

2000-2014年黄河源区ET时空特征及其与气候因子关系

叶红¹, 张廷斌^{1,2,3}, 易桂花⁴, 李景吉^{5,6}, 别小娟¹, 刘栋¹, 罗琳玲¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 2 成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614000; 3. 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 成都 610059; 4. 成都理工大学管理科学学院, 成都 610059; 5. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 6. 成都理工大学生态资源与景观研究所, 成都 610059)

摘要: 黄河源区地处青藏高原东缘, 具有独特的自然生境和丰富的自然资源, 是中国西南区域经济发展的重要生态安全屏障。以MODIS ET产品作为研究黄河源区地表蒸散发(ET)的数据源, 结合黄河源区内部及周边18个气象站数据、全国1:100万植被类型图和黄河源区DEM数据, 利用趋势分析、相对年际变化和相相关分析法, 研究2000-2014年黄河源区ET时空变化特征及不同土地利用类型下ET的变化规律, 重点探讨了ET与气候因子的关系。结果表明: ① 黄河源区多年ET区域分异规律明显, 北部ET显著弱于中部和东南部, 最强ET位于黄河源区的东南部, 多年平均ET值为538.61 mm/a, 距平相对变化显著, ET年际变化呈先减小后增加的趋势, 平均趋势变化率为0.44 mm/a; ② 年内ET呈周期性单峰变化趋势, 7月达到峰值; 2000-2014年黄河源区多年四季ET季节性差异明显, 夏季ET最强达到188.14 mm/a, 春秋季次之, 冬季ET最弱仅97.15 mm/a; ③ 研究时段内不同土地利用类型的ET大小表现为沼泽地>林地>草地>其他>裸地, 整体上各土地利用类型的ET呈逐渐增加趋势; ④ 相关分析结果表明, ET与同期气温、降水呈正相关关系, 与相对湿度呈负相关关系, 其中降水对ET的影响强于气温; 驱动分区结果显示黄河源区ET受气候因子驱动的地区主要表现为降水驱动。

关键词: 地表蒸散发(ET); 时空特征; 气候因子; MODIS; 黄河源区

DOI: 10.11821/dlxb201811006

1 引言

地表蒸散发(Evapotranspiration, ET)也称陆地表层水汽通量, 是地表植被蒸腾、土壤与水体蒸发的水汽总和^[1-5], 联系着地球外部圈层间的物质循环和能量交换^[6-10]。同时, 它是地表水热平衡的重要构成部分^[11-13], 影响着地表过程中地、气系统的相互作用^[14], 是全球水分循环及气候变化的重要影响因素^[15]。准确估算区域地表蒸散发量, 探索区域地表蒸散发与气候变化的时空分异规律, 对生态系统水源涵养与保护、水资源合理开发利用和区域小气候调节等具有重要意义^[2-3, 16-17]。

黄河源区地处世界屋脊青藏高原东缘, 位于三江源自然保护区的核心地带, 有着独特的自然生态系统和丰富的自然资源, 是中国西南区域经济发展的重要生态安全屏障^[18-19]。

收稿日期: 2017-12-13; 修订日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801099, 41501060); 中国地质调查局项目(DD20160015-26) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41801099, No.41501060; China Geological Survey Project, No.DD20160015-26]

作者简介: 叶红(1991-), 女, 四川广安人, 硕士生, 研究方向为生态、环境遥感和3S技术。E-mail: 18883344821@163.com

通讯作者: 张廷斌(1978-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 研究方向为环境、地质遥感。E-mail: zhangtb@cdu.edu.cn

近年来,黄河源区平均气温上升趋势显著^[18, 20-21],冰川冻土消融加快^[22],年内降水量不均匀性增加^[23],使得黄河源区水热平衡发生着微妙变化。及时了解黄河源区在全球气候变暖格局下^[24],其区域气候因子变化与ET的关系,对黄河源区生态系统水源涵养和水资源合理开发利用至关重要^[2]。

目前关于ET的研究主要集中在蒸散模型^[7, 9, 25-35]、精度评估验证^[35-37]和蒸散数据应用^[15, 38-39]等方面。另外,基于遥感的ET研究已成为近年来该领域热点研究之一^[14, 36, 40-49]。国内ET研究则主要集中在高寒区(黄河源区、长江源区)、河湖流域、平原地带。高寒区研究侧重于ET对黄河源区、长江源区的湿地生态系统、冰川冻土和高寒植被等的影响,探讨ET与气候因子、环境因素的关系^[5, 9, 50-51]。河湖流域的ET研究以流域水资源合理利用为出发点,主要集中于ET时空分布规律探索与强度分析^[2],ET变化与影响因子探讨^[38]等方面。平原地带主要倾向于进行长时间序列下ET的空间变化^[3]和生长季内不同土地利用类型的ET特征研究^[14]。此外,也有不少学者对中国陆表蒸散分布特征做了研究^[17, 28, 47]。

遥感技术的发展使得长时间序列、大区域尺度的ET研究成为可能,遥感反演ET数据及其应用也越来越多地得到研究者的关注^[47, 49, 52-53]。常用的遥感反演地表蒸散发产品主要有MODIS MOD16/ET、LSA-SAFMSG/ET、AVHRR NOAA和SSEBOP/ET等^[55-57]。其中,最具代表的是美国NASA(National Aeronautics and Space Administration)与蒙大拿大学NTSG(The Numerical Terradynamic Simulation Group)共同发布的全球陆地蒸散发产品MODIS MOD16/ET,该产品已在全球得到了广泛应用^[35, 49, 58-61]。

由于复杂下垫面的影响和传统监测手段的局限性,大面积实地ET的估算与观测比较困难,虽然有以上多种方法研究ET,然而黄河源区地处青藏高原东缘,生态系统脆弱,自然环境条件极为艰苦,地面系统性观测难度大,观测资料十分缺乏。本文拟基于MODIS数据估算的实际蒸散发产品MOD16A2/ET和研究区内部及周边18个气象站的气温、降水和相对湿度数据开展黄河源区ET研究,探索黄河源区ET时空特征及其与气候因子的关系,研究结果有助于加深对区域地表蒸散发时空变化的理解,在区域生态系统水源涵养和保护、水资源合理利用与开发等方面也具有重要的指导意义。

2 研究区概况

黄河源区地处青藏高原东缘32°04'N~36°30'N, 95°54'E~103°31'E之间^[62],包括16个县级行政单元,分别为青海省曲麻莱、玛多、达日、久治、甘德、玛沁、兴海、同德、共和、贵南、泽库和河南蒙古族自治县,甘肃省玛曲县,四川省阿坝、红原和若尔盖县,总面积约132658 km²(图1)。地貌以高原平地、山地和丘陵台地为主^[22],海拔在2232~6252 m之间,平均海拔为4029.92 m。北部和东部紧邻共和盆地与若尔盖盆地,地势相对较低,中西部多山地,地势较高。研究区内河流、湖泊发育,以西部扎陵

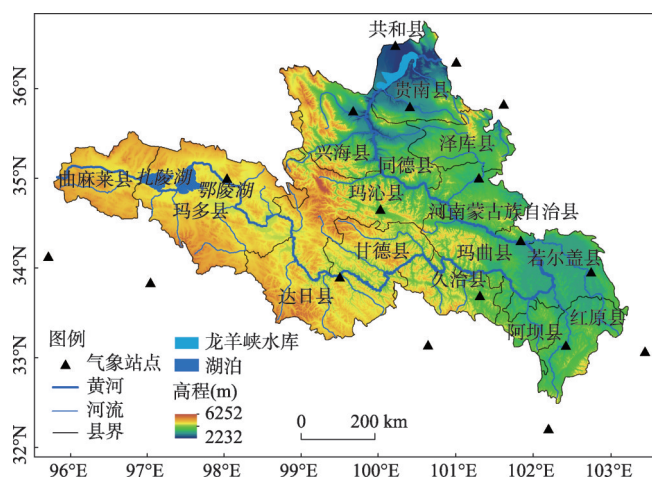


图1 黄河源区气象站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in the source region of the Yellow River

湖、鄂陵湖两大高山淡水湖泊及北部龙羊峡水库最为著名。黄河源区土地利用类型以高原草地、林地和沼泽地为主, 占研究区总面积的80%以上。区域气候类型属于青藏高原亚寒带半干旱半湿润型^[22, 51], 东部气温比西部高, 东南部降水比西北部高, 水热空间分布差异显著。黄河源区昼夜温差大, 年均气温在-1.6℃左右; 年内降水多集中在5-9月, 年均累积降水量为407~582 mm; 年累积蒸发量为484~584 mm。总体上, 黄河源区海拔高、气温低, 河流湖泊沼泽湿地发育, 具有水源涵养与补给, 水土保持和区域气候调节等功能, 是黄河上游最重要的水源地和产流区。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

3.1.1 MODIS MOD16A2/ET 数据 MODIS MOD16产品数据集是以MODIS日均气象再分析数据和8 d遥感植被属性动态作为输入, 使用Mu等^[58]改进型ET算法(图2), 综合考虑植被覆盖、反照率以及气温、气压和相对湿度等信息来计算植被与土壤的净辐射量, 最后利用Penman-Monteith模型^[1]计算全球陆地表面蒸散发量而形成的灰度遥感影像数据集, 灰度值的大小表示地表蒸散发量大小, 其数据子集分别是MOD16A2和MOD16A3。该数据集的空间分辨率为1 km, 时间分辨率有8 d (MOD16A2-8day)、月 (MOD16A2-monthly) 和年 (MOD16A3-annual) 3种, 数据集内包括地表蒸散发量 (Evapotranspiration, ET)、潜热通量 (latent heat flux, LE)、潜在地表蒸散发量 (Potential evapotranspiration, PET)、潜在热通量 (Potential latent heat flux, PLE) 和质量评估数据 (ET Quality control, ET_QC), 涵盖时间段为2000-2014年。MOD16 ET产品已经得到来自涡流通量塔实测ET和全球232个流域测量ET的验证^[63], 可用于研究区域水量和能量平衡及土壤水分状况^[35, 47]。

研究选用的2000-2014年MOD16A2/ET数据, 时间分辨率为月 (monthly), 遥感卫星轨道号为h25v05和h26v05, 来源于NTSG (<http://www.ntsg.rmt.edu/>)。利用MRT (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Reprojection Tools) 将下载的MOD16A2/ET数据进行格式转换、重投影和影像镶嵌等预处理工作, 根据MODIS MOD16全球ET产品说明文件和ET_QC数据进行统计分析及异常值剔除, 生成研究所需的ET初始数据。

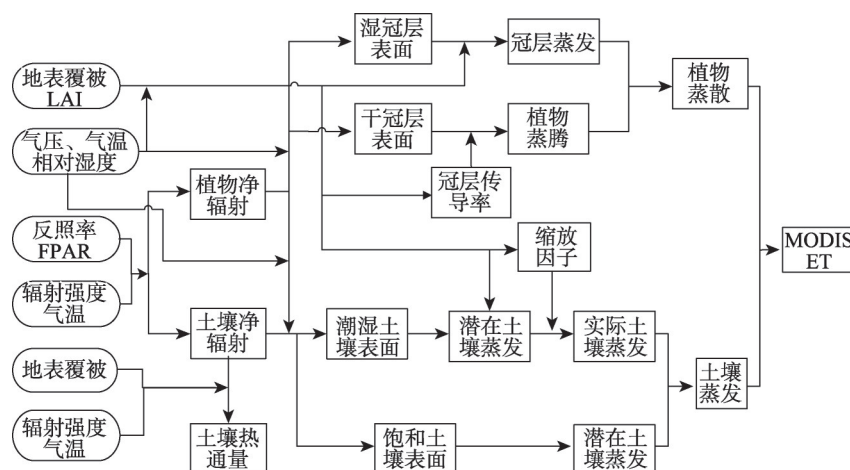


图2 改进型MODIS ET算法流程图(据文献[58], 经修改)

Fig. 2 Flowchart of the improved MODIS ET algorithm (revised from Reference [58])

3.1.2 气象资料 气象资料来自中国国家气象科学数据共享服务平台 (<http://data.cma.cn/>)。选取黄河源区内部及周边共 18 个地面气象站 (图 1), 统计各气象站点 2000-2014 年每年逐月气象数据, 主要包括月平均气温 (°C)、降水量 (mm) 和相对湿度 (%)。为了探明 ET 与气候因子的关系, 选取月平均气温、降水量和相对湿度作为气候因子, 采用 Anuspline 样条函数法^[64]和 Kriging 插值法, 进行气象数据空间插值处理。

3.1.3 土地利用类型数据 土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) “中国 1:10 万土地利用现状遥感监测数据库”, 获取了 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 4 期土地利用数据, 空间分辨率为 1 km。在结合黄河源区自然环境状况并参考中国科学院资源环境科学数据中心 “中国 1:100 万植被类型空间分布数据” 的基础上, 将黄河源区土地利用类型归并划分为 6 个一级类, 分别为林地、草地、水域、沼泽地、裸地和其他类型 (城乡、工矿、居民用地、旱地和高寒荒漠、苔原等)。其中, 由于水域的蒸发量大且与其他地表覆被类型的蒸散发模式不同, 研究中单独把水域提取出来, 使其不参与研究计算。黄河源区 ET 面积即为研究区总面积扣除水域 (扎陵湖、鄂陵湖和龙羊峡水库等) 和无值区后的陆地面积, 其值约 129216 km²。

3.1.4 地形数据 地形数据为 ASTER GDEM (V2 版) 30 m 空间分辨率 DEM (Digital Elevation Model) 产品, 来源于中国科学院 “地理空间数据云” (<http://www.gscloud.cn/>)。对 DEM 数据进行坏值、无值处理和镶嵌、裁剪等预处理工作后, 将 DEM 空间分辨率重采样为 1 km 用于空间插值等后续数据处理工作。

3.2 研究方法

3.2.1 趋势分析 MOD16A2/ET 为月尺度数据, 为了得到时间序列为 2000-2014 年的年 ET 值, 本文利用月值数据进行年 ET 值的合成, 计算公式为:

$$ET_i = \sum_{j=1}^{12} ET_j \quad (1)$$

式中: i 表示第 i 年 ($i = 2000, 2001, \dots, 2014$); j 为月份 (取值为 1, 2, \dots , 12); ET_i 为研究区内各像元点在第 i 年的年 ET 值。

采用基于像元的一元线性回归分析法对黄河源区 2000-2014 年 MOD16A2/ET 数据进行趋势分析^[64-65], 公式为:

$$T_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times ET_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n ET_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中: n 为年数 (时间序列为 2000-2014 年, 即 $n = 15$); ET_i 为研究区内各像元点在第 i 年的年 ET 值; T_{slope} 为 2000-2014 年研究区内各像元点 ET 年际变化的一元线性回归方程的斜率, 即趋势变化率, 反应研究时段内 ET 的总体变化趋势。 $T_{slope} > 0$ 表明 ET 总体变化呈增加趋势, 反之为减少趋势^[64]。

3.2.2 相对年际变化率 根据年 ET 数据可以得到 2000-2014 年研究区内各像元的多年平均 ET 值, 其计算公式为:

$$\overline{ET} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n ET_i \quad (3)$$

式中: n 为年数 (研究时间段为 2000-2014 年, 即 $n = 15$); ET_i 为研究区内各像元点在第 i 年的年 ET 值; \overline{ET} 为多年平均 ET 值。

为了更准确地描述长时间序列下 ET 的总体变化情况, 本文引入 ET 相对年际变化

率。计算公式为:

$$RARC_{ET} = \frac{T_{slope}}{\overline{ET}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $RARC_{ET}$ 表示 2000-2014 年黄河源区 ET 相对年际变化率; T_{slope} 为 2000-2014 年黄河源区 ET 趋势变化率; \overline{ET} 为多年平均 ET 值。

3.2.3 相关分析 本文基于像元尺度进行黄河源区 ET 与气候因子的相关分析研究。其中, 线性相关分析的计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: n 为年数; R_{xy} 为 x 、 y 两个影响因子的线性相关系数; x_i 与 y_i 分别是 x 、 y 两个影响因子在第 i 年的值 (i 为 2000 年、2001 年...2014 年); \bar{x} 与 \bar{y} 分别为两个影响因子 n 年的平均值。

偏相关分析是在线性相关分析的基础上, 排除其他影响因子的干扰, 计算某两个影响因子之间的相关性^[64]。为了探究气温和降水对黄河源区 ET 的影响, 基于线性相关系数计算公式, 把气温和降水作为与 ET 有关的两个影响因子, 对其进行偏相关分析。偏相关系数计算公式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)} \sqrt{(1 - R_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中: x 代表 ET 值; y 代表气温; z 代表降水量; $R_{xy,z}$ 为 ET 与气温间的偏相关系数。

复相关分析是在综合考虑多个相关影响因子的共同作用下, 将两个或多个影响因子并入计算。复相关系数的计算公式为:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)} \quad (7)$$

式中: $R_{x,yz}$ 为 ET 与气温、降水量的复相关系数; R_{xy} 为气温与降水量的线性相关系数; $R_{xz,y}$ 为 ET 与降水量间的偏相关系数。利用经典的 t 检验、 F 检验分别进行偏相关、复相关系数的显著性检验。

4 结果与分析

4.1 黄河源区 ET 时空变化特征

根据研究需要, 将黄河源区划分为北部地区 (共和、贵南、兴海、同德和泽库 5 县, 占黄河源区总面积的 23.29%)、西部地区 (玛多和曲麻莱 2 县, 占 22.25%)、中部地区 (玛沁、甘德、达日和久治 4 县, 占 29.10%) 和东南部地区 (河南蒙古族自治县、玛曲、若尔盖、阿坝和红原 5 县, 占 25.37%)。

4.1.1 黄河源区 ET 年际变化 2000-2014 年黄河源区多年平均 ET 呈明显的空间分异特征 (图 3), 北部 ET 显著弱于中部和东南部, 最强 ET 位于黄河源区的东南部, 这与曾燕等^[66]对黄河流域蒸散发分布模式的研究结果类似。研究区内各县级行政单元之间 ET 差异显著, 其中若尔盖、红原、久治、玛沁和达日等 5 县地表蒸散发的程度最强, 多年平均 ET 值高达 589.11 mm/a; 甘德、玛曲和阿坝等 3 县 ET 值相对较高, 约为 579.41 mm/a; 河南蒙古族自治县和玛多县 ET 程度相对较弱, 多年平均 ET 值约为 536.99 mm/a; 而共和、贵

南、兴海、同德、泽库和曲麻莱等6县ET值最小, 约为458.19 mm/a。结合黄河源区高程分布情况分析发现, 北部低海拔及西部高海拔区域ET值小, 中部山区及东南部海拔相对较高的区域ET值大, 表明研究区ET的强弱程度与高程分布具有一定联系。

2000-2014年黄河源区年际ET波动较大, 呈现两端年份高而中间年份低的变化特点, 其值介于484.36~583.59 mm之间, 多年平均ET值为538.61 mm/a, 距平相对变化显著, 各年份间的年际ET差异明显(图4)。研究时段内, 有6个年份的年际ET超出多年平均ET值, 其余年份均低于平均水平; 2012年的年际ET最高达到583.59 mm, 其次为2009年的575.61 mm; 2008年的年际ET最低为484.36 mm, 其次为2007年的483.67 mm, 年际ET最高值与最低值之差达到99.23 mm。整体上, 黄河源区在2000-2008年间ET呈减少趋势明显, 2009-2014年间ET呈波动略增加的趋势, 这与黄河源区生态保护和建设工程的实施密切相关^[67-68]。

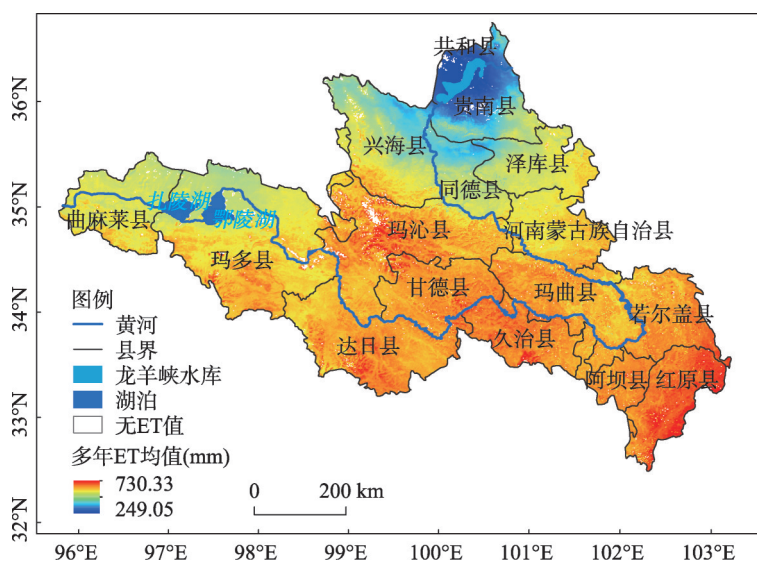


图3 黄河源区多年平均ET空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mean ET in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

2000-2014年黄河源区ET趋势变化率在-2.67~4.8 mm/a之间, 平均趋势变化率为0.44 mm/a; 空间分布上, 中东部增加趋势明显, 西部减少趋势显著(图5a)。黄河源区ET的相对年际变化率介于-0.70%~1.36%之间, 变化幅度不大, 平均相对年际变化率为0.14%, 空间上表现为西低东高的态势(图5b)。西部地势高, 全年气温较平均值低, 不利于地表的蒸散发; 区内扎陵湖、鄂陵湖的水域面积超过1133 km², 局部空气的相对湿度较高, ET强度稍弱于分布着沼泽地、林地等生态水源充足的中东部地区。相对年际变化最为显著的区域为共和县、贵南县、泽库县、同德县北部和兴海县东部, 同时也是年际ET程度最弱的地区。其余地区虽然ET程度较强, 但其相对年际变化率却不大, 表明研究时段内黄河源区ET的空间差异化显著但其相对变化幅度小, 整体而言, 区域水热气三者之间处于相对平衡的状态。这也侧面验证了黄河源区2000-2014年并没有出现极端干旱或洪涝天气。

4.1.2 黄河源区ET年内变化 总体而言, 黄河源区年内ET呈周期性单峰变化趋势, 从3月开始波动上升, 在7月达到最大值, 8-11月波动下降, 12月-次年2月为ET的低值区且其变化特征不显著(图6)。多年月平均ET值介于28~81 mm之间, 年内ET最小值出现

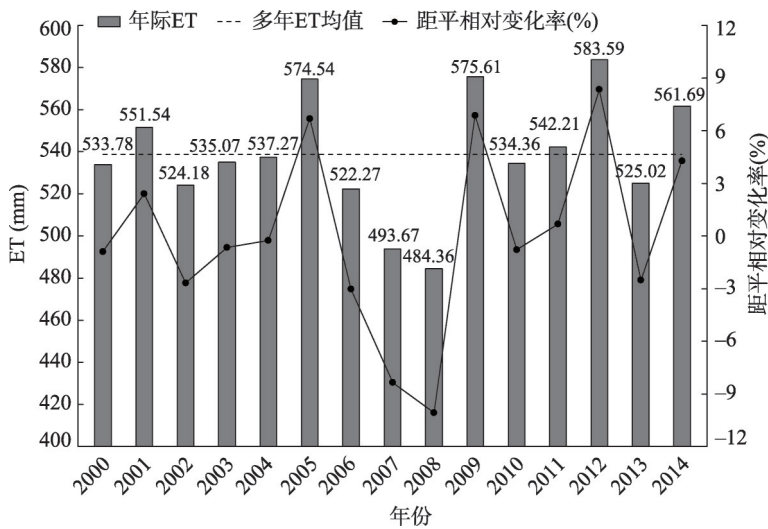


图4 2000-2014年黄河源区ET年际变化

Fig. 4 Annual variation of ET in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

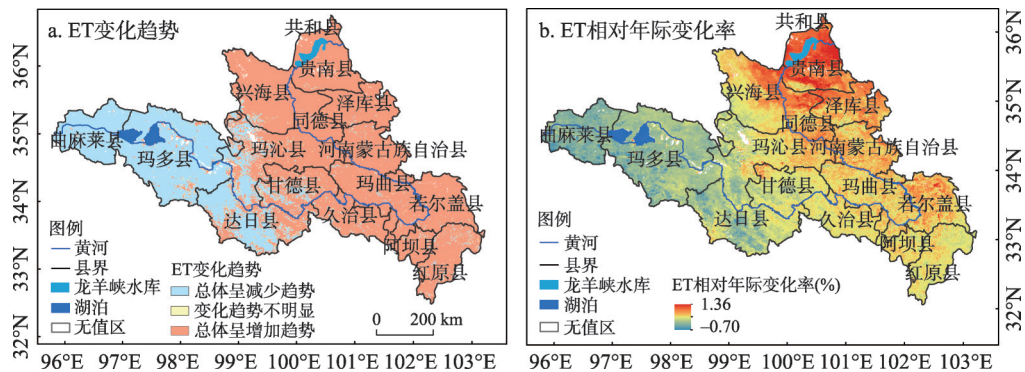


图5 2000-2014年黄河源区ET变化趋势(a)与相对年际变化(b)

Fig. 5 ET trend (a) and its relative annual variation (b) in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

在12月, 多年月平均ET值约30.92 mm/a; 最大值出现在7月, 其值约69.12 mm/a。这与研究区内多年月平均气温在1月达到最低, 7月达到最高; 多年月平均降水量在12月最小, 7月最大的年内变化特征基本一致, 表明黄河源区ET变化与该区域水热变化同期, 气温和降水变化是引起ET变化的重要因素。

4.1.3 黄河源区四季ET变化 根据植被生长习性 & 区域环境状况, 把黄河源区的3-5月划分成春季, 6-8月划分成夏季, 9-11月划分成秋季, 12月-次年2月划分成冬季, 研究2000-2014年黄河源区ET随四季变化的空间分异规律(图7)。黄河源区ET具有较强的季节性, 夏季ET程度最强, 冬季最弱, 与区域气温、日照时数及地表太阳辐射量的变化规律具有较高的一致性。四季ET均值从大到小依次为: 夏季(约188.14 mm/a) > 春季(约131.83 mm/a) > 秋季(约121.49 mm/a) > 冬季(约97.15 mm/a)。不同季节间的ET变化幅度最大可达48.36%, 引起这一现象的原因不尽相同, 影响因子也各有差异。气温低、降水量小、太阳辐射弱, 加之高寒地区植被枯萎后蒸腾作用微弱或几乎没有, ET主要靠土壤浅层水分的微弱蒸发贡献, 是造成冬季ET值最小的主要原因; 进入春季, 气温逐渐升高、降水量及太阳辐射强度逐渐增加, 植被进入生长季的蒸腾作用加强, 土壤水分蒸

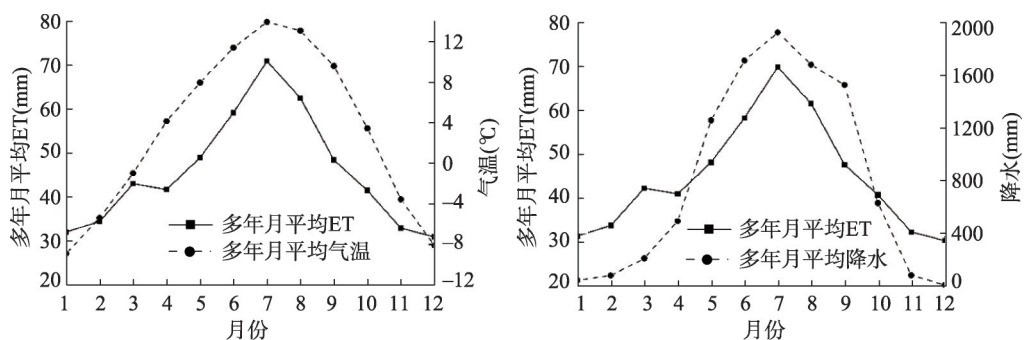


图6 2000-2014年黄河源区多年月平均ET与气温和降水变化

Fig. 6 Mean monthly ET, air temperature and precipitation over years in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

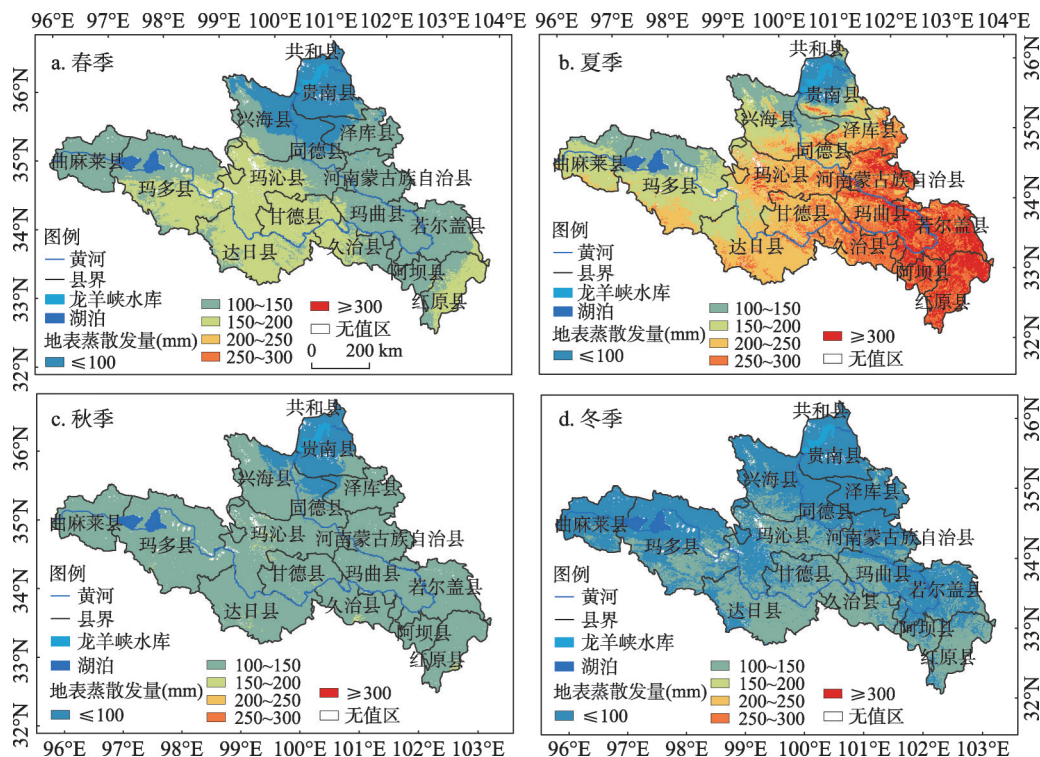


图7 2000-2014年黄河源区四季ET分布

Fig. 7 Spatial distribution of ET in the four seasons in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

发较强,是影响春季ET值的主导因素;夏季气温高、降水量丰富、太阳辐射强,使得植被蒸腾和土壤水分蒸发作用达到最强,因而夏季ET值最大;入秋之后,气温逐步下降、降水量和太阳辐射逐渐减少以及植被进入枯萎期的蒸腾作用和土壤水分蒸发作用相对减弱,是导致秋季ET值的重要因素^[65]。

黄河源区ET的季节性空间分布差异明显,春季ET均值介于42.36~199.27 mm/a之间,黄河源区中部及东南部的红原县ET值明显大于北部地区;夏季ET均值介于72.75~317.54 mm/a之间,东南部地区ET值最大,中部次之,北部的共和县与贵南县最小;秋季ET均值介于65.01~171.22 mm/a之间,北部低海拔地区ET值小,其余地区的ET值明

显较大; 冬季ET均值介于41.15~134.76 mm/a之间, 除中部及东南末端地区ET值稍大外, 其他地区ET值都在100 mm/a以下(图7)。

总体上, 黄河源区四季ET的时空分布异质性显著, 北部地区是ET的薄弱地带, 中部和东南部地区是对全区ET贡献最大的区域; 夏季ET最强, 春秋季次之, 冬季ET最弱。黄河源区ET的四季差异表明植被—土壤—大气间水汽与热量的循环与流通, 既是影响区域地表水热平衡重要因素, 也是引起ET变化的根本原因。

4.2 不同土地利用类型的ET变化特征

土地利用类型变化是区域环境改变和人类活动影响的直接结果^[23, 69], 它又能影响区域环境中的水文过程及水热平衡, 而ET是区域地表水热平衡的重要构成部分, 探讨不同土地利用类型的ET特征尤为重要。本文获取了2000年、2005年、2010年和2015年4期空间分辨率1 km的土地利用数据, 分别代表2000-2003年、2004-2007年、2008-2011年、2012-2014年4个时间段黄河源区土地利用情况, 研究不同土地利用类型的ET变化特征。

对比4期土地利用类型可知, 不同土地利用类型的面积比由大到小依次为草地>裸地>林地>其他>沼泽地>水域(表1), 草地为研究区主要的土地利用类型, 占比达到74%以上。各研究时段内, 不同土地利用类型的ET值存在差异, 最大差值范围在57.93~82.00 mm之间, 含植被的土地利用类型其ET值比无植被覆盖的高。各研究时间段内, 不同土地利用类型的ET分布规律明显且相同: 沼泽地>林地>草地>其他>裸地; 其中, 沼泽地、林地和草地ET值明显高于裸地和其他用地。

表1 2000-2014年黄河源区不同土地利用类型ET分布
Tab. 1 ET distribution of different types of land use in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

土地利用类型	2000-2003年		2004-2007年		2008-2011年		2012-2014年	
	平均ET值 (mm)	面积比 (%)	平均ET值 (mm)	面积比 (%)	平均ET值 (mm)	面积比 (%)	平均ET值 (mm)	面积比 (%)
草地	538.98	74.76	533.92	74.21	535.95	74.19	559.35	74.10
林地	549.14	7.38	554.56	7.37	553.76	7.37	583.39	7.37
沼泽地	557.60	3.82	563.54	3.84	565.05	3.84	588.95	3.85
裸地	499.67	8.06	488.51	8.56	493.51	8.53	506.94	8.51
其他	506.60	3.83	510.97	3.86	515.39	3.88	528.66	3.95
水域	-	2.15	-	2.16	-	2.19	-	2.22

进一步分析发现, 不同土地利用类型ET分布规律与其相对应的土地利用类型面积比的排列不具有一致性, 究其原因主要有以下几点: 沼泽地主要覆盖为浅水及水生植物, 来自沼泽地水分的直接蒸发比草地、林地等的植被蒸腾更加强烈, 使得沼泽地的水分蒸发和植被蒸腾对黄河源区全年ET的贡献最大; 林地占黄河源区总面积的7.37%左右, 仅次于草地和裸地, 虽然林地所占面积不大, 但是林木根系可以吸收土壤深层水分用于蒸腾作用, 底层灌木苔藓等也对ET的影响比较大; 其次, 近年来黄河源区高覆盖度草地大面积减少^[23], 源区内多为中、低覆盖度草地, 常伴随着裸露的土壤, 相比于林地而言其郁闭度不高, ET的强度较林地稍弱; 裸地主要是由沙地、碎砾石和裸岩石质地表组成, ET主要来自表层土壤水及降水蒸发, 其值相对较小; 其他用地相比于裸地而言, ET除来自表层土壤水及降水蒸发外, 还有一部分来自于低覆盖的苔原植被或人工种植的植物蒸腾, ET值较裸地稍高。林地、沼泽地和其他等土地利用类型, 研究时间段内的多年平均ET近年来呈逐渐增加趋势; 草地和裸地两种土地利用类型, 近年多年平均ET呈先减后增的趋势。此外, 2008-2014年黄河源区同种土地利用类型的ET值近年呈逐渐增加趋势, 可能与全球气候变暖背景下的区域气温升高和降水量增加有关^[23, 70-71]。

4.3 黄河源区ET与气候因子的关系分析

4.3.1 黄河源区ET与气候因子的相关分析 气候变化是影响区域水热分布的重要环境因素,以气温和降水表现最为明显,气温表征空气冷热程度决定天气的变化状况^[72],降水影响地表径流决定区域水分循环的快慢。图6表明黄河源区ET的变化与该区域水热变化同期,气温和降水变化是引起ET变化的重要因素,因此本文选用气温和降水作为影响黄河源区ET的主要气候因子进行相关分析。另外,本文考虑到相对湿度作为决定空气湿润程度的影响因子^[73],可能是黄河源区ET的贡献力量之一,亦对相对湿度与ET的关系作了探讨。整体上,2000-2014年黄河源区ET与气温、降水均呈正相关关系,ET与气温的相关系数在0~0.90之间,平均值为0.27;与降水的相关系数在-0.54~0.96之间,平均值为0.35;与相对湿度的相关系数在-0.61~0.78之间,平均值为0.31。

黄河源区ET与气温、降水和相对湿度显著相关性($P < 0.05$)分布具有明显的空间分异特征(图8)。降水对ET的影响范围最广,主要分布在黄河源区海拔相对较低,地坡蓄水能力强,土壤表层含水量丰富的北部地区和东南部多草地和沼泽地的若尔盖、玛曲、阿坝和红原县,约占黄河源区ET总面积(129216 km²)的28.29%。气温对ET的影响范围主要分布在中部的玛沁县、东南部的若尔盖县、河南蒙古自治县和玛曲县以及泽库县的东部地区,约占黄河源区ET总面积的7.45%,且在若尔盖和玛曲县与降水的影响范围存在重叠区域;这些区域广泛分布林地和沼泽地^[22],植被蒸腾和沼泽地浅水蒸发作用以及玛沁县北部冰川雪山融水等受气温的影响比较大。相对湿度对ET的影响主要分布在湖泊众多的西部曲麻莱和玛多县以及北部兴海和贵南县,约占黄河源区ET总面积的13.07%,仅在兴海县中西部地区与降水的影响范围有小部分重叠;整体而言,相对湿度与ET呈负相关关系,即相对湿度越低ET越大,相对湿度越高ET越小。另外,海拔相对较高,土地利用类型以稀疏草地和裸地为主的达日、甘德、玛多以及曲麻莱4县ET与气温、降水和相对湿度之间无明显的显著相关性,表明这些区域ET主要受其他因素影响。

4.3.2 黄河源区ET与气候因子的偏相关复相关分析 相对湿度对ET影响较大的区域(黄河源区西部曲麻莱县和玛多县以及北部兴海县)其多年平均ET值小于503.83 mm,而黄

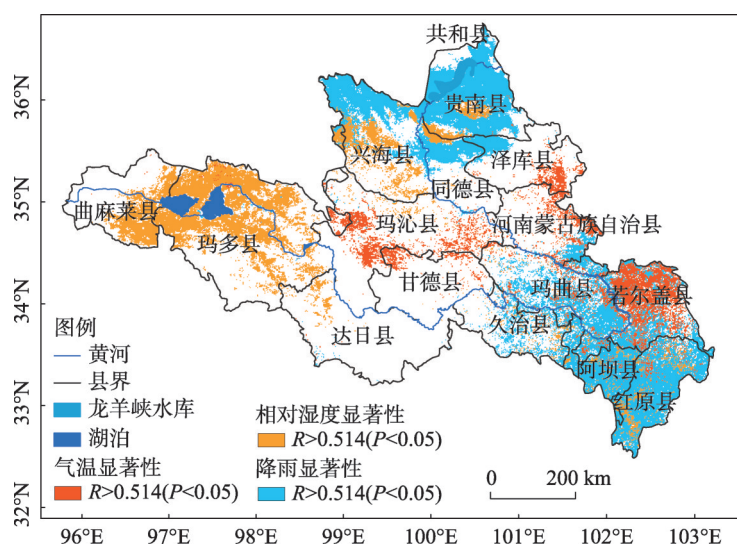


图8 2000-2014年黄河源区ET与气温、降水和相对湿度的相关性分布图

Fig. 8 Correlations for ET and air temperature, ET and precipitation, and ET and relative humidity in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

河源区多年平均ET值大于582.05 mm的范围主要位于玛沁县和河南蒙古族自治县及其以南大部分地区, 该区主要受降水和气温的影响。本文选取气温和降水两个气候因子开展与ET的偏相关和复相关分析。

黄河源区ET与气温的偏相关系数介于-0.79~0.88之间, 平均值为0.10; 呈正相关的区域主要分布于曲麻莱、玛沁、甘德、泽库、若尔盖和河南蒙古族自治县等地, 约占黄河源区ET总面积的65.92%; 负相关的区域大致分布于共和、贵南、兴海、达日、阿坝和红原等县, 约占黄河源区ET总面积的34.08% (图9a)。t双侧检验表明, 黄河源区通过0.05显著性水平的区域主要在玛沁县中西部、泽库县东南部、河南蒙古族自治县东部以及若尔盖县中部, 总面积3031 km², 约为正相关区域面积的3.56%; 通过0.01显著性水平检验的区域主要为玛沁县中南部和泽库县东南部, 总面积586 km², 约占正相关面积的0.69%。

黄河源区ET与降水的偏相关系数介于-0.56~0.95之间, 平均值为0.28; 呈负相关的区域主要分布于甘德县、玛沁县以及河南蒙古族自治县北部等地, 约占黄河源区ET总面积的13.61%, 其余区域均呈正相关 (图9b)。t双侧检验表明, 黄河源区通过0.05显著性水平的区域主要在玛沁县中西部、泽库县东南部、河南蒙古族自治县东部以及若尔盖县中部, 总面积26761 km², 约占正相关面积的23.97%; 通过0.01显著性水平检验的区域主要为玛沁县中南部和泽库县东南部, 总面积10934 km², 约占正相关面积的9.79%。黄河源区ET与降水的相关性显著强于气温, 表明降水对黄河源区ET的贡献大于气温的影响。

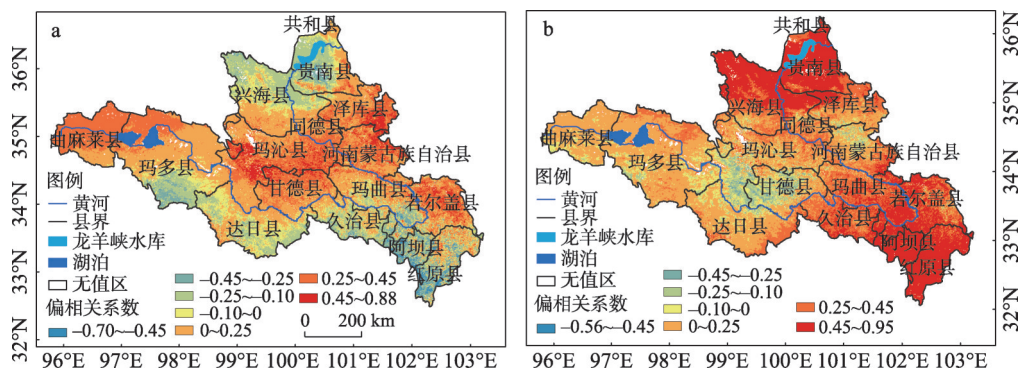


图9 2000-2014年黄河源区ET与气温(a)和降水(b)偏相关系数空间分布图

Fig. 9 Spatial distribution of partial correlation coefficient for ET and air temperature (a), and ET and precipitation (b) in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

黄河源区ET与气温、降水的复相关系数在0~0.96之间, 平均值为0.44, 大部分地区ET与气温、降水的复相关性明显 (图10)。若尔盖、阿坝、红原、贵南以及兴海县北部和玛沁县的中南部等地的复相关强, 玛多和达日两县的复相关最弱。F检验结果表明, 约18.07%的ET区域通过显著性水平为0.05的检验, 约8.09%的ET区域通过0.01显著性水平检验。

4.3.3 黄河源区ET与气候因子的驱动力分析 气候因子是影响区域水热分布的重要环境因素, 为了进一步揭示黄河源区ET与气候因子的关系, 深入理解黄河源区ET的气候驱动机制, 在偏相关与复相关的基础上, 确定了驱动规则 (表2)。

2000-2014年黄河源区ET驱动分区 (图11) 结果表明, 研究区内ET受气候因子驱动的地区主要表现为降水驱动, 分布在阿坝、红原、若尔盖县及贵南、兴海县的北部地区, 面积为18421 km²; 其中降水强驱动的区域所占面积为8192 km², 占降水驱动总面积

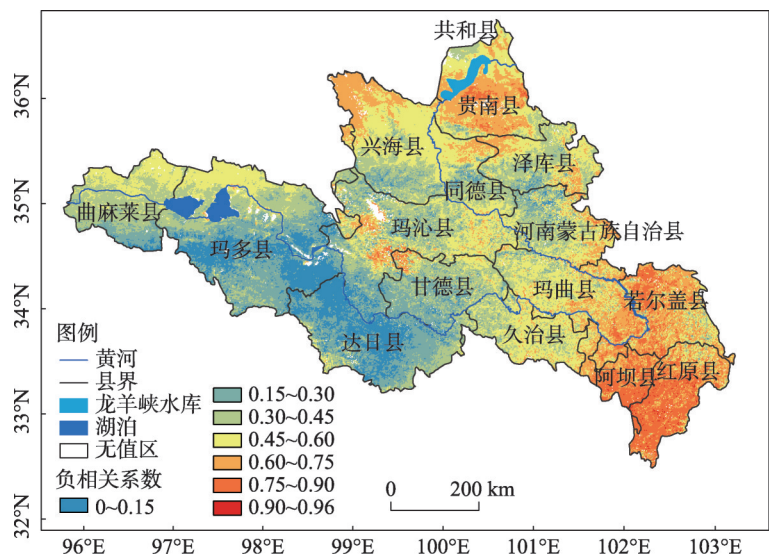


图 10 2000-2014 年黄河源区 ET 与气候因子的复相关系数空间分布图
Fig. 10 Spatial distribution of multiple correlation coefficients of ET and climatic factors
in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

表 2 黄河源区 ET 驱动分区规则
Tab. 2 Regionalization rules of driving factors for ET in the source region of the Yellow River

ET 驱动类型	t 检验(气温)		t 检验(降水)		F 检验	
	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
气温驱动	$ T > t_{0.05}$				$F > f_{0.05}$	
气温强驱动		$ T > t_{0.01}$				$F > f_{0.01}$
降水驱动			$ T > t_{0.05}$		$F > f_{0.05}$	
降水强驱动				$ T > t_{0.01}$		$F > f_{0.01}$
气温降水共同驱动	$ T > t_{0.05}$		$ T > t_{0.05}$		$F > f_{0.05}$	
气温降水共同强驱动		$T > t_{0.01}$		$ T > t_{0.01}$		$F > f_{0.01}$
其他气候因子驱动	$ T < t_{0.05}$		$ T < t_{0.05}$		$F > f_{0.05}$	

的 44.47%。受气温驱动的区域主要分布在玛沁县中南部，泽库县东南部以及河南蒙古自治县的东部，面积为 2054 km²；气温强驱动的面积约占气温驱动总面积的 18.7%。气温降水共同驱动的区域主要分布在若尔盖县境内，面积约 138 km²。此外，气温降水共同强驱动的区域面积为 2 km²，基本可以忽略，即在黄河源区不存在该驱动类型。整体上，2000-2014 年黄河源区 ET 驱动机制表现为除气温和降水外的其他因子驱动。

5 结论与讨论

本文利用 MODIS MOD16/ET 数据、黄河源区内部及周边 18 个气象站的气温、降水量和相对湿度数据，研究了 2000-2014 年黄河源区 ET 时空变化特征；统计分析了黄河源区不同土地利用类型的 ET 变化特征；采用趋势分析和相关分析法探索了黄河源区 ET 与气温和降水等气候因子的关系及驱动分区。主要结论如下：

(1) 2000-2014 年黄河源区 ET 空间分布具有明显的区域分异特征，北部 ET 显著小于

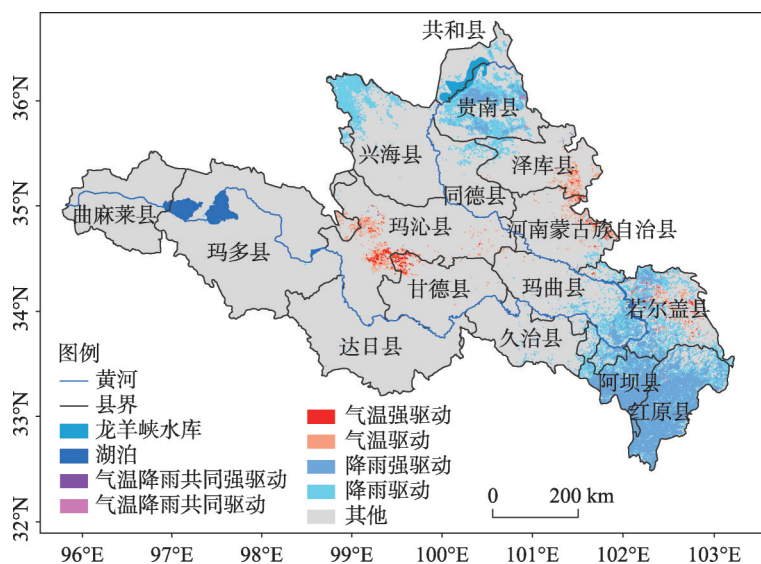


图 11 2000-2014年黄河源区ET驱动分区

Fig. 11 Spatial regions of ET driven by different factors in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

中部和东南部, 最强ET位于研究区的东南部。黄河源区年际ET差异明显波动较大, 距平相对变化显著, 年际ET呈先减小后增加的趋势, 即两端年份ET大, 中间年份ET小; 其值介于484.36~583.59 mm之间, 多年平均ET值为538.61 mm/a。近15年黄河源区ET趋势变化率在-2.67~4.8 mm/a之间, 平均趋势变化率为0.44 mm/a, 相对年际变化幅度不大, 平均相对年际变化率为0.14%, 整体空间分布呈两极分化态势, 中东部地区ET增大趋势明显, 西部地区减小趋势显著。2000-2014年黄河源区ET的强弱程度显著但其相对变化幅度小, 区域水热气三者处于相对平衡的状态。

(2) 2000-2014年黄河源区年内ET呈周期性单峰变化趋势, 与研究区内气温和降水的变化特征类似, 入春3月开始波动上升, 7月达到最大值, 8-11月波动下降, 12月至次年2月ET小且其变化特征不显著。黄河源区四季ET差异明显, 具有较强的季节性, 四季ET值从大到小排列为: 夏季(约188.14 mm/a) > 春季(约131.83 mm/a) > 秋季(约121.49 mm/a) > 冬季(约97.15 mm/a)。不同季节间ET变化幅度最高可达48.36%, 各季节气温、降水量、太阳辐射、植被生长态势和土壤含水量等是引起四季ET变化的主要因素。黄河源区ET季节性空间分布的异质性表明, 北部地区是ET的薄弱地带, 中部和东南部地区是对全区ET贡献最大的区域。

(3) 2000-2014年黄河源区不同土地利用类型的ET值大小分布规律为: 沼泽地 > 林地 > 草地 > 其他 > 裸地, 沼泽地水分蒸发和植被蒸腾对黄河源区全年ET的贡献显著。此外, 2008-2014年黄河源区同种土地利用类型的ET值近年呈逐渐增加趋势, 可能与全球气候变暖背景下的区域气温升高和降水量增加有关^[23, 70-71]。

(4) ET与气候因子的相关分析表明, ET与气温、降水呈正相关关系且降水对ET的影响强于气温, 相对湿度与ET呈负相关关系, 主要影响区域分布在多年平均ET值小于503.83 mm的曲麻莱县、玛多县和兴海县。黄河源区ET受气候因子驱动的地区主要表现为降水驱动, 面积约18421 km², 其中降水强驱动的区域占降水驱动总面积的44.47%; 受气温驱动的区域主要分布在玛沁县中南部, 泽库县东南部以及河南蒙古族自治县的东部, 面积为2054 km², 气温强驱动的区域面积约占气温驱动总面积的18.7%。整体上,

黄河源区ET变化的驱动机制表现为除气温和降水外的其他因子驱动。

本文对2000-2014年黄河源区ET时空特征及其与气温和降水两气候因子的关系做了详细研究,初步探索了黄河源区ET与相对湿度的关系,但是ET自身除受到气温、降水和相对湿度的影响外,还受到高程、风速、日照等自然因素和人类活动的共同影响,是有待进一步研究的方面。同时,MOD16A2/ET遥感数据由于受云和阴影等因素干扰,某些像元存在无值现象,开展无值像元拟合算法研究,是MODIS ET研究中需解决的问题之一。

参考文献(References)

- [1] Monteith J L. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965, 19(19): 205.
- [2] Wu Guiping, Liu Yuanbo, Zhao Xiaosong, et al. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Poyang Lake Basin using MOD16 products. *Geographical Research*, 2013, 32(4): 617-627. [吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于MOD16产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征. *地理研究*, 2013, 32(4): 617-627.]
- [3] Feng Fei, Yao Yunjun, Zhang Yanbin, et al. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Sanjiang Plain using MOD16 products. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(11): 1858-1864. [冯飞, 姚云军, 张彦彬, 等. 基于MOD16产品的三江平原蒸散量时空分布特征分析. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1858-1864.]
- [4] Bao Shanning, Cao Chunxiang, Huang Jianxi, et al. Research on winter wheat yield estimation based on assimilation of leaf area index and evapotranspiration data. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17 (7): 871-882. [包姗姗, 曹春香, 黄健熙, 等. 同化叶面积指数和蒸散发双变量的冬小麦产量估测方法. *地球信息科学学报*, 2015, 17(7): 871-882.]
- [5] Liu Rong, Wen Jun, Wang Xin. Spatial-temporal variation and abrupt analysis of evapotranspiration over the Yellow River Source Region. *Climatic and Environmental Research*, 2016, 21(5): 503-511. [刘蓉, 文军, 王欣. 黄河源区蒸散发量时空变化趋势及突变分析. *气候与环境研究*, 2016, 21(5): 503-511.]
- [6] Nishida K, Nemani R R, Glassy J M, et al. Development of an evapotranspiration index from Aqua/MODIS for monitoring surface moisture status. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, 41(2): 493-501.
- [7] Ruhoff A L, Paz A R, Collischonn W, et al. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing*, 2012, 4(3): 703-725.
- [8] Dong Q, Zhan C, Wang H, et al. A review on evapotranspiration data assimilation based on hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(2): 230-242.
- [9] Quan Chen, Zhou Bingrong, Han Yongxiang, et al. A study of evapotranspiration on the degraded alpine wetland surface in the Yangtze River source area. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1249-1257. [权晨, 周秉荣, 韩永翔, 等. 长江源区高寒退化湿地地表蒸散特征研究. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1249-1257.]
- [10] Zhou Ti, Peng Zhiqing, Xin Xiaozhou, et al. Remote sensing research of evapotranspiration over heterogeneous surfaces: A review. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20 (2): 257-277. [周倜, 彭志晴, 辛晓洲, 等. 非均匀地表蒸散遥感研究综述. *遥感学报*, 2016, 20(2): 257-277.]
- [11] Batra N, Islam S, Venturini V, et al. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 1-15.
- [12] Zhan C S, Zhao J, Wang H X, et al. Quantitative estimation of land surface evapotranspiration in Taiwan based on MODIS data. *Water Science and Engineering*, 2011, 4(3): 237-245.
- [13] Chen X. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000 to 2014. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(6): 661-680.
- [14] Zeng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai, et al. Study on regional evapotranspiration over Songnen Plain based on SEBAL model and MODIS products. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(1): 140-147. [曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 基于SEBAL模型与MODIS产品的松嫩平原蒸散量研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(1): 140-147.]
- [15] He Huijuan, Zhuo Jing, Dong Jinfang, et al. Surveying variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 products. *Arid Land Geography*, 2015, 38(5): 960-967. [何慧娟, 卓静, 董金芳, 等. 基于MOD16监测陕西省地表蒸散变化. *干旱区地理*, 2015, 38(5): 960-967.]
- [16] Wang Wantong. Research on regional land surface evapotranspiration estimation based on remote sensing technology: A case of Yiluo River Basin [D]. Kaifeng: Henan University, 2012. [王万同. 基于遥感技术的区域地表蒸散估算研究: 以伊洛河 basin 为例. 开封: 河南大学, 2012.]

- 以伊洛河流域为例[D]. 开封: 河南大学, 2012.]
- [17] Tian Jing, Su Hongbo, Chen Shaohui, et al. Spatial-temporal variations of evapotranspiration in China Mainland in recent 20 years. *Resources Science*, 2012, 34(7): 1277-1286. [田静, 苏红波, 陈少辉, 等. 近20年来中国内地地表蒸散的时空变化. *资源科学*, 2012, 34(7): 1277-1286.]
- [18] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 49-57. [尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去30年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. *地理研究*, 2016, 35(1): 49-57.]
- [19] Zhang Ying, Zhang Chaobin, Wang Zhaoqi, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland coverage in response to climate change from 1982 to 2012 in the Three Rivers Source Region. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 1977-1990. [张颖, 章超斌, 王钊齐, 等. 三江源1982-2012年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应. *草业科学*, 2017, 34(10): 1977-1990.]
- [20] Xu J. Complex response of runoff-precipitation ratio to the rising air temperature: The source area of the Yellow River, China. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(1): 35-43.
- [21] Du Jizeng, Wang Genxu, Yang Yan, et al. Temporal and spatial variation of the distributive patterns and driving force analysis in the Yangtze River and Yellow River source regions wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 6173-6182. [杜际增, 王根绪, 杨燕, 等. 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因. *生态学报*, 2015, 35(18): 6173-6182.]
- [22] Li Kaiming, Li Xuan, Wang Cuiyun, et al. Research on the environmental effect caused by climate change in the source region of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1183-1192. [李开明, 李珣, 王翠云, 等. 黄河源区气候变化的环境效应研究. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1183-1192.]
- [23] Hu Guangyin, Jin Huijun, Dong Zhibao, et al. Research of land-use and land-cover change (LUCC) in the source regions of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 573-581. [胡光印, 金会军, 董治宝, 等. 黄河源区土地利用/覆盖变化(LUCC)研究. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 573-581.]
- [24] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [25] Zhan Z M. Study on regional evapotranspiration model based on remote sensing method. *Remote Sensing Technology & Application*, 2002, 17(6): 364-369.
- [26] Guo Xiaoyin, Cheng Guodong. Advances in the application of remote sensing to evapotranspiration research. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(1): 107-114. [郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 107-114.]
- [27] Chen Dan, Mo Xingguo, Lin Zhonghui, et al. Estimation of evapotranspiration over Wuding River Basin with an eco-hydrological model and MODIS data. *Geographical Research*, 2006, 25(4): 59-197. [陈丹, 莫兴国, 林忠辉, 等. 基于MODIS数据的无定河流域蒸散模拟. *地理研究*, 2006, 25(4): 59-197.]
- [28] Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 378-387. [高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956-2000年中国潜在蒸散量变化趋势. *地理研究*, 2006, 25(3): 378-387.]
- [29] Alton P, Fisher R, Los S, et al. Simulations of global evapotranspiration using semiempirical and mechanistic schemes of plant hydrology. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(4): 6149-6150.
- [30] Wang Suping. Trend of potential evapotranspiration and its main impact factors in the source regions of Yangtze and Yellow rivers. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(5): 960-965. [王素萍. 近40a江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因素分析. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 960-965.]
- [31] Wang Suping, Song Lianchun, Han Yongxiang. Estimation of the potential evapotranspiration in paramos. *Arid Zone Research*, 2009, 26(1): 128-131. [王素萍, 宋连春, 韩永翔. 高寒区潜在蒸散量的计算方法探讨. *干旱区研究*, 2009, 26(1): 128-131.]
- [32] Lawrence P J, Chase T N. Climate impacts of making evapotranspiration in the community land model (CLM3) consistent with the simple biosphere model (SiB). *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10(2): 374-394.
- [33] Kiptala J K, Mohamed Y, Mul M L, et al. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in eastern Africa. *Water Resources Research*, 2013, 49(12): 8495-8510.
- [34] Yang Xiuqin, Wang Guojie, Pan Xin, et al. Spatio-temporal variability of terrestrial evapotranspiration in China from 1980 to 2011 based on GLEAM data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015(21): 132-141. [杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 等. 基于GLEAM遥感模型的中国1980-2011年地表蒸散发时空变化. *农业工程学报*, 2015(21): 132-141.]

- [35] Jiang Yanyang, Wang Wen, Zhou Zhenghao. Evaluation of MODIS MOD16 evapotranspiration product in Chinese river basins. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (3): 517-528. [姜艳阳, 王文, 周正昊. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 517-528.]
- [36] Ruhoff A L, Paz A R, Aragao L E O C, et al. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58 (8): 1658-1676.
- [37] Vural C, Kazan S. Mapping evapotranspiration using MODIS and MM5 Four-Dimensional Data Assimilation. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 657-673.
- [38] Liu Jian, Zhang Qi, Xu Chongyu, et al. Change of actual evapotranspiration of Poyang Lake watershed and associated influencing factors in the past 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(2): 139. [刘健, 张奇, 许崇育, 等. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(2): 139.]
- [39] Sun L, Sun R, Li X, et al. Estimating evapotranspiration using improved fractional vegetation cover and land surface temperature space. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(3): 225-231.
- [40] Pan Z, Liu G, Zhou C. Dynamic analysis of evapotranspiration based on remote sensing in Yellow River Delta. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(4): 408-415.
- [41] Xin X Z, Tian G L, Liu Q H. A review of researches on remote sensing of land surface evapotranspiration. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(3): 233-240.
- [42] Lin Wenjing, Su Zhongbo, Dong Hu, et al. Regional evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance system (SEBS) in Hebei Plain, northeastern China. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4): 663-672.
- [43] Liu C S, Gao W, Gao Z Q. Estimation of regional surface evapotranspiration using MODIS products. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 782-788.
- [44] Jia L, Xi G, Liu S, et al. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2009, 6(2): 1775-1787.
- [45] Rwasoka D T, Gumindoga W, Gwenzi J. Estimation of actual evapotranspiration using the surface energy balance system (SEBS) algorithm in the Upper Manyame catchment in Zimbabwe. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2011, 36 (14): 736-746.
- [46] Jia D U, Song K, Wang Z, et al. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(1): 73-91.
- [47] He Tian, Shao Quanqin. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(6): 979-988. [贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001-2010 年蒸散发时空格局变化分析. *地球信息科学学报*, 2014, 16(6): 979-988.]
- [48] Huang C, Li Y, Gu J, et al. Improving estimation of evapotranspiration under water-limited conditions based on SEBS and MODIS data in arid regions. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16795-16814.
- [49] Wang Lijuan, Guo Ni, Yang Qidong, et al. Land surface evapotranspiration estimated based on MODIS remote sensing products over the semi-arid Northwest China. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 375-384. [王丽娟, 郭妮, 杨启东, 等. 基于 MODIS 遥感产品估算西北半干旱区的陆面蒸散量. *高原气象*, 2016, 35(2): 375-384.]
- [50] Bai Luyao, Rong Yanshu. Impacts of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 46-50. [白路遥, 荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响. *水资源保护*, 2012, 28(1): 46-50.]
- [51] Wang Zhigui, Wang Suping, Wang Jianbing, et al. Study on the variation characteristics of reference crop evapotranspiration in recent 40 years in source region of Yellow River. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 30 (6): 169-173. [汪治桂, 王素萍, 王建兵, 等. 黄河源区近 40 年参考作物蒸散量变化特征研究. *干旱地区农业研究*, 2013, 30(6): 169-173.]
- [52] Batra N, Islam S, Venturini V, et al. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 1-15.
- [53] Long D, Longuevergne L, Scanlon B R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1131-1151.
- [54] Wang Pengtao, Yan Junping, Jiang Chong, et al. Spatial and temporal variations of evapotranspiration and its influencing factors in the Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia Region. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(2): 499-507. [王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 2000-2012 年陕甘宁黄土高原区地表蒸散时空分布及影响因素. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 499-507.]

- 2016, 36(2): 499-507.]
- [55] Taconet O, Bernard R, Vidalmadjar D. Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 1986, 25(3): 284-307.
- [56] Jiang L, Islam S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(17): 2773-2776.
- [57] Jia L, Xi G, Liu S, et al. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2009, 6(2): 1775-1787.
- [58] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [59] Ramoelo A, Majozi N, Mathieu R, et al. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African Savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 942-945.
- [60] Tang R, Shao K, Li Z L, et al. Multiscale validation of the 8-day MOD16 evapotranspiration product using flux data collected in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2015, 8(4): 1478-1486.
- [61] Zhang Qiaofeng, Liu Guixiang, Yu Hongbo, et al. Temporal and spatial dynamic of ET based on MOD16A2 in recent fourteen years in Xilingol steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(2): 286-293. [张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于MOD16A2的锡林郭勒草原近14年的蒸散发时空动态. *草地学报*, 2016, 24(2): 286-293.]
- [62] Pan T, Wu S, Liu Y. Relative contributions of land use and climate change to water supply variations over Yellow River Source Area in Tibetan Plateau during the past three decades. *Plos One*, 2015, 10(4): e0123793.
- [63] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Steven W Running. Algorithm theoretical basis document: MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (NASA MOD16A2/A3) Collection 5. NASA Headquarters. ResearchGate (<https://www.researchgate.net/publication/315700715>), 2013, November 20.
- [64] Wang Qiang, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan Mountain area from 2004 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 3084-3095. [王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区2004-2014年植被NPP时空变化及其驱动因子. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095.]
- [65] Zhang Jing, Ren Zhiyuan. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration based on MOD16 in the Hanjiang River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 274-282. [张静, 任志远. 基于MOD16的汉江流域地表蒸散发时空特征. *地理科学*, 2017, 37(2): 274-282.]
- [66] Zeng Yan, Qiu Xinfa, Liu Changming. Distributed modeling of evapotranspiration in the Yellow River basin. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 632-640. [曾燕, 邱新法, 刘昌明. 黄河流域蒸散量分布式模拟. *水科学进展*, 2014, 25(5): 632-640.]
- [67] Shao Quanqin, Liu Jiuyan, Huang Lin, et al. Integrated assessment on the effectiveness of ecological conservation in Sanjiangyuan National Nature Reserve. *Geographical Research*, 2013, 32(9): 1645-1656. [邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 等. 2005-2009年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估. *地理研究*, 2013, 32(9): 1645-1656.]
- [68] Shao Quqin, Fan Jiangwen, Liu Jiuyan, et al. Assessment on the effects of the first-stage ecological conservation and restoration project in Sanjiangyuan region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 3-20. [邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 三江源生态保护和建设工程一期生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20.]
- [69] Wu Lina, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 54-63. [吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.]
- [70] Xiao Guojun, Zhang Qiang, Wang Jing. Impact of global climate change on agro-ecosystem: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1877-1885. [肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1877-1885.]
- [71] Bai Xiaolan, Wei Jiahua, Xie Hongwei. Characteristics of wetness/dryness variation and their influences in the Three River Headwaters Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 1-14. [白晓兰, 魏加华, 解宏伟. 三江源区干湿变化特征及其影响. *生态学报*, 2017, 37(24): 1-14.]
- [72] Cui Fengmei. Comparison and analysis of observation between E601B and small evaporator. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2007, 28(Suppl.): 174-176. [崔凤梅. E601B型与小型蒸发器观测对比分析. *气象研究与应用*, 2007, 28(Suppl.): 174-176.]
- [73] Sun Yanling, Yan Xiaodong, Xie Deti. Study on the relationship between vegetation and climate in China using factor analysis. *Mountain Research*, 2007, 25(1): 54-63. [孙艳玲, 延晓冬, 谢德体. 基于因子分析方法的中國植被NDVI与气候关系研究. *山地学报*, 2007, 25(1): 54-63.]

Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and its relationship with climate factors in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014

YE Hong¹, ZHANG Tingbin^{1,2,3}, YI Guihua⁴, LI Jingji^{5,6}, BIE Xiaojuan¹,
LIU Dong¹, LUO Linling¹

(1. Chengdu University of Technology, College of Earth Science, Chengdu 610059, China; 2. The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology of Ministry of Land and Resources, Chengdu 610059, China; 4. Chengdu University of Technology, College of Management Science, Chengdu 610059, China; 5. Chengdu University of Technology, College of Environmental and Civil Engineering Institute, Chengdu 610059, China; 6. Chengdu University of Technology, Institute of Ecological Resource and Landscape, Chengdu 610059, China)

Abstract: Located at the eastern margin of the Tibetan Plateau, the source region of the Yellow River is an important ecological security shelter for economic development in Southwest China, with its unique natural habitats and abundant natural resources. Based on the data of 18 meteorological stations within and around the source region, map of China vegetation types (1: 1000,000) and DEM data, and using the methods of trend analysis, relative inter-annual variation and correlation analysis, we selected MODIS evapotranspiration (ET) as the main data source to research the spatio-temporal characteristics of ET and its variation under different land use types as well as its relationship with climate factors in the study area from 2000 to 2014. The results indicate that: (1) the regional differentiation of mean ET over years is obvious, the northern ET is significantly weaker than that of the central and southeastern parts, and the strongest ET is observed in the southeastern part. The multi-year mean value of ET is 538.61 mm/a, and the anomaly relative variation is obvious. In addition, the trend of inter-annual variation of ET decreases firstly and then increases, and the trend variation rate is 0.44 mm/a. (2) During the study period, the ET shows a periodic unimodal trend and peaks in July. Moreover, seasonal differences of ET are apparent in the source region of the Yellow River, and the highest value of ET reaches 188.14 mm/a in summer, followed by spring and autumn, yet the lowest is only 97.15 mm/a in winter. (3) From 2000 to 2014, the value of ET in different types of land use has a similar regular pattern, namely: wetland > forest > grassland > other types > bare land. On the whole, the value of ET in each type of land use increases gradually. (4) According to the correlation analysis results, there are positive correlations between ET and air temperature, as well as between ET and precipitation, while ET has a negative correlation with relative humidity. The effect of precipitation on ET is stronger than that of air temperature. Furthermore, the result of ET driven by different factors demonstrates that the climate-driven region of ET is predominantly precipitation-driven in the source region of the Yellow River.

Keywords: evapotranspiration (ET); spatio-temporal characteristics; climatic factors; MODIS; the source region of the Yellow River