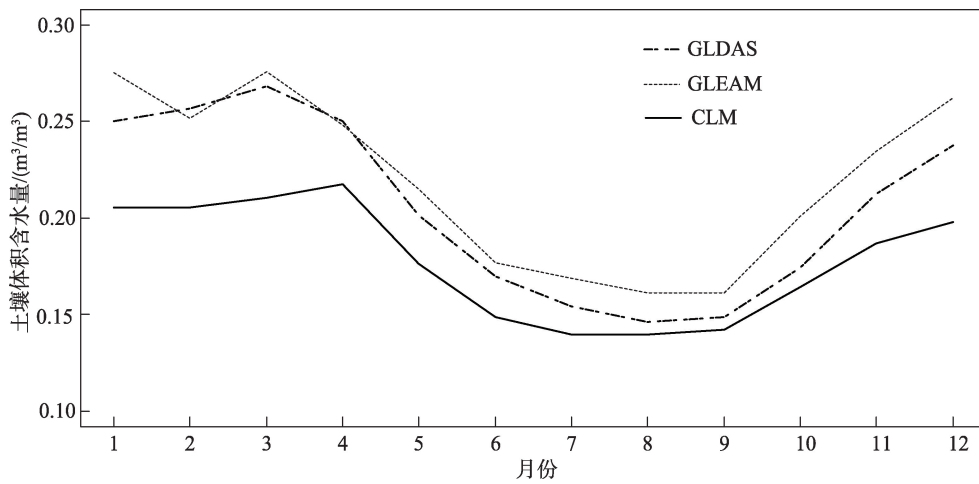


图6 3种数据土壤体积含水量的月均值对比
Fig.6 Time series of monthly mean volumetric soil water content of the three products

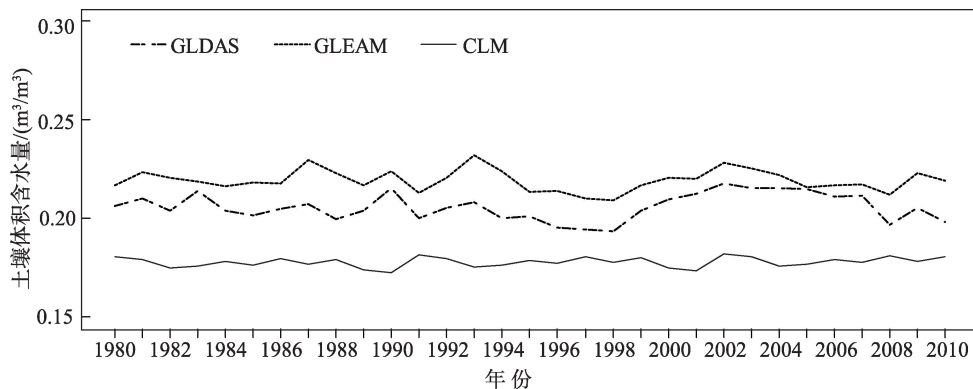


图7 3种数据土壤体积含水量的年均值对比
Fig.7 Time series of annual mean volumetric soil water content of the three products

壤含水量的年际变化,CLM模拟的年际变化幅度为 $0.194\sim 0.215\text{ m}^3/\text{m}^3$,GLEAM变化幅度为 $0.257\sim 0.259\text{ m}^3/\text{m}^3$,GLDAS变化幅度为 $0.219\sim 0.284\text{ m}^3/\text{m}^3$,模拟值的变化幅度小于其他2种产品。1998—2002年间,GLDAS和GLEAM都反映了土壤水含量增加的趋势,而CLM模拟值并没有表现出这一趋势。总体来说,模拟的土壤水含量符合季节性变化特征,但冬季土壤水含量与其他产品差异较大。

2.3 中亚5国地表蒸散的时空分布

根据CLM 4.5模拟的结果,中亚5国1980—2009年间年均蒸散量为 $209.025\pm 12.307\text{ mm}$ 。一年中蒸散最大值出现在5月,月均值为 $38.293\pm 3.193\text{ mm}$,此时冬季积雪已经大量融化,降水增加,植被进入生长季,造成地表蒸散增加。最小值出现在1月,月均值为 $1.115\pm 0.505\text{ mm}$,此时地面气温较低,植被停止生长,降水多以降雪形式累积在地面,地表蒸散最小。整个研究区地表蒸散的空间分布呈现明显的季节性差异。图8a给出了春、夏、秋、冬地表蒸散月均值的空间分布。春季蒸散高值区主要集中在东南部的天山山脉地区,西部最低,哈萨克斯坦境

内农田区的蒸散要高于草原区。和春季相比,夏季蒸散高值区主要集中在哈萨克斯坦北部和东北部,月均蒸散量可达 $80\sim 100\text{ mm}$ 之间。东南部的山区蒸散高值区在缩小,中部以及西南部的蒸散量依然最小,只有 10 mm 左右。秋季和冬季全区的蒸散量都很低,空间差异不明显,秋季月平均蒸散量在 $20\sim 30\text{ mm}$,冬季低于 10 mm 。与降水量(图8c)、气温(图8d)的空间分布对比,可见春季降水多发生在东南部海拔较高处,地表蒸散的空间分布与降水有较好的一致性。中亚的西南部沙漠区全年气温都很高,但春、夏、秋3季西南部蒸散都很低,只有冬季蒸散在西南部偏高,与气温空间分布较为一致。

比较不同植被覆盖情况下地表蒸散月际变化(图9),发现林地在所有的植被覆盖类型中平均蒸散量最大,夏季蒸散量可达到 183 mm ,其次为耕地,其余的依次为草地和裸地。不同月份变化趋势较为一致,一年中均先增加后降低。但最大值对应的月份不同,林地和农田在6月,月平均蒸散量在 50 mm 以上;草地在5月,月平均蒸散量在 $40\sim 50\text{ mm}$ 之间;而裸地在4月,月平均蒸散量低于 30 mm 。随

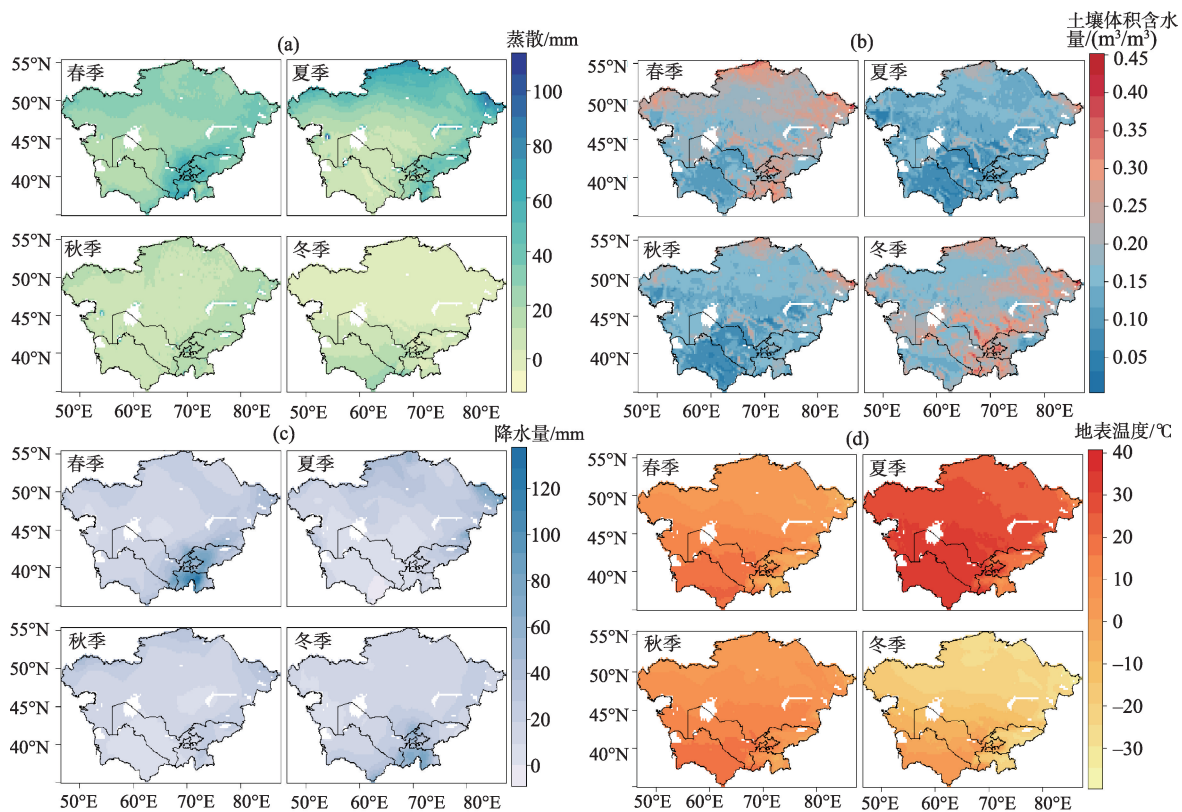


图8 中亚四季蒸散、土壤水、降雨和地表温度的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of evapotranspiration (ET), soil moisture, precipitation, and surface temperature in spring, summer, autumn, and winter in the Central Asia

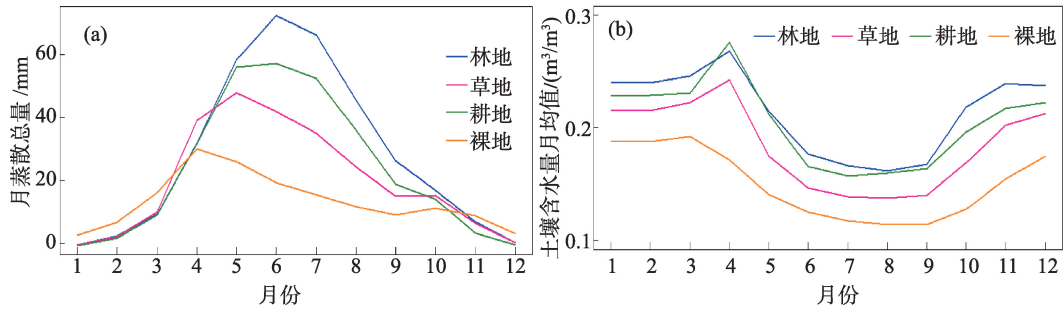


图9 不同植被覆盖下陆表蒸散和土壤水分月际变化

Fig.9 Monthly variation of evapotranspiration (ET) and soil moisture under different vegetation cover

着植被覆盖度降低,蒸散量峰值向前推移。裸地4—9月呈下降趋势,9—10月反而略有上升趋势,10—12月再缓慢下降。夏季由于植被蒸腾作用大于土壤蒸发,裸地蒸散量远小于植被区,冬季植被停止生长,植被区和裸地的蒸散量比较接近,11月至翌年3月裸地蒸散量反而大于植被区,耕地在冬季的蒸散量最低。中亚的裸地主要集中在西南部土库曼斯坦和乌兹别克斯坦,可以解释西南部在冬季是蒸散高值区。中亚一年中整体地表蒸散变化趋势和草地的大致相同。

2.4 中亚5国表层土壤含水量的时空分布特征

由于土壤水分的空间异质性特点,其空间分布模拟还是存在较大的不确定性,但依旧能反映出一些规律性。如图8b所示,西南部的干旱荒漠区始终是中亚地表最缺水的地区,土库曼斯坦的干旱情况是中亚5国中最严重的。在东南部的天山山脉和帕米尔高原区,由于冬季高山积雪和春季的融雪,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦始终是中亚地表土壤平均含水量最高的地区,高山上的一些冰川和融雪能够很好地补充下游的阿姆河和锡尔河等。从图中可以看出一部分的蒸散高值区也处在这2条河流域内。另外,在哈萨克斯坦北部,由于春季降水增加,植被生长,土壤水分含量较高;在中亚的东北部,主要植被覆盖为林地,土壤含水量在一年四季中都要高于其他地区。比较一年中不同植被覆盖情况下的表层土壤水分变化趋势(图9b),发现裸地的土壤水分在全年都要小于植被覆盖区,并在3月开始就进入下降的趋势,一直到9月才有上升的趋势,直到年底。林地的土壤水分略大于农田,其次是草地。耕地在3—4月的上升趋势明显,4月的表层土壤水分含量甚至要大于林地;从4月开始,地表蒸散增加,到了夏季时,表层土壤含水量达到最低值,并趋于稳定;从9月开始土壤含水量又呈增加趋势,到年

末为止。

3 讨论

在湿润气候条件下,土壤水分充足,蒸散主要受辐射、气温和降水等气象要素影响。但在中亚干旱的气候条件下,土壤水得不到降水的补充,地表蒸散受到限制,所以降水和土壤水分的变化都会对地表蒸散带来影响。由图10可见,冬季的降水量大于蒸散量,土壤变湿,到了春季,气温升高,地面积雪融化,土壤水分含量在4月份达到最大值,由于降水量增加和土壤水分充足,地表蒸散在5月达到最大值。夏季时,虽然气温和辐射很高,但由于降水和土壤水分持续降低的限制,地表蒸散反而呈持续减小的趋势。土壤水含量在8月达到最低值,而地表蒸散在9月份降低到一个相对谷值,地表蒸散与土壤湿度之间的响应存在着滞后效应。进入秋季

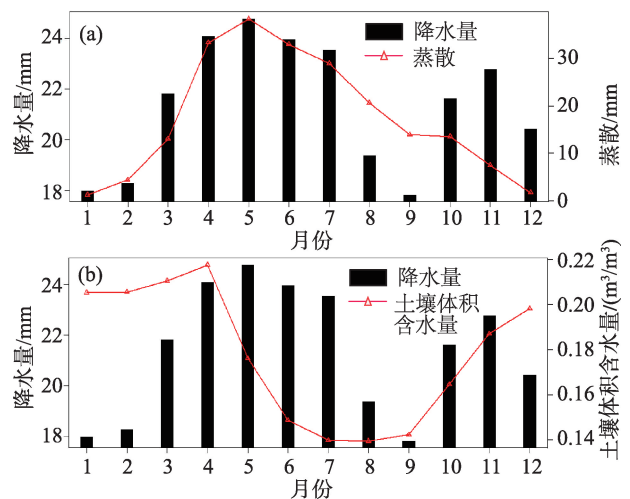


图10 不同月份降雨和地表蒸散、土壤含水量的对比
Fig.10 Comparison between monthly precipitation and evapotranspiration (ET), soil moisture

后,植被活动减少,地表温度降低,地表蒸散持续减小,土壤水分呈递增的趋势。不同植被覆盖也是影响降水和蒸散、土壤水分之间关系的重要因素。相关研究表明,草地的蒸发量会受到表层土壤水分的限制,而林地的蒸发量即使在干旱的条件下也能达到最大值^[9]。中亚属于干旱地区,植被覆盖相对较低,地表蒸散受到水分限制因素较大。降水和土壤水分的变化都会对地表蒸散量带来影响。分析不同季节、不同植被类型下蒸散和降水、土壤水分之间的相关性(表1),可知:夏季时,降水和蒸散、土壤水在不同植被覆盖下都具有很高的相关性,在0.9左右,这是因为夏季时三者都达到一年最低值,年际变化不大;冬季时,太阳辐射的减少导致地表温度较低,蒸散量很小,且土壤表层中的水会结冰,遥感观测以及模型模拟都存在较大的不确定性。所以三者之间的关系不明显;秋季时,降水和土壤水分之间相关性较强,且这种关系在裸地区域比植被覆盖区表现得更为明显;春季时降水和地表蒸散之间相关性则更强,主要是因为降雨集中在这个时段并且植被活动茂盛。

中国新疆地区和中亚5国之间相隔天山山脉,该地区气候类型也属于温带大陆性气候,地表蒸散发与土壤水空间分布特征与中亚类似。新疆的气象、水文资料更为齐全,之前有学者利用中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)大气近地面强迫资料,驱动CLM 3.5,对新疆地区地表蒸散和土壤湿度进行模拟,并与实际站点资料进行比对^[20-21]。发现模型能够很好地模拟蒸散和土壤湿度的时间连续变化,其中3—4月的高山融雪是导致土壤湿度出现较大增长趋势的主要原因,这也和本文的模拟结果

表1 不同植被覆盖、季节情况下蒸散和降水、土壤水之间相关性

Tab.1 Correlation between evapotranspiration and rainfall, soil water under different vegetation cover and in different seasons

	季节	林地	草地	耕地	裸地
蒸散与降水相关性	春季	0.480	0.790*	0.640*	0.900*
	夏季	0.870*	0.920*	0.950*	0.970*
	秋季	0.026	0.658*	0.482	0.773*
	冬季	-0.230	-0.510	-0.590	0.430
蒸散与土壤水相关性	春季	0.150	0.756*	0.721*	0.713*
	夏季	0.985*	0.842*	0.897*	0.946*
	秋季	0.558	0.657*	0.405	0.894*
	冬季	-0.260	0.130	-0.470	0.450

注:*表示 $P < 0.05$ 。

较为一致。

CLM 4.5陆面模式模拟地表蒸散和土壤水分的优点在于物理过程更接近于真实情况,充分考虑到植被生长、降雪等对陆-气系统能量、水循环的影响,可实现长时间连续模拟。但缺点在于模型较为复杂,关键变量、参数较多,需要配合验证数据进行评估和参数优化。陆表蒸散的验证数据一般来自于2种:一是单点尺度上的地表通量数据^[22];二是基于水量平衡原理,结合GRACE重力卫星数据、地表径流数据来计算区域内平均地表蒸散量^[23-25]。鉴于此,在今后的研究中,应考虑将遥感反演的地表数据(土壤水分、地表温度等)通过同化的方法融入陆面模式中,并在单点和流域2个尺度下对模型进行验证,优化模型参数。

4 结论

本文利用CLM 4.5陆面模型模拟了中亚地区月尺度陆地蒸散发和土壤水分含量,并且和其他相关产品进行了对比分析,研究了陆面蒸散和土壤湿度的时空分布特征以及和降水之间的相关性,得出以下主要结论:

(1) CLM 4.5模拟结果在区域尺度上和其他产品时间变化趋势较为一致,其中和GLDAS蒸散数据之间的差异主要在冬季,和GLEAM蒸散数据之间的差异主要在夏季,输入的降雪和植被覆盖数据差异是主要原因。

(2) CLM 4.5基本可以反映出中亚地区陆面蒸散和表层土壤水分的空间分布和时间变化趋势。全年蒸散大部分集中于春夏2季,整个中亚内的蒸散在5月达到一年的最大值,但不同植被覆盖区域最大值出现月份不同,林地和耕地出现在6月,草地出现在5月,裸地出现在4月。夏季中亚的蒸散高值区集中在哈萨克斯坦北部和东北部、东南部的山地区,对应主要的农田区和林地区,植被蒸腾占主导因素。春季东南部天山山脉和帕米尔高原是蒸散高值区,主要因为气温升高,山上积雪融化,为中亚主要河流提供水源,并且该地区春季降水量较大,土壤水充足,地表蒸散发充分。蒸散低值区主要在西南的土库曼斯坦和乌兹别克斯坦,地表覆盖以荒漠为主,植被覆盖较少,降水也较少,导致地面蒸散量较低。

(3) 中亚表层土壤水分主要集中于春、冬2季。冬季陆面蒸散低,降水大多储存在表层土壤内或者以积雪的形式覆盖在地面上,春季气温升高,积雪融

化下渗透到土壤中,土壤水分持续增加,4月份达到峰值,夏季蒸散增加,降水减少,土壤水分持续下降,9月份达到最低值,进入秋冬季后蒸散降低,土壤水分呈上升趋势。中亚土壤水分高值区集中在北部和东北部的林地、农田区,以及天山山脉和下游的阿姆河、锡尔河流域区,西南部的荒漠区依然是低值区。

参考文献(References)

- [1] 马明清,袁武,葛全胜,等。“一带一路”若干区域社会发展态势大数据分析[J].地理科学进展,2019,38(7): 1009-1020. [Ma Mingqing, Yuan Wu, Ge Quansheng, et al. Big data analysis of social development situation in regions along the Belt and Road. Progress in Geography, 2019, 38(7): 1009-1020.]
- [2] 陈艺文,李二玲。“一带一路”国家粮食贸易网络空间格局及其演化机制[J].地理科学进展,2019,38(10): 1643-1654. [Chen Yiwen, Li Erling. Spatial pattern and evolution of cereal trade networks among the Belt and Road countries. Progress in Geography, 2019, 38(10): 1643-1654.]
- [3] 杨胜天,于心怡,丁建丽,等.中亚地区水问题研究综述[J].地理学报,2017,72(1): 79-93. [Yang Shengtian, Yu Xinyi, Ding Jianli, et al. A review of water issues research in Central Asia. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 79-93.]
- [4] Li L, Luo G, Chen X, et al. Modelling evapotranspiration in a Central Asian desert ecosystem [J]. Ecological Modelling, 2011, 222(20): 3680-3691.
- [5] 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. [Li Qin, Chen Xi, Bao Anming, et al. Evapotranspiration estimation in arid areas based on SEBS Model. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 195-201.]
- [6] 李超凡,罗格平,李均力,等.近20 a中亚净初级生产力与实际蒸散发特征分析[J].干旱区地理,2012,35(6): 919-927. [Li Chaofan, Luo Geping, Li Junli, et al. Net primary productivity and actual evapotranspiration of Central Asia in recent 20 years. Arid Zone Research, 2012, 35(6): 919-927.]
- [7] 张建财,张丽,郑艺,等.基于LPJ模型的中亚地区植被净初级生产力与蒸散模拟[J].草业科学,2015,32(11): 1721-1729. [Zhang Jiancai, Zhang Li, Zheng Yi, et al. Simulation of vegetation net primary productivity and evapotranspiration based on LPJ model in central Asia. Pratacultural Science, 2015, 32(11): 1721-1729.]
- [8] Klein I, Gessner U, Kuenzer C. Regional land cover mapping and change detection in Central Asia using MODIS time-series [J]. Applied Geography, 2012, 35(1-2): 219-234.
- [9] Iwao K, Nishida K, Kinoshita T, et al. Validating land cover maps with degree confluence project information [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(23): L23404. doi: 10.1029/2006gl027768.
- [10] Dickinson R, Henderson-Sellers A, Kennedy P. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1 as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech Note, No. NCAR/TN387+STR. Boulder, USA: National Center for Atmospheric Research, 1993. doi: 10.5065/D67W6959.
- [11] Dai Y J, Zeng Q C. A land surface model (IAP94) for climate studies part I: Formulation and validation in off-line experiments [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1997, 14: 433-460. doi: 10.1007/s00376-997-0063-4.
- [12] Bonan G B. A land surface model (LSM Version 1. 0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide [R]. NCAR Technical Note, No. NCAR/TN-417+STR. Boulder, USA: National Center for Atmospheric Research, 1996. doi: 10.5065/D6DF6P5X.
- [13] Lawrence P J, Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0) [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 112(G1): 252-257.
- [14] Lawrence P J, Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the community land model (CLM 3.0) [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(G1): G01023. doi: 10.1029/2006JG000168.
- [15] 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.
- [16] Martens B, Waegeman W, Dorigo W A, et al. Terrestrial evaporation response to modes of climate variability [J] NPJ Climate and Atmospheric Science, 2018. doi: 10.1038/s41612-018-0053-5.
- [17] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, et al: Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth [J]. Science, 2017, 356: 6343. doi: 10.1126/science.aal1727.
- [18] Wang W, Cui W, Wang X, et al. Evaluation of GLDAS-1 and GLDAS-2 forcing data and Noah model simulations over China at the monthly scale [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(11): 2815-2833.
- [19] Detto M, Montaldo N, Albertson J D, et al. Soil moisture and vegetation controls on evapotranspiration in a heterogeneous Mediterranean ecosystem on Sardinia, Italy [J]. Water Resources Research, 2006, 42(8): W08419. doi: 10.1029/2005WR004693.
- [20] 赖欣,文军,岑思弦,等. CLM 4.0模式对中国区域土壤湿度的数值模拟及评估研究[J].大气科学,2014,38(3): 499-512. [Lai Xin, Wen Jun, Cen Sixuan, et al. Numerical simulation and evaluation study of soil moisture

- over China by using CLM 4.0 model. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(3): 499-512.]
- [21] 孟现勇. 基于改进的CLDAS驱动CLM 3.5及SWAT模式的陆分量模拟及验证 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016. [Meng Xianyong. Study on land-surface process simulation and validation using CLM 3.5 and SWAT model driven by improved CLDAS. Urumqi, China: Xinjiang University, 2016.]
- [22] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(China-FLUX)能量平衡闭合状况的评价 [J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(S2): 46-56. [Li Zhengquan, Yu Guirui, Wen Xuefa, et al. Energy balance closure at China FLUX sites. Scientia Sinica Terrae, 2004, 34(S2): 46-56.]
- [23] Swenson S, Wahr J. Estimating large-scale precipitation minus evapotranspiration from GRACE satellite gravity measurements [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 7 (2): 252-269.
- [24] Ahmed M, Sultan M, Yan E, et al. Assessing and improving land surface model outputs over Africa using GRACE, field, and remote sensing data [J]. Surveys in Geophysics, 2016, 37(3): 529-556.
- [25] Li X, Wang L, Chen D, et al. Seasonal evapotranspiration changes (1983-2006) of four large basins on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 119(23): 13079-13095.

Estimation of monthly evapotranspiration and soil moisture in the Central Asia

JIANG Bo^{1,2}, TIAN Jing^{1*}, SU Hongbo¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There is insufficient study of evapotranspiration (ET) and soil moisture (SM) in arid ecosystems such as the Central Asia. To address this issue, we applied the land surface model (CLM 4.5) to simulate monthly ET and SM in the Central Asia from 1980 to 2009. Other products including GLDAS (Global Land Data Assimilation System), GLEAM (Global Land-surface Evaporation Amsterdam methodology), and AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) were used to compare with the simulated results. The comparison indicates that the simulated results agree favorably with other products. Most of the annual evapotranspiration concentrates in spring and summer, reaching its maximum in May. In summer, the high evapotranspiration areas in the Central Asia are concentrated in the northern and northeastern corner of Kazakhstan, and in the southeastern mountainous areas. Vegetation transpiration plays a leading role in the main farmland and forest areas. In spring, the Tianshan Mountains and the Pamir Plateau in the southeast are the high value areas of evapotranspiration, mainly because with the high rainfall and the beginning of snow melting, there is sufficient water for evapotranspiration. The spatial patterns of annual ET and SM in the Central Asia show that the areas with high ET are distributed in the northern and northeastern corner of Kazakhstan and in the southeastern mountainous areas, and the low ET areas are mainly located in Turkmenistan and Uzbekistan, where desert is the main land cover type. The results of simulated surface soil moisture show that in winter, land surface evapotranspiration is low, and precipitation is mostly stored in the surface soil or in snow cover. In spring, air temperature rises, snow melts, and water seeps into the soil. Soil moisture increases continuously, reaching its peak in April. In summer soil moisture continues to decrease, and reaches its lowest value in September. In autumn and winter, evapotranspiration decreases and soil moisture increases. The high value areas of soil moisture in the Central Asia are concentrated in the woodland and farmland areas in the northern and northeastern part, as well as the Amu River and Sir River basins in the Tianshan Mountains and downstream, while the desert areas in the southwest are low value areas. In summer rainfall, evapotranspiration, and soil moisture are low, so the correlation between them is very high; winter precipitation and soil moisture are highly correlated, especially in barren areas; in the case of high vegetation coverage, spring rainfall and evapotranspiration are highly correlated, and the correlation between soil moisture and rainfall, evapotranspiration is low, and a negative correlation can be observed. Overall, the result of this study will lay foundation for further research on water issues in the Central Asia.

Keywords: evapotranspiration; soil moisture; CLM 4.5; the Central Asia