

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.08

格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张 京

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 格尔木河流域干旱少雨, 蒸发强烈, 为格尔木地区经济发展提供水资源保障。蒸散发是干旱内陆地区地表水及地下水排泄的主要方式, 准确估算研究区长时间序列的蒸散量时空分布及其影响因素, 对研究区水资源合理开发利用及生态环境保护具有重要意义。传统的蒸散量估算方法难以获取大尺度时空范围参数且估算结果误差较大。文章以格尔木河流域山前平原区为研究区, 应用连续序列的 MODIS 数据及 GLDAS 气象数据基于 SEBS 模型估算格尔木河流域山前平原区蒸散量, 利用线性回归法及 Mann-Kendall 显著性检验法分析其连续时间序列内的变化趋势, 分析其影响因素。结果表明: 研究区蒸散量从 2001 到 2016 年总体呈增长趋势, 盐沼平原及山前戈壁砾质平原大部分地区蒸散量变化在 16 年间呈稳定不变状态, 盐湖区和绿洲平原呈显著增长趋势。研究区 16 年间不同地貌蒸散量夏季增减幅度均远大于其他三季, 冬季变化幅度最小。

关键词: 蒸散量; SEBS 模型; 线性回归; Mann-Kendall 显著性检验; 山前平原区

中图分类号: P641.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0055-10

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

ZHU Xiaoqian, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, ZHANG Jing

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Golmud River Basin is located in the southwest of the Qaidam Basin in Qinghai Province, which provides guarantee of water resources for the city of Golmud. The basin is characterized by plateau continental climate, drought, less rain and strong evaporation. Groundwater and surface water are mainly drained by evapotranspiration (ET) in arid inland areas. Therefore, it is of great significance to accurately estimate the temporal and spatial distribution of ET and its influencing factors in the long time series in the study area for the rational development and utilization of water resources and ecological environment protection. However, studies of ET and its influencing factors of the Golmud River Basin have been insufficient for many years. Traditional methods of ET estimation are difficult to obtain temporal and spatial parameters on a large scale and have large errors in estimation results. The valley piedmont plain of the Golmud River Basin is taken as the study area, and a spatial and temporal distribution of time series trends of ET are estimated, so as to provide reference for rational development and utilization of water resources in the study area. Based on the SEBS model, the continuous MODIS data and GLDAS meteorological data are used to estimate the regional ET in this paper. Linear regression method and Mann-Kendall significance test are used to analyze the variation trend of continuous time series. The impact factors of ET are discussed in this work. The results show that the regional ET increased in the Golmud River Basin from 2001 to 2016. The ET value is stable in most areas of the salt

收稿日期: 2018-10-21; 修订日期: 2018-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(41372250)

第一作者: 朱晓倩(1994-), 女, 博士研究生, 主要从事水环境遥感和生态水文学方面的研究。E-mail: m18612369569@163.com

通讯作者: 金晓媚(1968-), 女, 博士, 教授, 主要从事水环境遥感和生态水文学方面的研究。E-mail: jinxm@cugb.edu.cn

marsh and the piedmont gobi gravel plain, whereas it increased in salt lake and oasis plain during the 16 years. The increase and decrease of summer ET is much larger than that of other three seasons, and winter ET has the smallest variation in different geomorphic units.

Keywords: evapotranspiration (ET); SEBS model; linear regression; Mann-Kendall significance test; valley piedmont plain

蒸散 (Evapotranspiration, ET) 是土壤蒸发和植物蒸腾的总称。蒸散量是自然水循环系统中十分重要的组成部分,是干旱内陆地区地表水和地下水的主要排泄方式,干旱区地表降雨量的 90% 以上是通过蒸散的形式返回到大气^[1]。格尔木河是柴达木盆地第二大河,不仅为格尔木地区社会经济发展提供水资源保障,同时也是山前平原区地下水主要补给源和涵养植被生态的主要水源。河流自昆仑山流出后,经山前戈壁砾石区时大量下渗对地下水进行补给,后穿过细土平原区至洪积扇前缘,地下径流受岩性影响溢出形成泉集河,最终流经盐沼平原汇入终端达布逊湖排泄。由于格尔木河冲洪积扇下部地下水埋深浅,则会受强烈蒸发作用,使地下水位变化受到影响^[2],加之近年来对地下水的开采,径流汇入的终端达布逊湖面积逐渐缩小。因此对格尔木河流域长时间序列的蒸散量时空分布及其影响因素的分析就显得尤为必要。虽然前人对格尔木河流域蒸散发有过研究,但缺乏长时间序列蒸散量的时间与空间变化,无论时间尺度还是空间尺度均难准确反映格尔木河流域的年际与年内变化趋势。

就蒸散量估算的研究方法而言,传统的蒸散量估算方法多为基于 Penman 公式^[3]及 Penman-Monteith 公式^[4]估算潜在蒸发及非饱和下垫面蒸发。后发展的传统实测方法如波文比法、涡度相关法、蒸渗仪法等。波文比法^[5-6]简单且精度较高,但其适用范围却因其要求下垫面均匀且无平流影响而受到很大的限制;蒸渗仪法精度最高可达 0.01 ~ 0.02 mm,但该方法所需费用高,无法进行大面积布点测量,还需专业技术人员进行监控。涡度相关法是直接测量乱流通量的方法,较其它实测方法更为精密和可靠,但也有必须设立在平坦、植被单一的下垫面上的缺点,且其维护成本较高^[7-8]。而在研究区以往的水资源评价中也不可避免地涉及到潜水蒸发问题,多位学者^[9-10]基于潜水蒸发强度与潜水埋深的关系利用阿维里扬诺夫经验公式对格尔木河流域蒸发量进行计算,而受包气带土质、岩性及气候等的影响,计算结果误差较大,同时计算所得结果仅是某

时段内的蒸发量。总之,传统估算蒸散量的方法受下垫面、气象因素、植被等因素的影响,其结果存在的误差难以估计,且传统方法存在难以获取大尺度时空范围内参数的问题,这也使得长时间序列下大尺度范围的蒸散量时空分布的研究无法准确地进行。

而随着遥感技术的不断推广,基于遥感手段推出了许多地表蒸散发的估算模型,扩展了传统方法在时空尺度上的应用范围,同时减小了传统方法以点代面引发的误差,使得蒸散量的估算结果更为精准。Su Z^[11-12]提出地表能量平衡系统 (Surface Energy Balance System, SEBS),其目的在于将卫星对地观测的可见光、近红外和热红外波段资料与大气模式输出数据结合,从而更连贯地估算大气湍流通量,该模型目前应用较为广泛。之后多位学者^[13-18]将该模型应用于不同的空间及时间尺度,并进行了不同程度的验证,都得到了较好的蒸散量估算结果,证明了 SEBS 模型计算蒸散量的合理可行性。同时,利用全球陆面同化系统 (GLDAS) 生成的气象数据较气象站观测数据具有更好的时空连续性,由 GLDAS 气象数据估算得出的蒸散量结果准确性也相对较高。

因此本文以格尔木河流域山前平原区为研究区,应用连续序列的 MODIS 数据及 GLDAS 气象数据基于 SEBS 模型估算研究区 2001 - 2016 年间 16 年的蒸散量,并就蒸散量时空分布特征及其影响因素进行分析。通过准确估算研究区长时间序列的蒸散发时空分布,客观评价格尔木河流域可持续利用量,为研究区水资源合理开发利用及生态环境保护提供参考。

1 研究区概况

研究区位于格尔木河流域的山前平原区,北临达布逊湖,南靠昆仑山,地势南高北低,平均海拔为 2 780 m。格尔木流域山前平原区具有典型的高原大陆性气候特征,干旱,多风少雨,蒸发强烈。多年平均降水量为 42.7 mm,多年平均蒸发量约为 2 600 mm,年均气温 4.7 ℃,相对湿度 32%。研究区地形由西向东倾斜且南高北低,地貌复杂,地貌类型由南向北分别

为山前洪积平原、冲积平原、冲湖积平原以及湖积平原,地下水的赋存及运动依赖于巨厚的第四系松散沉积物,从而形成了研究区孔隙地下水系统,由北向南主要可分为盐沼地区、细土平原区及山前戈壁砾石区。研究区工业以盐化工为主,植被类型主要为枸杞、藜麦、芦苇、红柳等。

格尔木河为青海境内河流,发源于昆仑山北麓,经格尔木市,最终流入东达布逊湖,全长 468 km,流域面积 $1.786 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。河水补给来源以高山融雪为主,次为河谷潜水,平均流量 $21.3 \text{ m}^3/\text{s}$,年径流量 $6.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

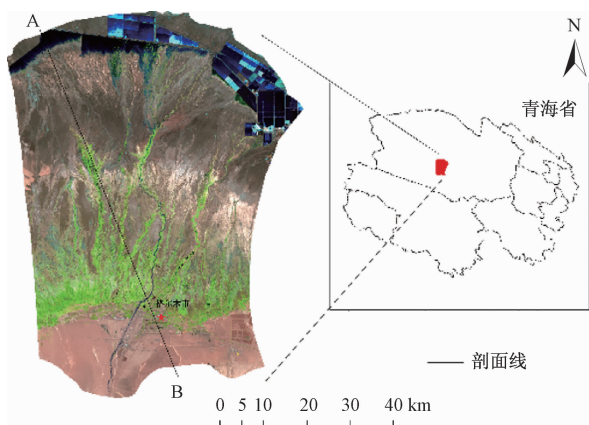


图1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location map of the study area

2 研究方法及数据

2.1 研究方法

(1) SEBS 模型

SEBS(Surface Energy Balance System)模型主要通过地表能量平衡方程估算地表净辐射通量和土壤热通量,之后计算出感热通量,由地表净辐射通量、土壤热通量和感热通量得出潜热通量及蒸发比,最终估算得出日蒸散量。

任一时刻,地表的净辐射通量与该区域感热通量、潜热通量及土壤热通量处于平衡,由此得任一时刻的表面能量平衡方程为:

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (1)$$

式中: R_n ——净辐射通量/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$;

G_0 ——土壤热通量/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$;

H ——感热通量/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$;

λE ——潜热通量/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$;

λ ——水的汽化潜热/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$;

E ——实际水分蒸散总量/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$ 。

潜热通量指沿垂直方向,单位时间、单位面积上地表和植被以及大气之间因为水的相变而交换的热量,而在地表和大气能量交换中,潜热通量所占的比例即为蒸发比。其计算公式为:

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{H + \lambda E} = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} = \frac{\Lambda_r \lambda E_{wet}}{R_n - G_0} \quad (2)$$

式中: Λ ——蒸发比;

Λ_r ——相对蒸发比;

H ——实际蒸散量与最大蒸散量之比。

日蒸散量计算公式为:

$$E_{\text{daily}} = 8.64 \times 10^7 \times \frac{24}{0} \times \frac{\overline{R_n} - \overline{G_0}}{\lambda \rho_w} \quad (3)$$

式中: E_{daily} ——地表实际日蒸散量/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$;

$\frac{24}{0}$ ——日均蒸发比;

$\overline{R_n}$ 和 $\overline{G_0}$ ——日净辐射通量和土壤热通量/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$;

λ ——汽化潜热/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$;

ρ_w ——水的密度/ $(1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

(2) 一元线性回归分析

回归分析是确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法。在回归分析中,只包括一个自变量和一个因变量,且二者的关系可用一条直线近似表示,这种回归分析称为一元线性回归分析。通过一元线性回归分析可模拟研究区每个栅格的变化趋势,本文通过该方法分析研究区2001—2016年每年7月份蒸散量的变化趋势。其计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times M_{ET-i}) - (\sum_{i=1}^n i) \times (\sum_{i=1}^n M_{ET-i})}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中: n ——总年数;

M_{ET-i} ——第*i*年的 ET 值, i 为年序号(1、2、3……)。

计算得出的Slope可反映研究区各栅格点 ET 变化趋势。若 $\text{Slope} > 0$,则该栅格点 ET 呈增长趋势;若 $\text{Slope} < 0$,则该栅格点 ET 呈减少趋势。

(3) Mann-Kendall 显著性检验法^[19-21]

Mann-Kendall是一种已经广泛应用于水文数据分析非参数检验方法,该方法能很好地揭示时间序列的变化趋势,但是不需要样本数据服从一定的分布,同时也不受少数异常值的干扰。其检测过程如下:

对于时间序列 $X(x_1, x_2, x_3, \dots)$:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

其中, n 为数据样本长度, sgn 为符号函数, 其定义如下:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当 $n < 10$ 时, 直接使用统计量 S 进行双边趋势检验。

当 $n \geq 10$ 时, 统计量大致服从正态分布, 使用检验统计量 Z 进行趋势检验, Z 值计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{(S+1)}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}}, & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中,

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (8)$$

式中: m ——序列中结(重复出现的数据组)的个数;

t_i ——结的宽度(第 i 组重复数据组中的重复数据个数)。

同样采用双边趋势检验, 在给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 时, 接受原假设, 即趋势不显著; 当 $|Z| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 时, 则拒绝原假设, 即认为趋势显著。

2.2 研究数据

(1) MODIS 数据

本文选取 2001—2016 年中等分辨率的 MODIS 数据, 共计 1472 景, 基于 SEBS 模型估算地表蒸散量。其中包括空间分辨率分别为 500 m、1 000 m, 时间分辨率均为 8 d 的 MOD09A1 数据(地表反射率产品)和 MOD11A2 数据(地表比辐射率与地表温度产品)。

MODIS 数据均由美国 NASA 网站获取(<https://reverb.echo.nasa.gov/reverb>)。为保证研究中数据的一致性, 将数据统一重采样为 500 m 分辨率。

(2) GLDAS 气象数据

由于研究区气象站较少, 本文采用 GLDAS(Global Land Data Assimilation System)数据中提取的比湿/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、气温/K 和气压/Pa 四个波段参与 SEBS 模型蒸散发的计算。选取 2001—2016 年时间分辨率为 1 月、空间分辨率为 0.25° 的 GLDAS

气象数据, 共计 192 景。GLDAS 数据来源于 <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>。为保证研究中数据的一致性, 数据需重采样为 500 m 分辨率。

(3) DEM 数据

为定量地反映研究区地形的空间变化特征, 本文选取了空间分辨率 90 m 的 SRTM-DEM 数据, 并于 ENVI 软件中进行空间投影、重采样等预处理, 使其与 MODIS、GLDAS 数据空间分辨率一致。数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)。

(4) 气象数据

为研究气象因素对蒸散量的影响, 本文选取了研究区内格尔木气象站气温、降水、相对湿度、蒸发等气象数据。数据来源于“中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)”的中国地面气候资料日值数据集。

3 结果与分析

3.1 蒸散量时空分布特征

本文基于 SEBS 模型结合 GLDAS 气象数据得到格尔木河流域山前平原区 2001—2016 年的日蒸散量, 乘以相应月份的天数得到月蒸散量, 将各月蒸散量相加即为年蒸散量。通过研究区 2016 年蒸散量空间分布图(图 2)可知: 研究区北部为大片盐池, 蒸散量最高, 最高可达 780 mm; 研究区内蒸散量与河流分布特征具有较好的一致性, 自南向北的河流流经区域蒸散量整体较大; 中南部格尔木市东西两侧为研究区植被主要发育带, 市西侧为格尔木西农场, 以耕地为主, 农作物类型主要为枸杞、藜麦、小麦等, 市东侧除农田主要发育芦苇、红柳、沙柳、芨芨草等, 蒸散量较高, 约 200~300 mm; 中北部裸土地区和南部荒漠地区蒸散量较小, 约 100 mm。

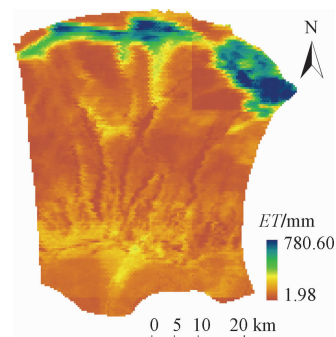


图 2 研究区 2016 年蒸散量空间分布图

Fig. 2 Annual ET distribution of the study area in 2016

对研究区 2001—2016 年蒸散量年际变化及多

年平均蒸散量年内变化进行统计(图3),结果表明:研究区2001—2004年蒸散量略有升高,到2005年有大幅度增长,增长到82.94 mm,总蒸散量约 $3.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,2005—2008年蒸散量基本保持不变,浮动于90 mm左右,2008—2016年蒸散量有所波动,但2001—2016年蒸散量总体呈上升趋势。其中2015年蒸散量最大,为185 mm,总蒸散量约 $8.45 \times 10^8 \text{ m}^3$;2001年最小,为25 mm,总蒸散量约 $1.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。研究区多年平均年内夏季即6、7、8三个月蒸散量最大,约20 mm;冬季蒸散量小,11、12、1、2月蒸散量值在0.5~3 mm之间。通过与前人对格尔木河流域蒸散量估算结果^[22~24]对比表明,本文计算所得蒸散量空间分布规律与前人计算结果吻合,这也进一步证明了SEBS模型估算蒸散量结果的准确可靠性;但由于研究区范围不同,蒸散量绝对值上有差异;同时,前人计算区域蒸散发时只采用格尔木一个气象站的气象值代表全区,计算结果有一定误差。本文采用GLDAS全区气象数据计算区域蒸散发,所得结果相对更为可靠。

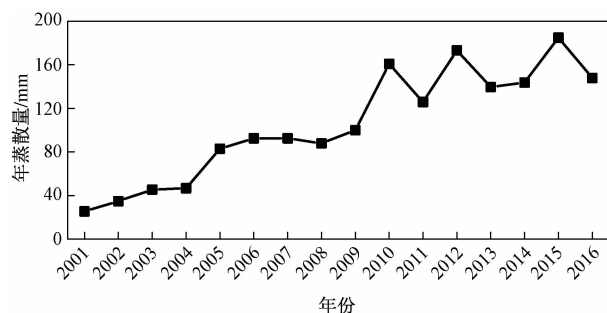


图3 研究区2001—2016蒸散量年际变化规律图

Fig. 3 Annual variation of actual evapotranspiration in the study area from 2001 to 2016

3.2 基于线性回归和 Mann-Kendall 的蒸散量变化趋势分析

为进一步研究研究区2001—2016年16年间蒸散量的连续空间变化趋势及其变化的显著性,本文利用一元线性回归分析法和 Mann-Kendall 显著性检测法对研究区蒸散量16年的叠加数据进行分析。结合线性回归分析结果及实际情况分析,取蒸散变化速率估值 $Slope_{sta} = 10$ 时,蒸散量基本稳定不变,即 $0 \leq Slope \leq 10$ 时,蒸散量呈基本稳定趋势,由于本文中时间序列长度为16(2001—2016年),所以采用检验统计量 Z 进行显著性趋势检验,取显著水平 $\alpha = 0.05$, $Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = Z_{0.975} = 1.96$ 。

为提高分类结果的精确性,将两种方法结合得到研究区16年间蒸散量空间变化趋势图(图4),即当 $Slope < 0$ 且 $|Z| > 1.96$,序列呈显著下降趋势;当 $Slope < 0$ 且 $|Z| \leq 1.96$,序列呈下降但不显著趋势;当 $Slope \geq 0$ 且 $Slope \leq 10$,序列呈基本稳定趋势;当 $Slope > 10$ 且 $|Z| > 1.96$,序列呈显著增长趋势;当 $Slope > 10$ 且 $|Z| \leq 1.96$,序列呈增长但不显著趋势。最终将研究区连续时间序列蒸散量空间变化趋势分为五类:显著增长、轻微增长、基本稳定、轻微降低、显著降低。结果表明:线性回归分析法和 Mann-Kendall 显著性检测法得出的结果具有良好的一致性。研究区大部分地区蒸散量呈稳定不变状态,其面积占研究区总面积的68.58%;蒸散量显著增长的地区主要集中在研究区中南部植被发育带及北部盐池区,占研究区总面积的29.70%;仅极少地区有轻微或显著的减少趋势,蒸散量减少地区约占研究区总面积的1%;其余轻微增长地区占研究区总面积的0.72%。同时为分析格尔木

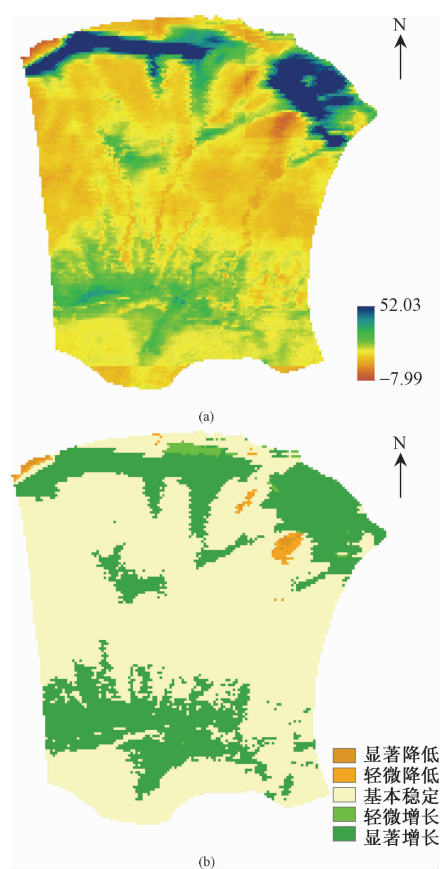


图4 研究区连续时间序列蒸散量空间变化趋势 (a)及显著性变化分类(b)图

Fig. 4 Spatial variation trend (a) and classification of significant changes (b) of continuous time series evapotranspiration in the study area

河流域山前平原区各季节蒸散量变化趋势,将一年 12 个月按照春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12—2 月)划分为四季。分别估计四季蒸散量稳定时的值,统计了研究区 2001—2016 年四季占全年蒸散

量的比重,并求其平均值,得到 16 年间四个季节在年蒸散量中所占比例值(表 1),结合实际,最终确定四季的 $Slope_{sta}$ 值:春季 $Slope_{sta} = 1.5$,夏季 $Slope_{sta} = 6$,秋季 $Slope_{sta} = 3$,冬季 $Slope_{sta} = 0.5$ 。

表 1 研究区四季蒸散量占年蒸散量比例表

Table 1 Proportion of four seasons evapotranspiration to annual evapotranspiration in the study area

年份	春		夏		秋		冬		蒸散量/ mm
	蒸散量/mm	占年 ET 比/%	蒸散量/mm	占年 ET 比/%	蒸散量/mm	占年 ET 比/%	蒸散量/mm	占年 ET 比/%	
2001	2.01	7.87	19.09	74.89	4.19	16.42	0.21	0.82	25.49
2002	3.41	9.76	27.36	78.43	3.52	10.09	0.60	1.71	34.88
2003	6.04	13.29	32.23	70.94	5.64	12.41	1.53	3.36	45.43
2004	7.65	16.39	27.86	59.69	8.43	18.07	2.73	5.85	46.68
2005	8.14	9.82	46.44	55.99	25.17	30.35	3.18	3.84	82.94
2006	11.49	12.42	59.32	64.12	17.46	18.87	4.24	4.59	92.51
2007	13.47	14.57	52.96	57.30	21.85	23.64	4.16	4.50	92.43
2008	18.32	20.85	44.00	50.07	22.14	25.20	3.41	3.89	87.87
2009	11.31	11.31	53.19	53.18	31.42	31.41	4.10	4.10	100.02
2010	15.50	9.64	108.58	67.51	30.56	19.00	6.18	3.84	160.82
2011	19.53	15.53	76.86	61.11	24.91	19.80	4.47	3.55	125.78
2012	32.24	18.61	100.14	57.81	36.61	21.13	4.24	2.45	173.24
2013	25.04	17.94	73.22	52.47	37.06	26.56	4.24	3.04	139.56
2014	21.43	14.92	81.09	56.43	36.80	25.61	4.37	3.04	143.69
2015	30.94	16.72	102.77	55.55	43.16	23.33	8.14	4.40	185.01
2016	26.70	18.06	74.90	50.67	39.69	26.85	6.53	4.42	147.82
平均值	15.83	14.23	61.25	60.39	24.29	21.80	3.90	3.59	105.26
中值	14.48	14.74	56.25	57.55	25.04	22.23	4.20	3.84	96.27
最大值	32.24	20.85	108.58	78.43	43.16	31.41	8.14	5.85	185.01
最小值	2.01	7.87	19.09	50.07	3.52	10.09	0.21	0.82	25.49

按照确定的 $slope$ 值得到研究区 16 年间四季蒸散量空间变化趋势图及显著性变化趋势图(图 5、6),结合显著性变化趋势分类的面积统计结果进行分析。

结果表明:格尔木河流域山前平原区夏季蒸散量增减幅度远高于其他三季,秋季和春季次之,冬季增减幅度最小。夏季和秋季均有大面积显著增长地区,主

要集中在研究区北部盐池区及中南部植被发育带,研究区中北部及南部保持基本稳定趋势,小部分区域有轻微降低趋势。冬季研究区蒸散量除盐池部分有显著和轻微的增长外,其余大部分地区蒸散量都有轻微降低趋势。春季蒸散量也主要集中在北部盐池区,中南部植被发育带较夏季、秋季增幅减少,但也有少量显著

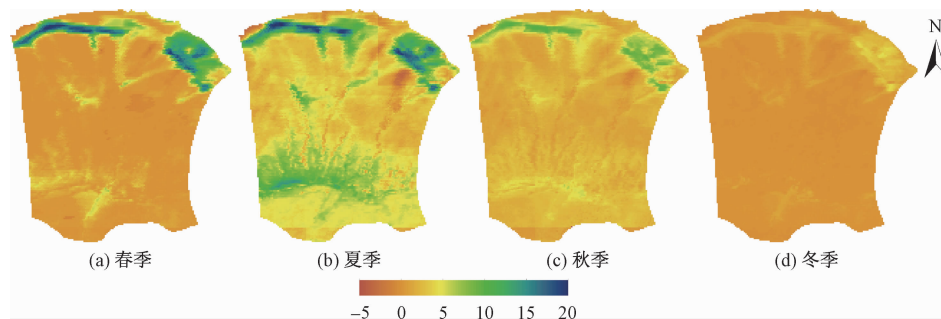


图 5 研究区蒸散量季节空间变化趋势图

Fig. 5 Seasonal spatial variation trend of evapotranspiration in the study area

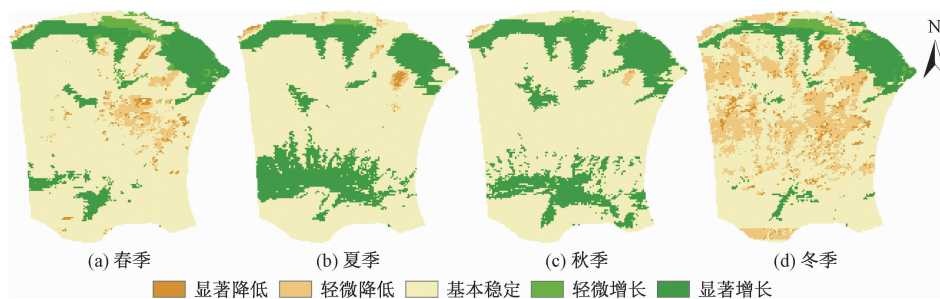


图6 研究区蒸散量季节显著性变化趋势图

Fig. 6 Seasonal significance variation trend of evapotranspiration in the study area

增涨趋势。蒸散量变化趋势面积统计(图7)看,呈现显著增长趋势:夏季(26.46%)>秋季(25.49%)>春季(20.99%)>冬季(16.66%);轻微增长趋势:冬季(4.87%)>春季(4.38%)>夏季(0.49%)>秋季(0.36%);基本稳定趋势:秋季(73.66%)>夏季(71.54%)>春季(67.79%)>冬季(52.25%);轻微降低趋势:冬季(22.49%)>春季(5.19%)>夏季(1.06%)>秋季(0.45%);显著降低趋势:冬季(3.72%)>春季(1.64%)>夏季(0.45%)>秋季(0.04%)。总体上格尔木河流域山前平原区大部分地区蒸散量处于基本稳定状态,16年来北部盐池地区不断扩大导致盐池区域蒸散量显著增加。

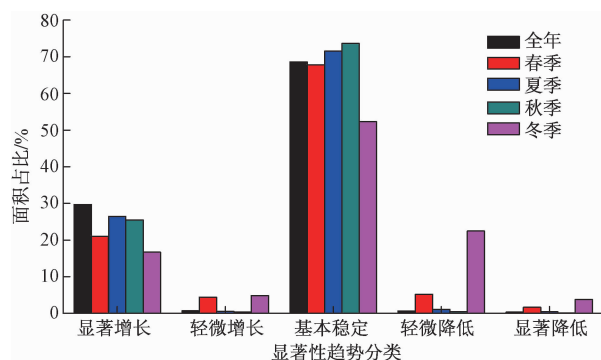


图7 研究区全年及四季蒸散量变化趋势柱状图

Fig. 7 Histogram of annual and seasonal evapotranspiration variation trend in the study area

为进一步分析研究区蒸散量的时空分布,将研究区按山前戈壁砾质平原、绿洲平原、盐沼平原及盐湖区划分为四个地貌及水文地质单元,分别对不同地貌单元蒸散量进行统计分析(图8)。结果表明:研究区蒸散量空间分布与地貌类型空间格局具有较好的一致性。总体来看,研究区蒸散量盐湖区>盐沼平原>绿洲平原>山前戈壁砾质平原。四个地貌单元蒸散量从2001—2016年总体呈增长趋势,其中盐湖区增长速率最快。2010年后,由于洪水及耕地面积增加的影响,绿洲平原蒸散量

增长速率加快,盐沼平原和山前戈壁砾质平原蒸散量16年间增长速率较慢。通过对不同地貌四季蒸散量的对比发现(图9),任一地貌类型对应蒸散量随季节的变化与研究区16年间四季蒸散量的空间变化趋势(图5)一致,即除盐湖区外,其余三个地貌类型蒸散量均呈夏季>秋季>春季>冬季的变化规律。

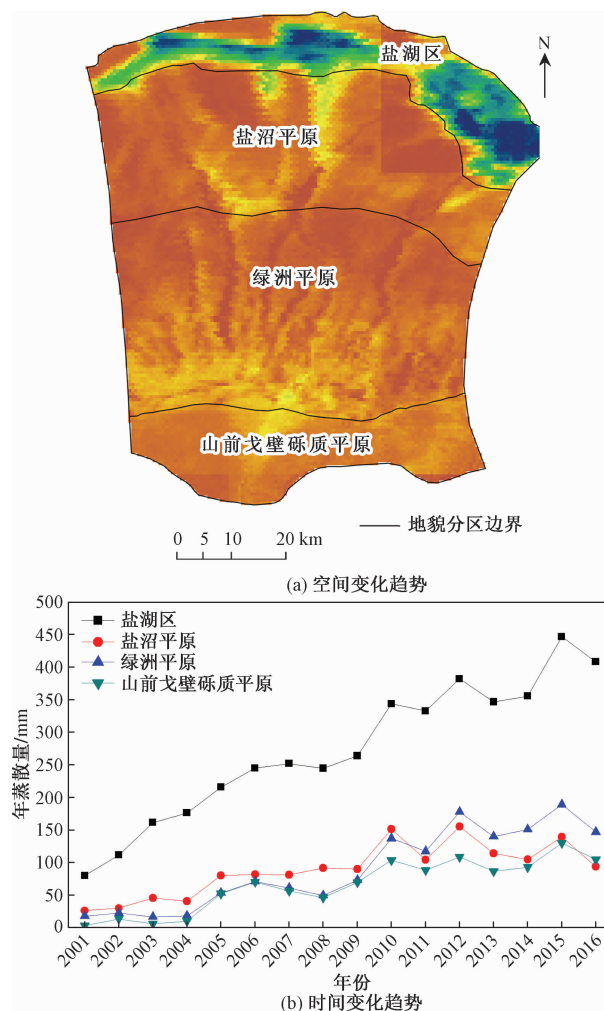


图8 不同地貌单元对应蒸散量变化趋势

Fig. 8 Variation trend of evapotranspiration of different geomorphic units

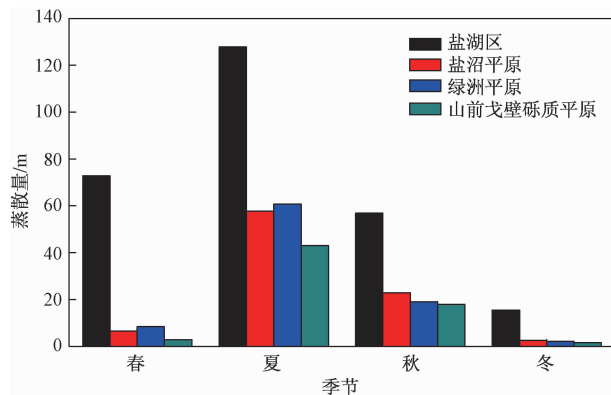


图9 不同地貌单元对应蒸散量四季变化趋势
Fig. 9 Variation trend of evapotranspiration of different geomorphic units in four seasons

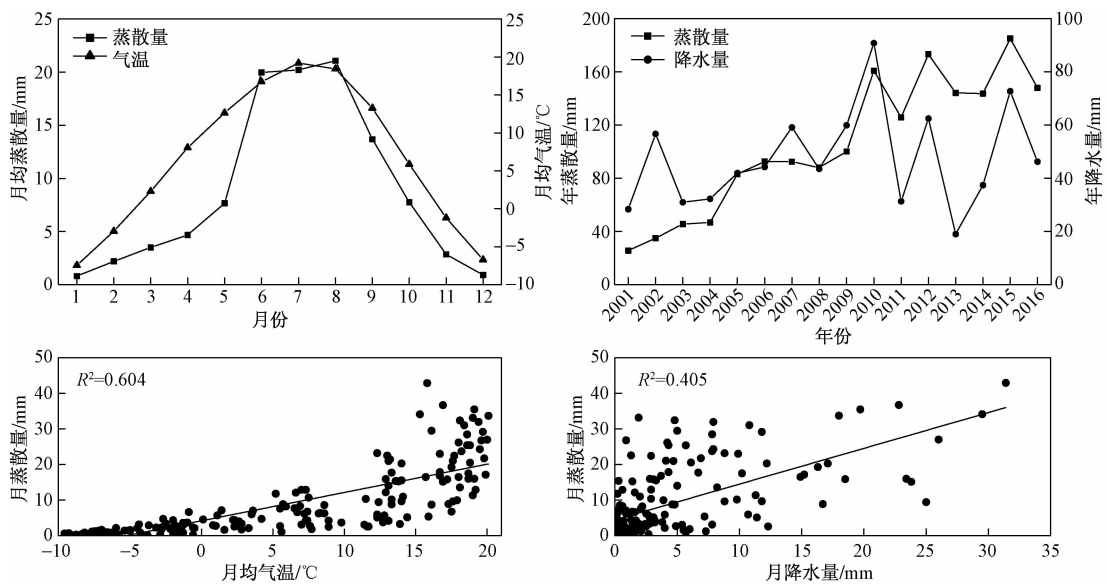


图10 气象因素对蒸散影响分析图

Fig. 10 Effect of meteorological factors on evapotranspiration

4.2 植被指数

植被蒸腾也是区域主要蒸发途径之一,研究区内植被主要发育带分布于绿洲平原中南部格尔木市东西两侧,因此植被对研究区蒸散量的影响主要表现在绿洲平原区。近年来,随着农田面积的不断扩大,绿洲平原区的蒸散量也在不断增大。为分析植被对研究区蒸发的影响,本文将连续序列的植被指数 MODIS NDVI 数据与计算得出的蒸散量进行相关性分析(图 11),结果表明:两者相关性较好,确定系数为 0.612,呈正相关。

为进一步研究植被对研究区蒸散量的影响,本文利用图 1 中 AB 剖面同时提取 2016 年 7 月 NDVI 及蒸散量空间分布图中对应点的 NDVI 及蒸散量值,通过

4 蒸散量影响因素分析

4.1 气象因素

本文利用研究区内格尔木气象站 2001—2016 年每月的气象数据与对应月的蒸散量进行相关性分析(图 10)。结果表明:研究区蒸散量与气温相关性较好,确定系数达 0.604。气温对研究区内盐湖区的影响较大。蒸散量与降水量相关性一般,确定系数为 0.405。通过气温、降水与蒸散量的年内与年际变化趋势对比分析可以看出,蒸散量总体与气温、降水量变化趋势一致,呈正相关关系,即蒸散量随气温和降水量的增大而升高。

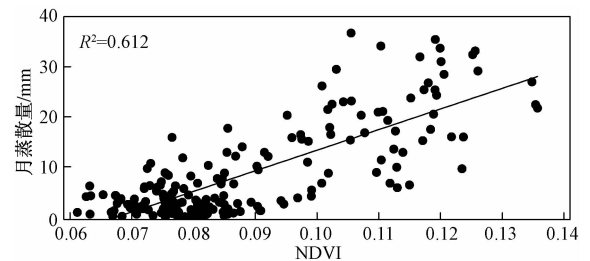


图11 植被指数与蒸散量相关性分析图

Fig. 11 Correlation analysis diagram of NDVI and evapotranspiration

滑动平均法,对比分析不同地貌蒸散量与 NDVI 值的变化特征(图 12)。结果表明:研究区由北向南 AB 剖面的不同地貌下,蒸散量和 NDVI 值总体变化趋势具

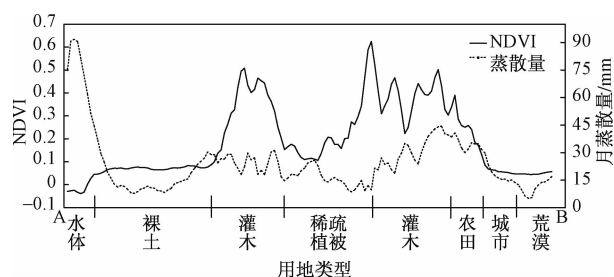


图12 不同地貌蒸散量与NDVI变化对照图

Fig. 12 Comparison of variation of evapotranspiration and NDVI in different physiognomies

有较好的一致性。除水体月蒸散量较高,最高可达90 mm外,NDVI值较低的裸土地区和荒漠地区蒸散量值也相对较低,在0~15 mm之间;NDVI值位于0.3~0.7的灌木地区,蒸散量也相应增大,波动于15~45 mm间;NDVI值位于0.2~0.4的农田地区,蒸散量值波动于20~40 mm间。因此,蒸散量与NDVI呈正相关,蒸散量值随NDVI的增大而增大。

5 结论

(1)研究区蒸散量2001—2016年总体呈增长趋势。盐湖区蒸散量最大,蒸散量可达780 mm;盐沼平原和绿洲平原其次,山前戈壁砾质平原蒸散量最小,蒸散量约70 mm。

(2)研究区内盐沼平原及山前戈壁砾质平原大部分地区蒸散量变化在16年间呈稳定不变状态,盐湖区和绿洲平原呈显著增长趋势。

(3)研究区16年间不同地貌蒸散量夏季增减幅度均远大于其他三季,冬季变化幅度最小。

(4)研究区蒸散量随气温及降水的增大而增大。植被对蒸散量的影响主要表现在绿洲平原,蒸散量与植被指数呈较好的正相关。

参考文献:

- [1] ROSENBERG N J, BLAD B L, VERMA S B. Microclimate: the biological environment [J]. The Quarterly Review of Biology, 1984.
- [2] 王宇航,王文科,段磊,等格尔木河流域山前冲洪积扇地下水动态研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 133-136. [WANG Y H, WANG W K, DUAN L, et al. Study on dynamic of groundwater in alluvial-pluvial fan zone in front of mountain of Golmud River basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 133-136. (in Chinese)]
- [3] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [C]// Proceedings of the Royal Society of London: A series, 1948, 193: 120-145.
- [4] MONTEITH J L. Evaporation and the environment [J]. Symposium of the Society of Exploratory Biology, 1965, 19(2): 205-234.
- [5] OHMURA A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations [J]. Journal of Applied Meteorology, 1982, 21: 595-598.
- [6] BOWEN L S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface [J]. Physical Review, 1926, 27(6): 779-787.
- [7] MASSMAN W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104(3): 185-198.
- [8] 宋璐璐,尹云鹤,吴绍洪. 蒸散发测定方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1186-1195. [SONG L L, YIN Y H, WU S H. Advancements of the metrics of evapotranspiration [J]. Progress in Geography, 2012, 31(9): 1186-1195. (in Chinese)]
- [9] 罗银飞. 青海省格尔木河流域山前平原区地下水系统及地下水资源评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [LUO Y F. Groundwater system and groundwater resources assessment in the valley piedmont plain of Golmud river basin, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese)]
- [10] 李健,王辉,黄勇,等. 柴达木盆地格尔木河流域生态需水量初步估算探讨[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 71-75. [LI J, WANG H, HUANG Y, et al. Preliminary estimation on ecological consumption of water of Golmud River in Qaidam Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(1): 71-75. (in Chinese)]
- [11] SU Z. Remote sensing of land use and vegetation for mesoscale hydrological studies [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 213-233.
- [12] SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 1999, 20(6): 85-89.
- [13] TIMMERMANS J, SU Z, VAN DER TOL C, et al. Quantifying the uncertainty in estimates of surface-atmosphere fluxes through joint evaluation of the SEBS and SCOPE models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(4): 1561-1573.

- [14] NURIA Pardo, M LUISA SÁNCHEZ, JORIS TIMMERMANS, *et al.* SEBS validation in a Spanish rotating crop [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014;132 – 142.
- [15] 金晓媚, 万力, 梁继运. 水均衡法验证蒸散量计算的可靠性——以张掖盆地为例[J]. *现代地质*, 2008,22(2):299 – 303. [JIN X M, WAN L, LIANG J Y. Accuracy verification of evapotranspiration result using hydrological budget method-A case study of the Zhangye Basin[J]. *Geoscience*, 2008, 22(2):299 – 303. (in Chinese)]
- [16] 温媛媛, 郭青霞, 王炎强. 基于 SEBS 模型的岔口小流域蒸散量特征及影响因子研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018,37(4):80 – 87. [WEN Y Y, GUO Q X, WANG Y Q. Evapotranspiration and the factors affecting it in Chakou Basin studied with the SEBS model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(4):80 – 87. (in Chinese)]
- [17] 薛阳, 金晓媚, 朱晓倩. 宁夏沿黄经济区蒸散量变化特征及水均衡方法验证[J]. *水文地质工程地质*, 2017,44(3):27 – 32. [XUE Y, JIN X M, ZHU X Q. Variation of evapotranspiration of Ningxia Yellow River economic zone and the validation using water budget method [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3):27 – 32. (in Chinese)]
- [18] 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. [WANG J M, YANG G F, ZHOU L T. Application of SEBS model to estimate evapotranspiration in Ling River Basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(2):95 – 99. (in Chinese)]
- [19] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于 Sen + Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J]. *计算机工程与应用*, 2013,49(5):13 – 17. [WANG D L, LIU W P, HUANG X Y. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen + Mann-Kendall method[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(5):13 – 17. (in Chinese)]
- [20] 贾铎, 牟守国, 赵华. 基于 SSA-Mann Kendall 的草原露天矿区 NDVI 时间序列分析[J]. *地球信息科学学报*, 2016,18(8):1110 – 1122. [JIA D, MU S G, ZHAO H. Analysis of NDVI time series in grassland open-cast coal mines based on SSA-Mann Kendall [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(8):1110-1122. (in Chinese)]
- [21] GOKMEN M, VEKERDY Z, VERHOEF W, *et al.* Satellite-based analysis of recent trends in the ecohydrology of a semi-arid region[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013,17(10):3779 – 3794.
- [22] 杨笑天. 基于 SEBS 模型的格尔木河流域地表蒸散量遥感反演及其时空格局分析[D]. 西安:长安大学, 2017. [YANG X T. Evapotranspiration estimating using remote sensing and spatial-temporal distribution of evapotranspiration in Golmud river basin based on SEBS model [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)]
- [23] 张泽鹏, 朱玉晨, 郝奇琛, 等. 呼和浩特盆地地下水流系统变异机制及其资源效应[J]. *水文地质工程地质*, 2017,44(2):63 – 68. [ZHANG Z P, ZHU Y C, HAO Q C, *et al.* A study on variation mechanism of groundwater flow system in the Hohhot basin and its resources effect analysis [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2):63 – 68. (in Chinese)]
- [24] 李天生, 夏军, 匡洋, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在汉江流域中上游地区的适用性研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017,15(6):1 – 10. [LI T S, XIA J, KUANG Y, *et al.* The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the middle and upper reaches of Hanjiang River Basin [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6):1 – 10. (in Chinese)]

编辑:张若琳