

基于 SWAT 模型的根河流域蒸散量时空分布特征

王雅倩¹, 岳永杰¹, 乌云珠拉², 伊丽茜¹, 李旭¹, 赵恺¹

(1.内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010010; 2.青海省乌兰县气象局, 青海 海西州 817100)

摘 要:为了研究根河流域 38 年间蒸散(ET)、潜在蒸散(PET)的年际、年内变化过程及空间分布格局,基于 SWAT 模型分析了各气象要素与蒸散的相互关系。结果表明:(1) 根河流域 1980—2017 年 ET 值、PET 值整体呈增加趋势。(2) 根河流域 ET 与 PET 的年内变化总体上均呈先增大后减小的单峰型分布。(3) 根河流域的 ET 值在空间上呈现流域上游高,中下游低的分布格局;PET 值在空间上呈现西南>东北>东南的分布规律。(4) 根河流域的生长期、完全冻结期、融冻期 ET 值均呈现增加趋势,始冻期 ET 值呈降低趋势,4 个时期平均 ET 值差异性表现为生长期>融冻期>始冻期>完全冻结期。(5) 根河流域多年 ET 值在不同土地覆被类型的大小为林地>草地>耕地>建设用地>沼泽地;而 PET 的排序为耕地>建设用地>林地>草地>沼泽地。(6) 根河流域蒸散量与降水量和气温呈显著正相关。研究结果对根河流域的蒸散量变化及其冻融作用对当地的影响有着重要的参考意义。

关键词:蒸散; 根河流域; 时空分布; 冻土区; SWAT 模型

中图分类号:P333.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0256-08

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Evapotranspiration in Genhe River Basin Based on Soil and Water Assessment Tool Model

WANG Yaqian¹, YUE Yongjie¹, WU Yunzhula², YI Lixi¹, LI Xu¹, ZHAO Kai¹

(1.College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China;

2.Meteorological Bureau of Wulan County, Haixi Prefecture, Qinghai 817100, China)

Abstract:To analyze the temporal and spatial distribution characteristics of evapotranspiration and potential evapotranspiration in Genhe River Basin of Erguna River system, soil and water assessment tool model, and correlation analysis were used to study the interannual and intra annual variation process and spatial distribution pattern of evapotranspiration and potential evapotranspiration in Genhe River Basin in the past 38 years. The variation characteristics of evapotranspiration and potential evapotranspiration of different land use types were analyzed, and the relationship between meteorological factors and evapotranspiration was discussed. The results show that: (1) from 1980 to 2017, the ET and PET of Genhe River Basin showed an overall increasing trend; (2) the annual variation of ET and PET in Genhe River Basin increased first and then decreased; (3) the distribution pattern of ET in Genhe River Basin was higher in the upper reaches and lower in the middle and lower reaches, and the peak value of ET appeared in the upper reaches; the spatial distribution pattern of PET follows the sequence: southwest>northeast>southeast; there were obvious spatial differences in ET and PET in the upper, middle and lower reaches of Genhe River Basin; (4) in the Genhe River Basin, the ET in the growth period, the complete freezing period and the thawing period all showed the increasing trend, while the ET in the initial freezing period showed the decreasing trend; the average ET of the four periods showed the significant difference, which showed the order: the growth period>the thawing period>the initial freezing period>the complete freezing period; (5) in Genhe River Basin, the order of annual ET mean value in different land cover types was: woodland>grassland>cultivated land >construc-

收稿日期:2021-01-31

修回日期:2021-02-21

资助项目:国家自然科学基金项目(31660233);内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD0070402)

第一作者:王雅倩(1996—),女,内蒙古呼和浩特人,在读硕士研究生,研究方向为森林生态。E-mail:1647500877@qq.com

通信作者:岳永杰(1976—),男,内蒙古赤峰人,教授,硕士生导师,研究方向为森林生态、水文。E-mail:wolongyue@126.com

tion land>swampland, while the order of PET was farmland>construction land>woodland>grassland>marshland; (6) there is a significant positive correlation between evapotranspiration and precipitation and temperature in Genhe River Basin. The results of this study have important reference significance for evapotranspiration change and freeze-thaw effect on the local ecosystem.

Keywords: evapotranspiration; Genhe River Basin; temporal and spatial distribution; permafrost region; soil and water assessment tool model

蒸散主要包括植被蒸腾、土壤水分蒸发以及截留降水或露水的蒸发,是陆地生态系统降水再循环的主要来源,驱动着土壤—植被—大气连续体的物质运输和能量交换^[1],是水—碳—能量循环的重要组成部分^[2],蒸散研究备受国内外水文学界的关注,成为国际上的焦点问题之一^[3]。目前,国内学者研究了不同地区蒸散量的时空变化特征,如大沽河流域^[4]、乌江流域^[5]、东江流域等^[6],大多是对暖温带、亚热带地区的蒸散变化规律及其成因的研究,评价区域水资源或评估作物需水量等生态环境问题。对于高寒区典型流域的蒸散量研究比较少,高寒区由于存在复杂的生态水文过程和脆弱的生态系统,当受到区域气候变化和人类活动干扰时,极易遭到破坏且难以修复,因此,对高寒区蒸散的变化过程和影响机制研究对进一步了解区域生态系统的水文过程具有重要意义。

自道尔顿提出蒸发计算公式以来,蒸发计算方法有很多种,因为蒸散的实测数据较难获取,许多研究以模型估算和预测潜在蒸散和实际蒸散进行^[7]。在众多的模型中,Penman 模型作为基准公式存在,后经过不断改进得出目前广泛应用的 Penman-Monteith 公式,此模型在 1998 年经由联合国粮食及农业组织(FAO)的推荐,成为估算参考作物蒸散量的标准方法^[8]。而 SWAT 模型中计算蒸散量的公式就包括 Penman-Monteith 公式,SWAT 模型自带了许多模型数据库,还具有内嵌天气发生器(Weather Generator)可以灵活地解决资料缺失问题^[9]。SWAT 模型是美国农业部农业研究局开发的一种分布式流域水文模型,具有良好的物理基础,可以结合 GIS 和 RS 提供的空间数据模拟地表径流、蒸散和水质状况等,从而预测气候变化、调整土地利用措施等。Yang 等^[10]通过建立合适的 SWAT 模型,分析了加拿大农业流域目前水资源状况及实施有益的管理措施进行水土保持;Koirala 等^[11]把 SWAT 模型应用于美国克林奇河上游流域,分析了气候变化与水文的响应机制。张蕾娜等^[12]成功地构建了适用于云州水库流域的 SWAT 模型;王建鹏等^[13]基于改进的 SWAT 模型对不同灌溉模式下的 ET 进行了模拟,得出在不同模式下 ET 的变化规律。

根河流域所处寒温带地区,有着丰富的水土资源,分布着大面积多年冻土和季节性冻土,根河流域近地表土壤的季节性冻融循环影响着地表能量和水分交换。近几十年来,随着全球气候变暖,根河流域气温呈明显上升趋势。温度的升高改变了冻土的冻融过程。总的来说,具体表现为最大冻土深度减小、冻结开始日期推迟以及解冻开始日期提前等现象^[14],中纬度高寒地区活动层和多年冻土变化显著。本文以 SWAT 模型模拟计算根河流域 1980—2017 年的数据为基础,分析根河流域蒸散量的时空变化特征。通过此研究,探讨土壤冻融对根河流域生态系统水分交换的影响,同时为根河流域水资源的规划与管理、气候及生态环境的改善提供科学的理论依据。

1 研究区概况

根河流域位于东经 119°—123°北纬 49.6°—51.5°的区域内,海拔 1 241 m,全长 415 km。根河流域地处寒温带大陆性季风气候区,夏季短暂且温暖多雨,冬季漫长寒冷且积雪量大,全年无霜期为 90 d 左右,年平均气温为 -4.9℃,年平均降水量为 411.75 mm,年降水量多集中在 7—8 月^[15]。根河属于黑龙江额尔古纳水系,发源于大兴安岭伊吉奇山西南部的萨吉气林场。地势东北高西南低,从根河上游河源周围平顶山海拔 1 451 m,沿根河的河谷向西南到斯捷帕尼哈山海拔 1 174 m。根河流域森林土壤的地带性结构简单,区域土层较浅,是典型的地带性土壤—棕色针叶林土^[16]。在山顶岗梁上分布有零星粗骨土,沟谷洼地和山沟蝶形低地分布有沼泽土,河流两侧阶地分布有黑钙土、草甸土等土壤。研究区内植物资源丰富,拥有我国唯一的典型寒温带明亮针叶林,包含多年冻土发育指示性植物兴安落叶松林、樟子松林、白桦林、山杨林等(图 1,表 1)。

2 研究方法

2.1 流域模型的建立

首先根据 Google Earth 估计根河流域的坐标范围下载相应的 DEM(Digital Elevation Model, Landsat 8) 分幅图,格式为 ESRI Grid,DEM 数据下载于

地理空间数据网 (<http://www.gscloud.cn/>), 在 ArcGIS 10.2 平台上进行拼接、投影转换、掩膜提取等一系列工作得到研究流域 DEM 图。然后下载土地利用数据 (LUCC), 根据流域掩膜数据对其进行裁剪, 获取研究区土地利用数据, 重新划分土地利用类型, 制作土地利用检索表, 土地利用数据下载于中国科学院资源环境中心 (<https://www.resdc.cn>)。分辨率为 1 km。接着下载土壤类型数据, 同样进行裁剪, 得到研究区土壤类型图进行遥感解译, 并制作土壤类型检索表, 土壤类型数据下载于寒旱区科学数据中心, 分辨率为 1 km, 土壤数据库和土地利用数据库结合 ArcGIS 10.2 和 SPAW 软件建立。根河流域内设有 17 个气象站, 由于设备齐全程度及 1980—2017 年数据的完整性差异, 气象数据主要来源于额尔古纳气象站、根河气象站、图里河气象站, 均为国家一级气象站点, 分布于根河流域上、中、下游, 相关气象因子有降水量、气温、相对湿度等基础数据, 实测气象数据建立 SWAT 模型流域气象数据库。

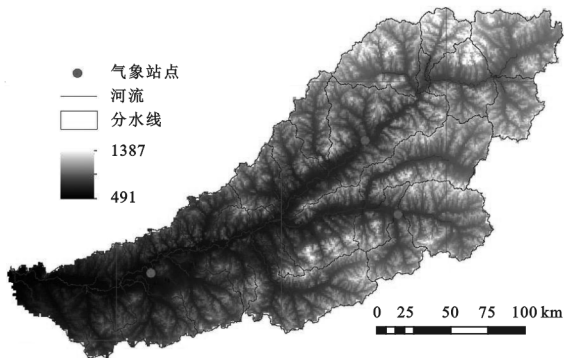


图 1 研究区地理位置

表 1 气象站点位置

编号	站名	经度 E	纬度 N	传感器海拔高度/m
50425	额尔古纳	120.18°	50.25°	581.4
50431	根河	121.52°	50.78°	717.4
50434	图里河	121.68°	50.48°	732.6

将 DEM 数据进行“无洼”处理, 分析河流流向以得到流向栅格数据, 在 ArcGIS 10.2 平台上进行大地图代数、栅格计算等空间分析获得流域网格栅格数据, 之后进行栅格矢量化, 根据出水口确定流域河网及面积, 然后进行子流域划分 (SUB), 集水面积的大小决定 SUB 数量的多少, 最后划分为 28 个 SUB。依据根河流域 2018 年土地利用类型及土壤类型在 SUB 的基础上划分水文响应单元 (HRU), 在 SUB 中具有相同土地利用类型、土壤类型、坡度及坡向的划分为一个 HRU 再进行计算, 本文的百分比阈值为 0, 最终划分为 1 380 个 HRU。HRU 分布确定之后,

输入用于流域模拟的气象数据库, 在 ArcSWAT 中加载气象资料, 各个 SUB 与加载的气象数据库通过测站链接就近选择气象站点数据, 这也是 SWAT 模型计算整个流域蒸散数据的原理。最后经过参数敏感性分析及模型率定, 使用 SUB 文件、rch 文件、HRU 文件等进行蒸散数据分析。

2.2 蒸散量数据计算方法

2.2.1 潜在蒸散的计算 Penman-Monteith 法包含维持蒸发所需能量、水汽输送路径长度、空气动力学因子以及表面阻抗因子, 其方程如下:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{\text{net}} - G) + \rho_{\text{air}} \cdot C_p \cdot \frac{e_z^0 - e_z}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{r_c}{r_a})}$$

式中: λE 表示潜热通量密度 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; E 表示蒸发率 (mm/d); Δ 表示饱和水汽压—温度关系曲线的斜率; H_{net} 表示净辐射量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; G 表示到达地面的热量通量密度 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; ρ_{air} 表示空气密度 [kg/m^3]; C_p 表示恒压下的特定热量 [$\text{MJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]; e_z^0 表示高度 z 处的饱和水汽压 (kPa); e_z 表示高度 z 处的水汽压 (kPa); γ 表示湿度计算常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); r_c 表示植物冠层的阻抗 (s/m); r_a 表示空气层的扩散阻抗 (s/m)。

对于中性稳定大气下水分供给充足的植物, 在假定对数风速分布下, Penman-Monteith 方程为:

$$\lambda E_1 = \frac{\Delta \cdot (H_{\text{net}} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot \frac{(0.622\lambda \cdot \frac{\rho_{\text{air}}}{P})(e_z^0 - e_z)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{r_c}{r_a})}$$

式中: λ 表示蒸散潜热 (MJ/kg); E_1 表示最大散发率 (mm/d); K_1 表示确保两个变量单位统一所需的换算系数 (当 u_z 的单位是 m/s 时, $K_1 = 8.64$ 万); P 表示大气压 (kPa)。

2.2.2 实际蒸散的计算 确定潜在蒸散总量后就可以计算实际蒸散了。SWAT 模型会先计算截留雨量的蒸发。如果潜在蒸散 E_0 小于冠层持有的自由水量 R_{INT} , 则:

$$E_a = E_{\text{can}} = E_0$$
$$R_{\text{INT}(f)} = R_{\text{INT}(i)} - E_{\text{can}}$$

式中: E_a 表示某天流域的实际蒸散量 (mm); E_{can} 表示某天冠层持有的自由水分的蒸发量 (mm); E_0 表示某天的潜在蒸散量 (mm); $R_{\text{INT}(f)}$ 表示某天冠层持有的最终自由水量 (mm); $R_{\text{INT}(i)}$ 表示某天冠层持有的初始自由水量 (mm)。

如果潜在蒸散 E_0 大于冠层持有的自由水量

R_{INT} , 则:

$$E_{can}=R_{INT(i)}$$
$$R_{INT(f)}=0$$

当植被冠层持有的自由水分完全蒸发掉后,剩余的蒸发需水量($E'_0=E_0-E_{can}$)来自植被与积雪/土壤。

接下来开始计算蒸散量,其公式如下:

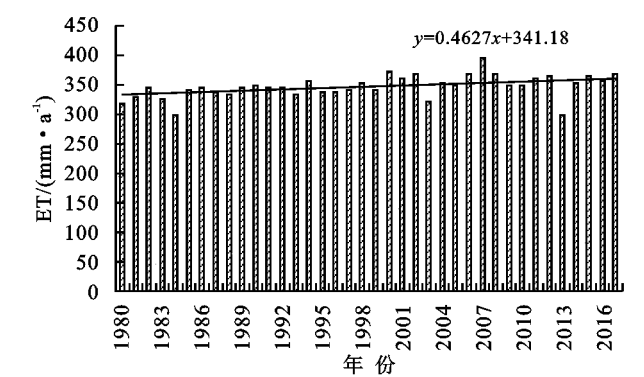
$$E_t=\frac{E'_0 \cdot LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0$$
$$E_t=E'_0 \quad LAI > 3.0$$

式中: E_t 表示某天的最大蒸散量(mm); E'_0 表示考虑冠层自由水分蒸发后的潜在蒸散量(mm);LAI 表示叶面积指数。

最后计算升华和土壤蒸发,其公式为:

$$E_s=E'_0 \cdot cov_{sol}$$

式中: E_s 表示某天升华/土壤蒸发的最大量(mm); E'_0 表示考虑冠层自由水分蒸发后的潜在蒸散量(mm); cov_{sol} 表示土壤覆盖指数。



3 结果与分析

3.1 根河流域蒸散量时间变化特征

由图 2 可知,1980—2017 年根河流域 ET 年际波动较小,年均值变化范围为 280.20~410.14 mm/a,变化率为 0.46 mm/a,整体呈增加趋势。多年平均 ET 值为 350.16 mm,明显超出多年平均值的年份为 1988 年、2013 年,其中 2013 年 ET 最高,超出平均值 59.98 mm,相对变化率达到了 17.13%;ET 最小值出现在 1980 年。PET 的年均值变化范围为 665.27~877.22 mm/a,变化率为 1.82 mm/a,整体呈增加趋势。多年平均 PET 值为 771.61 mm,显著超过多年平均值的年份是 2000 年、2007 年,其中 2007 年 PET 最高,超出平均值 105.61 mm,相对变化率达到了 13.69%;PET 最小值出现在 1984 年。综上所述,近 40 a 来,蒸散量大部分年份相对稳定,少数几年 ET 和 PET 高低相差悬殊,且 ET 和 PET 均呈持续增加趋势。

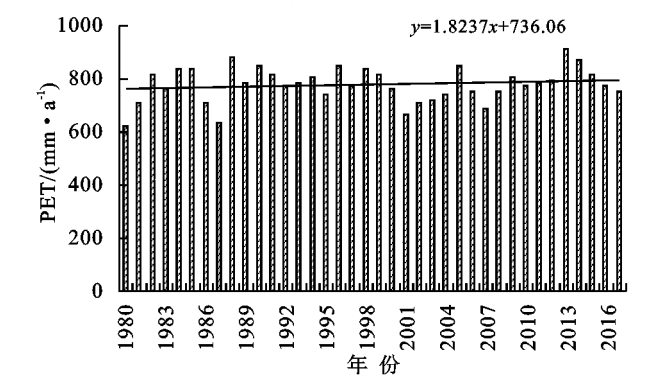


图 2 根河流域 ET,PET 的年际变化

由图 3 可知根河流域 ET,PET 的年内变化特征,两类蒸散主要发生在 5—9 月,呈现出以 8 月为峰值的单峰型分布。根河流域多年各月 ET 均值波动在 0.59~83.93 mm 范围内,ET 主要集中在 5—9 月,3—5 月快速增长,8 月达到峰值 83.93 mm,9—11 月迅速下降,1 月降至年内最低值 0.59 mm。据根河流域的气候特征可知,5—9 月是该流域温度最高、降水丰富、地面蒸发和植物蒸腾作用较旺盛的时期,良

好的水热条件和高风速为蒸散提供了有利条件;9 月气温逐渐降低,树木开始掉叶保持自身水分,抵御寒冷的气候,向着不利于蒸散的条件转变;1 月、2 月、12 月天气寒冷,降水较少且土壤水分冻结,植物大部分枯萎,蒸腾作用减弱许多,因此 ET 值达到年内最小。根河流域多年各月 PET 均值波动在 0.87~193.51 mm 范围内,8 月份峰值为 193.51 mm,1 月份为年内最低值 0.87 mm。

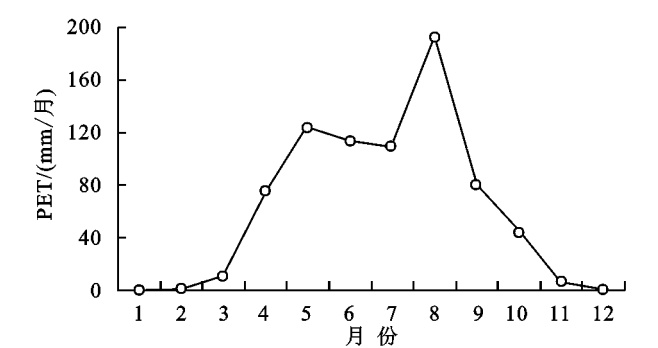
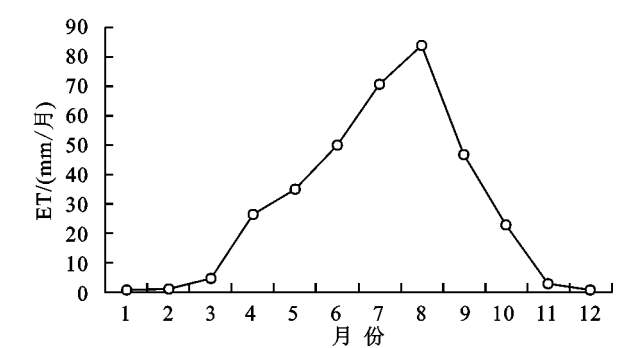


图 3 根河流域 ET,PET 年内分布

3.2 根河流域蒸散量空间分布特征

3.2.1 ET 与 PET 的空间分布特征 由图 4A 可见,根河流域 1 380 个 HRU 的 ET 年均值范围在 231.83~1 180.15 mm,整体上呈上游高,中下游低的分布格局。根河流域年均 ET 峰值出现在上游,上游主要分布的是林地与高覆盖度草地,植被叶面积较大,蒸腾作用强,同时根河及其支流周围水汽充足,ET 值明显高于其他地方;而中游主要分布的是疏林地与高覆盖度草地,因此 ET 较小于上游;下游主要分布的是低覆盖度草地、耕地、沼泽地以及建设用地,植物叶面积较小,蒸腾作用较弱,所以下游的植被蓄水能力相

对较差,ET 值也较小。

由图 4B 可知,根河流域 1 380 个 HRU 的 PET 年均值范围在 581.64~2 214.50 mm,整个流域的 PET 值呈现西南>东北>东南的分布。东北区域有大面积林地且林种丰富;而东南区域是林草相间,土壤含水量不及东北区域高,故东北区域的 PET 值高于东南区域。西南区域属于根河流域下游,土壤肥沃,草地及作物分布广泛,且南面有部分区域分布了较多的小面积水域,而上、中游多为山地,所以西南区域在充分供水条件下,PET 达到流域中最高值。总体来说,根河流域上中下游 ET 及 PET 值具有明显的空间差异性。

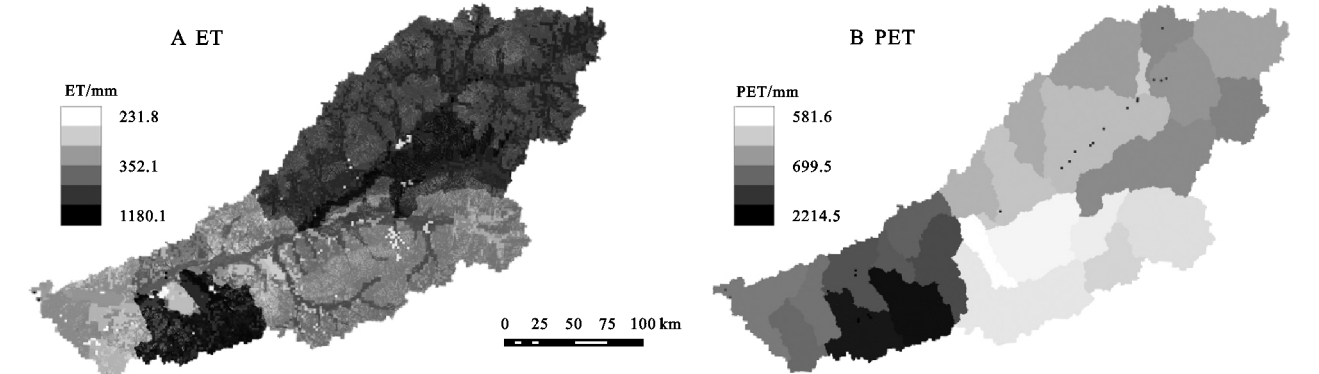


图 4 根河流域多年 ET,PET 空间分布

3.2.2 不同冻融时期蒸散量的分布特点 由表 2 可知,为了更好地分析 ET 值,将分成 4 个时期进行讨论,生长期(5—9 月)、始冻期(10—11 月)、完全冻结期(12—翌年 2 月)和融冻期(3—4 月)。

表 2 1980—2017 年根河流域月均气温、降水、日照时数

月份	平均气温/℃	降水量/mm	日照时数/h
1 月	-28.32	5.04	5.25
2 月	-23.12	4.36	7.18
3 月	-12.17	7.61	8.57
4 月	1.04	19.84	8.42
5 月	9.66	32.30	8.66
6 月	15.75	86.05	8.55
7 月	18.24	123.50	7.39
8 月	15.66	109.44	7.20
9 月	8.07	48.29	6.97
10 月	-1.68	17.58	6.43
11 月	-15.59	9.68	5.31
12 月	-25.57	7.84	4.33

由图 5 可知,生长期 ET 年均值在 561.98~846.43 mm 范围内波动,变化率为 1.20 mm/a,整体呈增加趋势。生长期降水丰沛,温度较高,植被蒸腾作用较强,流域内 ET 值在 8 月份达到全年最大。始冻期 ET 年均值在 87.72~223.87 mm 范围内变化,变化

率为-0.68 mm/a,整体呈降低趋势。始冻期气温逐渐降低,土壤水分开始冻结,植物代谢活动减少,地表蒸散量逐渐回落。完全冻结期 ET 年均值在 6.08~11.68 mm 范围内浮动,变化率为 0.01 mm/a,整体基本不变。完全冻结期气温达到全年最低,降水量很小,地下水完全冻结,不利于植被生长,ET 值达到全年最小。融冻期 ET 年均值在 93.81~251.00 mm 范围内变动,变化率为 0.45 mm/a,整体呈增加趋势。融冻期随着气温回暖,土壤逐渐解冻,植被开始萌发,蒸发与蒸腾作用增强,蒸散量逐渐增加。ET 在 4 个时期的年均值分别为 696.39 mm,156.07 mm,8.94 mm,190.79 mm,分别占年内蒸散量的 66.18%,14.83%,0.86%,18.13%。

3.2.3 不同土地利用类型蒸散量变化特征 由图 6 看出,ET 年均值在不同土地覆被类型下的大小排序为:林地>草地>耕地>建设用地>沼泽地;而 PET 年均值排序为:耕地>建设用地>林地>草地>沼泽地。从图 6 可以看出 PET 与 ET 之间的差值,能够很好地反映区域内不同土地利用类型的自然水分状况,差值越小自然水分越充足。林地的 ET 值最高,其次为草地、耕地、建设用地以及沼泽地。究其根本,一方面,森林资源丰富且根系吸水生理特性强,利于蒸腾的发生;另一方面,高郁闭度乔木冠层下覆盖的

低矮植物也贡献了森林的整体 ET 值。研究区草地多为高覆盖度草地,水土保持能力较强,ET 值也较高;沼泽地植被覆盖度低,同样的水热条件下,其 ET

值较低。总体说明植被具有涵养水源和保持水土的功能,可以改善区域内蒸散的大小,林地、草地的表现尤为突出。

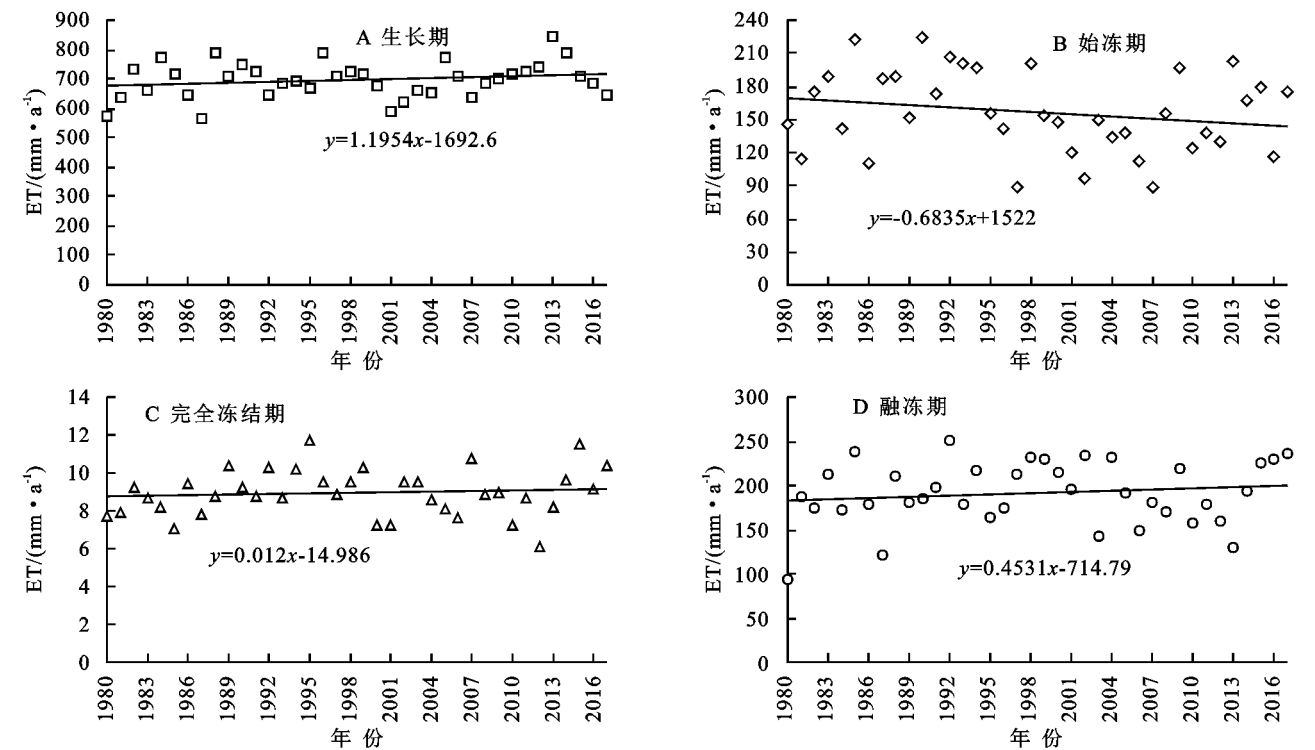


图 5 根河流域不同冻融时期 ET 的变化

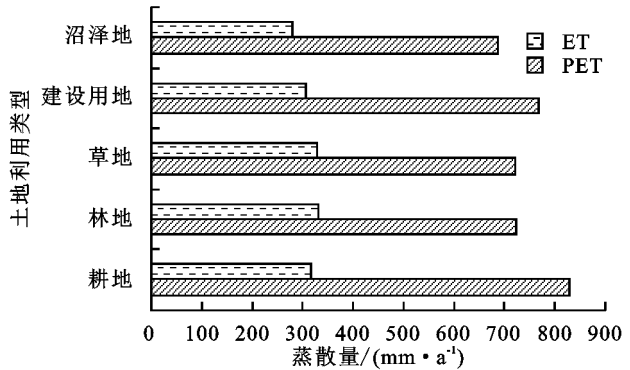


图 6 不同土地利用类型年均 ET,PET 值

3.3 蒸散量与气候的相关分析

运用 SPSS 软件对 1980—2017 年日气象数据进行主成分分析。由表 3 计算结果可知,原始变量与影响因素变量之间的依赖程度在 71%左右,第一主成分的方差贡献率达到了 46.85%,说明原始变量与提取的主成分之间的相关性较大,提取的主成分具有一定的代表性。

计算结果表明(表 4),第一主成分为平均相对湿度、降水量、日照时数和平均风速,方差贡献率为 46.85%,当 ET 值增大时,平均相对湿度、降水量和平均风速增大,日照时数减小。湿度变化直接影响 ET 值的大小,风能将空气中的 O₂,CO₂,热量等进行物质交换与输送,促进水分的蒸散速率。第二主成分

是平均气温,方差贡献率为 24.17%,影响程度较大,当 ET 值增大时,平均气温升高。因此,全球变暖也是根河流域 ET 值呈增大趋势的主要因素,温度的升高可促进边界层水热交换,从而提高蒸散速率。

表 3 主成分分析

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.342	46.846	46.846	2.342	46.846	46.846
2	1.209	24.174	71.020	1.209	24.174	71.020
3	0.627	12.536	83.556			
4	0.439	8.789	92.344			
5	0.383	7.656	100.00			

表 4 主成分分析成分载荷矩阵

成分	主成分 1	主成分 2
平均风速	0.579	−0.564
平均气温	−0.509	0.714
平均相对湿度	0.803	0.073
降水量	0.789	0.372
日照时数	−0.694	−0.487

为进一步探讨气象因子对 ET 值的影响,将 1980—2017 年平均风速、平均气温、平均相对湿度、

降水量和日照时数在 ET 值的控制下进行相关性分析,如表 5 所示。

结果显示,平均气温与平均风速和平均相对湿度呈显著负相关;平均相对湿度与降水量呈显著正相

关,与日照时数和平均气温呈显著负相关;日照时数与平均相对湿度和降水量呈显著负相关;ET 值与降水量和气温呈显著正相关,且 ET 值与降水量相关性最大,相关性系数为 0.67。

表 5 气象因子间及气象因子与蒸散发的相关分析

变量	平均风速	平均气温	平均相对湿度	降水量	日照时数
平均风速	1.000	−0.448**	0.290	0.223	−0.202
平均气温	−0.448**	1.000	−0.334*	−0.163	0.039
平均相对湿度	0.290	−0.334*	1.000	0.561**	−0.428**
降水量	0.223	−0.163	0.561**	1.000	−0.571**
日照时数	−0.202	0.039	−0.428**	−0.571**	1.000
日均 ET	−0.068	0.344*	0.186	0.669**	−0.273

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4 讨论与结论

4.1 讨论

根河流域 1980—2017 年 ET 值整体呈增加趋势,与泾河流域^[17]和青藏高原高寒草甸地区^[18]研究结果一致,表明由于气温的升高使得终年冻土带退化迫使土壤含水量降低。岳永杰等^[19]研究结果显示,2013 年根河流域的年降水量是近几十年中降水量最大的年份,这与本文在近 40 a 中根河流域 2013 年 ET 值最高的结果相一致。大部分研究区月均 ET 值呈单峰型分布,7 月、8 月 ET 值最大,1 月、2 月最小,如大沽河流域^[4]和疏勒河流域^[21]。7 月、8 月气温较高、降水集中,ET 值达到年内最大,而 1 月、2 月气温较低、降水少、地表覆被条件差,耕地多处于裸土状态,普遍是 ET 值最低的月份。

根河流域 ET 年均值在不同土地覆被类型的大小排序为:林地>草地>耕地>建设用地>沼泽地,这一结果在高永刚等^[22]研究中得到证实,近几十年中大兴安岭地区沼泽地出现严重退化,这对于沼泽地的蒸散影响是很大的。在三江源区^[20]的研究中同样表明除水体之外,林地是所有土地利用类型中 ET 值最高的。

在多年冻土区土壤蒸散对气候变化的敏感性分析中得出根河流域年平均气温增加显著,年降水量有减少趋势^[23]。相关性分析结果显示,ET 值与降水量和气温呈显著正相关,且 ET 值与降水量相关性最大。在高寒冻土区,气温普遍偏低,昼夜温差大,所以土壤蒸散对降水量、空气相对湿度以及风速最为敏感。在精河流域^[24]风速与 ET 值的相关性最大,在

雅鲁藏布江流域^[25]ET 值对气温的响应更明显,故不同区域 ET 值对气候变化的敏感因子各不相同。

4.2 结论

(1) 根河流域 1980—2017 年 ET 值整体呈增加趋势,ET 年均值为 350.16 mm,其中 2013 年 ET 最高,1980 年最低。PET 值整体呈增加趋势,PET 年均值为 771.61 mm,其中 2007 年 PET 最高,1984 年最低。ET 和 PET 均呈持续增加的趋势,表明根河流域在未来几年可能呈现干旱灾害加剧的趋势。

(2) 根河流域 ET,PET 年内变化特征,呈现出以 8 月为峰值的单峰型分布,主要集中在 5—9 月份,3—5 月快速增长,8 月份达到峰值,9—11 月迅速下降,1 月份降至年内最低值。

(3) 根河流域 ET 值在空间上呈上游高,中下游低的分布格局,年均 ET 峰值出现在上游地区。PET 值在空间上呈现西南>东北>东南的分布,年均 PET 值在西南区域最大。总体来说,根河流域上中下游 ET 及 PET 值具有明显的空间差异性。

(4) 根河流域的生长期(5—9 月)、完全冻结期(12 月—翌年 2 月)、融冻期(3—4 月)ET 值均呈增加趋势,始冻期(10—11 月)ET 值呈降低趋势。ET 值在 4 个时期的年均值分别为 696.39 mm,156.07 mm,8.94 mm,190.79 mm,分别占年内蒸散量的 66.18%,14.83%,0.86%,18.13%。

(5) 根河流域 ET 年均值在不同土地覆被类型的大小排序为:林地>草地>耕地>建设用地>沼泽地;PET 年均值排序为:耕地>建设用地>林地>草地>沼泽地。

(6) 根河流域年均 ET 值与降水量和气温呈显

著正相关,且 ET 值与降水量相关性最大,相关性系数为 0.67。

参考文献:

- [1] Yang X L, Wang L N. Variation characteristics of reference crop evapotranspiration of typical stations in upper basin of the Jinghe River in recent 45 years[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012,30(6):238-242.
- [2] Sun S K, Li C, Wang Y B, et al. Evaluation of the mechanisms and performances of major satellite-based evapotranspiration models in Northwest China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020,291:108056.
- [3] 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*, 2014,119(23):13079-13095.
- [4] 蔡玉林,于慧娜,高宗军,等.大沽河流域蒸散量时空变化[J].*遥感信息*,2016,31(5):126-132.
- [5] 蒙雨,但文红,王焕.基于 MOD16 的乌江流域地表蒸散发时空特征及影响因素[J].*水土保持研究*,2020,27(6):139-145.
- [6] 刘玉婷,李恒凯,王秀丽.基于 MOD16 的东江流域地表蒸散发时空特征分析[J].*长江科学院院报*,2019,36(12):16-22.
- [7] Banerjee S, Biswas B. Assessing climate change impact on future reference evapotranspiration pattern of West Bengal, India[J]. *Agricultural Sciences*, 2020,11(9):793-802.
- [8] Gu L, Hu Z, Yao J, et al. Actual and reference evapotranspiration in a cornfield in the zhangye oasis, north-western China[J]. *Water* 2017,9(7),499, <https://doi.org/10.3390/w9070499>.
- [9] 臧传富.黑河流域蓝绿水时空变化研究[D].北京:北京林业大学,2013.
- [10] Yang Q, Benoy G A, Chow T L, et al. Using the soil and water assessment tool to estimate achievable water quality targets through implementation of beneficial management practices in an agricultural watershed[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012,41(1):64-72.
- [11] Koirala S R, Gentry R W. SWAT and wavelet analysis for understanding the climate change impact on hydrologic response[J]. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2012,2(2):41-48.
- [12] 张蕾娜,李秀彬,王兆峰,等.一种可用于表征土地利用变化水文效应水文模型探讨[J].*水文*,2004,24(3):4-8.
- [13] 王建鹏,崔远来.基于改进 SWAT 模型的不同灌溉模式下区域蒸发蒸腾量模拟分析[C]//Collection of 2009 International Forum on Water Resources and Sustainable Development, 2009.
- [14] 代海燕,陈素华,武艳娟,等.内蒙古大兴安岭生态功能区冷暖季节气候变化趋势分析[J].*冰川冻土*,2016,38(3):645-652.
- [15] 王晓红,黄艳,于宏影,等.大兴安岭地区森林内外主要气象因子对比研究[J].*温带林业研究*,2019,2(3):58-62.
- [16] 罗韦慧,满秀玲,田野宏,等.大兴安岭地区森林小流域河川径流特征[J].*水土保持学报*,2014,28(3):83-86,103.
- [17] 赵姣,李志,刘文兆,等.泾河流域潜在蒸散量的时空变异[J].*生态学报*,2014,34(19):5600-5608.
- [18] 王利辉,何晓波,丁永建.青藏高原中部高寒草甸蒸散发特征及其影响因素[J].*冰川冻土*,2019,41(4):801-808.
- [19] 岳永杰,乌云珠拉,李旭,等.根河流域 1980—2017 年气候和径流的变化特征分析[J].*灌溉排水学报*,2020,39(4):96-105.
- [20] 甘海洪.三江源区区域蒸散发的分布特征[D].北京:中国地质大学,2020.
- [21] 周妍妍,郭晓娟,郭建军,等.基于 SEBAL 模型的疏勒河流域蒸散量时空动态[J].*水土保持研究*,2019,26(1):168-177.
- [22] 高永刚,赵慧颖,高峰,等.大兴安岭区域未来气候变化趋势及其对湿地的影响[J].*冰川冻土*,2016,38(1):47-56.
- [23] 李元寿,贾晓红,齐艳军,等.多年冻土区土壤蒸散发对气候变化的敏感性分析[J].*高原气象*,2019,38(6):1293-1299.
- [24] 郑倩倩,代鹏超,张金燕,等.基于 SEBS 模型的精河流域蒸散发研究[J].*干旱区研究*,2020,37(6):1378-1387.
- [25] 段娅楠,季璇,郭若愚,等.雅鲁藏布江流域潜在蒸散发的气候敏感性及其变化的主导因子分析[J].*水土保持研究*,2020,27(2):261-268.