基于 SEBAL 模型的农牧交错区蒸散演变及生态需水规律

马龙龙[1,2]，杜灵通[1,2]，宫 菲[1,2]，丹 杨[1,2]，王 乐[1,2]，郑琪琪[1,2,3]，孟 晨[1,2]

（1. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地，宁夏 银川 750021；
2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室，宁夏 银川 750021；3. 宁夏大学 农学院，宁夏 银川 750021）

摘 要：[目的] 对典型农牧交错区的蒸散格局、演变特征及其生态系统需水规律进行研究，为区域生态治理和水资源管理提供科学依据。[方法] 以宁夏回族自治区盐池县为例，选择 2000—2017 年的 4 期 Landsat 遥感数据和气象资料等辅助数据，利用 SEBAL 模型反演该县不同时期秋季初的日蒸散，结合同期土地利用类型数据进行分析研究。[结果] ①秋季初的日蒸散量由 2000 年的 0.89 mm/d 增加到了 2017 年的 1.71 mm/d，增幅为 92.1%，增强趋势显著。②日蒸散具有较强的空间异质性，总体呈南高北低的格局，尤以东南部的黄土丘陵区蒸散最高；近 17 a 蒸散的年增幅也表现出南高北低的特征，但不同时段的年增幅空间格局存在较大差异。③不同地类的蒸散存在差异，耕地、林地和草地的平均蒸散量分别为 1.42，1.33，1.27 mm/d，但蒸散量年增幅最大的是草地。④近 17 a 盐池县生态需水总量和各地类的生态需水量都在增加，各地类生态需水量由高到低依次是草地、耕地和林地，但单位生态需水量最高的是耕地，最小的是草地；近 17 a 耕地和林地的生态需水量占总生态需水量的比例在下降，而草地生态需水量的比例则呈上升趋势。[结论] 在盐池县大力实行生态治理工程的背景下，区域蒸散显著增强，植被生态系统的需水量明显增加，不同地类的蒸散和需水结构也发生变化。

关键词：蒸散；SEBAL 模型；生态系统需水；农牧交错区；盐池县

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)04-0177-07 **中图分类号**：TP79

文献参数：马龙龙，杜灵通，宫菲，等. 基于 SEBAL 模型的农牧交错区蒸散演变及生态需水规律[J]. 水土保持通报，2019，39(4)：177-183. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.028；Ma Longlong，Du Lingtong，Gong Fei，et al. Evapotranspiration evolution and ecological water requirement law in agro-pastoral ecotone based on SEBAL model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(4)：177-183.

Evapotranspiration Evolution and Ecological Water Requirement Law in Agro-pastoral Ecotone Based on SEBAL Model

Ma Longlong[1,2], Du Lingtong[1,2], Gong Fei[1,2], DAN Yang[1,2], Wang Le[1,2], Zheng Qiqi[1,2,3], Meng Chen[1,2]

(1. *Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 2. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 3. *School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] The evapotranspiration pattern, evolvement characteristics and water demand laws of ecosystem in typical agro-pastoral areas were studied to provide scientific basis for regional ecological management and water resources management. [Methods] Yanchi County of Ningxia Hui Autonomous Region was taken as an example, four-phase of Landsat remote sensing data and meteorological data from 2000 to 2017 were selected, and the daily evapotranspiration in different periods of the county was retrieved by using the SEBAL model, and the land use type data was analyzed and studied in the same period.

收稿日期：2019-02-27 **修回日期**：2019-03-26

资助项目：国家自然科学基金项目“荒漠草原多时空尺度蒸散演变特征及驱动机制研究：以宁夏盐池县为例”(41661003)；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(XAB2017AW01)；宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXYLXK2017B06)

第一作者：马龙龙(1997—)，男(汉族)，甘肃省天水市人，硕士研究生，研究方向为生态系统水循环。E-mail：1084073717@qq.com。

通讯作者：杜灵通(1980—)，男(汉族)，宁夏回族自治区同心县，博士，副研究员，主要从事生态遥感及碳水循环模拟研究。E-mail：dult80@qq.com。

[Results] ① The daily evapotranspiration at the beginning of the fall increased from 0.89 mm/d in 2000 to 1.71 mm/d in 2017, with an increase of 92.1 %, designating that it had an increasing trend. ② There was a strong spatial heterogeneity in the daily evapotranspiration, and it was generally high in the south and low in the north, especially in the southeast loess hilly region, it was the highest. The annual growth rate of the past 17 years' evapotranspiration showed a characteristic of high in the south and low in the north, but there were large differences in the spatial pattern of annual increase in different periods. ③ There were differences in the evapotranspiration of different types of land. The average evapotranspirations of arable land, woodland and grassland were 1.42, 1.33, and 1.27 mm/d, respectively, but the largest annual increase in evapotranspiration was grassland. ④ The total amount of ecological water demand in Yanchi County and the amount of ecological water demand in various areas were increasing. The order of ecological water demand from high to low is grassland, arable land and woodland. However, the per unit ecological water requirement was the highest for arable land, and the smallest was of grassland. The shares of ecological water requirements of arable land and forest land in the total ecological water needs in the past 17 years was declining, while the proportion of grassland ecological water needs was on the rise. [Conclusion] Under the background of the intensive ecological management project in Yanchi County, the regional evapotranspiration increased significantly, the water demand of vegetation ecosystem increased obviously, and the evapotranspiration and water demand structure of different areas also changed.

Keywords: evapotranspiration; SEBAL model; water consumption of ecosystem; farming-pastoral ecotone; Yanchi County

蒸散(evapotranspiration, ET)是植被及地面向大气输送的水汽总通量,包括植物叶片的蒸腾以及来自土壤、水体和植物表面的蒸发,涉及植物生理学过程和空气动力学过程[1],它决定着土壤—植被—大气系统中的水分和热量传输,是土壤—植被—大气系统(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)水文—生态过程耦合的纽带[2-3],在水圈、大气圈、生物圈的水分循环和能量平衡过程中有着关键作用[4]。全球陆地每年有 59%的降水通过蒸散返回大气圈,而在干旱区甚至高达 90%的有效降水消耗于蒸散过程[5];由于气候变化而引起全球水循环的变化已影响到地表蒸散过程,进而影响干旱、半干旱地区的生态系统的稳定性。传统的蒸散研究方法是基于"点"尺度测量或计算,对于几何结构和物理性质非均匀的陆面,在空间尺度扩展时会引起较大的误差[6-7]。遥感技术提供了从"面"尺度研究蒸散的途径,通过卫星遥感影像和少量地面观测数据就能反演区域蒸散,可准确有效地反映出蒸散的时空连续性和动态性[7-8],已成为区域乃至全球尺度蒸散估算的有力工具[9]。近年来学界提出了许多遥感反演蒸散的模型算法,其中地表能量平衡算法(surface energy balance algorithm for land, SEBAL)是一种典型的基于能量平衡方程的蒸散模型,要求输入的观测数据较少,反演精度较高,在区域水资源管理、流域水量平衡等研究中得到广泛应用[10]。

宁夏回族自治区盐池县处于半干旱的农牧过渡带,受气候波动和人类活动影响,盐池县的荒漠草原在 20 世纪 70—80 年代严重退化,之后当地政府开始实施防沙治沙、退耕还林还草等生态治理工程,导致植被类型和土地利用格局发生了深刻变化,这也影响到了盐池县的生态系统蒸散格局和需水规律。目前有关盐池县农牧交错带蒸散的研究主要集中在植物蒸腾速率[11]、潜在蒸散估算[12-14]等方面,生态需水量的估算也仅依靠植被需水系数调整潜在蒸散量来实现[12],无法准确获取生态系统实际蒸散的空间格局及其随时间演变的规律,对区域生态系统水分消耗量估算不准确。为此,本文采用 Landsat 遥感数据和 SEBAL 模型反演盐池县实际蒸散,研究区域环境在生态治理的影响下蒸散的演变规律,估算生态系统需水量,以期为区域生态治理和水资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,37°04′—38°10′N和 106°30′—107°47′E,海拔 1 295～1 951 m。盐池县属典型中温带大陆性季风气候,1958—2017 年的年平均气温为 8.34 ℃,年均降水为 296.99 mm,年均蒸发量高达 2 403.70 mm[15],年均风速2.59 m/s。盐池县北接毛乌素沙地,南达黄土高原,地形自东南向北从黄土高原向鄂尔多斯台地过渡,中北部为广阔的缓坡丘陵风成地貌。土壤以灰钙土为主,黑垆土、风沙土、黄土、盐土和白浆土少量分布,土壤风化严

重,有机质较少,导致植被体系发育较差,全县自东南向西北由干草原向荒漠草原过渡,以灌丛草原、沙生植被和荒漠植被为主。土地利用类型主要以草地、耕地、林地为主,水域面积较少。

1.2　数据资料

采用 2000 年 8 月 22 日、2006 年 9 月 8 日、2015 年 9 月 1 日和 2017 年 9 月 6 日共 4 景 Landsat 5TM 和 Landsat 8OLI/TIR 遥感数据反演日蒸散;高程数据为 90 m 空间分辨率的 SRTM DEM;气象数据来自中国气象数据共享网,为卫星过境当日盐池县气象站的风速、气温等气象要素数据;土地利用类型由 2010 年的遥感影像解译获得。

1.3　研究方法

1.3.1　SEBAL 模型原理及参数计算　SEBAL 模型是基于地表能量平衡方程,利用晴朗天气下的遥感数据反演地表反照率、植被指数、地表反射率、地表温度等参数,结合气温、风速等地面气象观测资料,计算区域净辐射通量和土壤热通量,通过选取遥感影像中的冷热像元点,确定地表温度和温度梯度差的线性关系,通过 Monin-Obukhov 相似理论迭代计算显热通量,从而求得潜热通量(瞬时蒸散),再进行时间尺度扩展,求区域日蒸散量[16]:

$$\lambda_{ET}=R_n-G-H \tag{1}$$

式中:λ_{ET}——潜热通量,λ 为潜热蒸发系数,通常取 2.49×10^6〔W/(m² · mm)〕;R_n——辐射通量(W/m²);G——土壤热通量(W/m²);H——感热通量(W/m²)。

地表净辐射量 R_n 反映了地表短波辐射和长波辐射的净收支,其计算公式为[16-17]:

$$R_n=(1-\alpha)R_{S\downarrow}+R_{L\downarrow}-R_{L\uparrow}-(1-\varepsilon)R_{L\downarrow} \tag{2}$$

式中:α——地表反照率;$R_{S\downarrow}$——下行的太阳短波辐射;$R_{L\downarrow}$——下行的长波辐射;$R_{L\uparrow}$——上行的太阳辐射;ε——地表比辐射率。

土壤热通量 G 指进入土壤和植被内部的热交换能量,计算公式为[17]:

$$G=\frac{T_S-273.16}{\alpha}\times\left[0.003\,2\times\frac{\alpha}{C_{11}}+0.006\,2\times\left(\frac{\alpha}{C_{11}}\right)^2\right]\times(1-0.097\,8\mathrm{NDVI}^4)\times R_n \tag{3}$$

式中:T_S——地表温度;C_{11}——常数,卫星过境时间在地方时 12:00 以前,$C_{11}=0.9$;在 12:00—14:00,$=1.0$;在 14:00—16:00,$C_{11}=1.1$。

感热通量 H 是指以对流和传导形式进入空气的那部分热能量,感热通量是由于温度的梯度差异作用而造成的,计算公式为[16-17]:

$$H=\frac{\rho_{air}C_p d_T}{r_{ah}} \tag{4}$$

式中:ρ_{air}——空间密度(kg/m³);C_p——空气热通量常数,$C_p=1004$〔J/(kg · K)〕;d_T——高度在 Z_1 和 Z_2 处的温度之差;r_{ah}——空气动力学阻力(S/m),r_{ah},d_T——未知量,它们与不同梯度的温度、地表粗燥度和风速有关[16]。

因为卫星过境时所观测的是地面瞬时数据,我们只求得的是 Λ_{ET},因此把瞬时蒸散量扩展到日蒸散量,蒸散比 Λ 计算公式为[16-17]:

$$\Lambda_{inst}=\frac{\lambda_{ET}}{R_n-G}=\Lambda_{24} \tag{5}$$

式中:Λ_{24}——一天 24 h 内的蒸散发比。

日蒸散量 ET_{24} 的计算公式为[17]:

$$\lambda_{ET24}=\Lambda_{inst}(R_{n24}-G_{24}) \tag{6}$$

式中:R_{n24}——一天内的净辐射量;G_{24}——一天内的土壤热通量。

1.3.2　生态需水量计算　生态需水量指维持某一环境功能或环境目标所需的水资源量[18],在水资源匮乏的西北内陆地区,生态需水量是脆弱生态区恢复与重建中必须考虑的一个关键问题[19]。蒸散作为植被水分最重要的输出项,可用某一植被类型的蒸散量表达维持该植被正常生长所必须的水分量,各植被类型生态需水量之和即构成区域植被生态需水总量,计算公式为:

$$W=\sum_{i=1}^{n}A_iE_i \tag{7}$$

式中:A_i——第 i 种植被类型的面积;E_i——第 i 种植被类型的蒸散量;W——总生态需水量[18]。

2　结果与分析

2.1　蒸散的年际变化

由图 1 可知,2000—2017 年盐池县秋季初(8 月 22 日至 9 月 8 日间)的单日蒸散在 0.89～1.71 mm/d,近 17 a 来单日蒸散增长了 0.82 mm,增长幅度达到了 92.1%,平均每年增幅为 0.05 mm,线性增长趋势明显($R^2=0.987\,5$)。其中 2000—2006 年的蒸散增长了 0.25 mm,年均增幅为 0.041 7 mm;2006—2015 年的蒸散增长了 0.38 mm,年均增幅为 0.042 2 mm;而 2015—2017 年的蒸散增长了 0.19 mm,年均增幅为 0.095 0 mm。由此可知,近几年盐池县蒸散的增幅在逐渐升高,其生态系统的耗水量也越来越多。盐池县生态系统蒸散呈整体上升趋势,与 20 世纪末开始实施的大批生态治理工程密切相关,2001 年盐池县试点退耕还林还草,2002 年全县实施封育禁牧[20],

加之持续的“三北”防护林建设和防沙治沙措施，近十几年来全面改变了盐池县的植被格局[21]，地表植被覆盖度增加，生态系统蒸散增强，生态耗水量也增多。

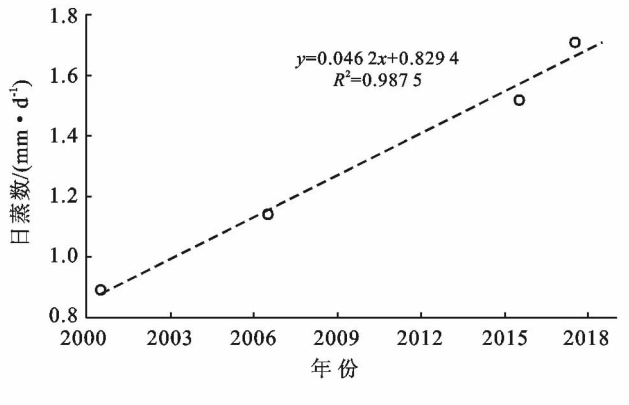


图 1 盐池县 2000－2017 年日蒸散量变化

2.2 蒸散的空间变化

盐池县日蒸散量具有较强的空间异质性，总体呈现南高北低的分布特征，尤以东南部的麻黄山黄土丘陵地区日蒸散最高（图 2），这一区域降水量相对高，气候较为湿润，植被以典型草原植被和人工种植柠条灌木丛为主，植被覆盖度高，蒸腾量大，故整体蒸散为全县最高。此外，盐池县中部有一条由南到北的缓坡丘陵地貌，这一区域的蒸散也略高于平原沙地。蒸散偏低的区域主要集中在西部和西南的冯记沟和惠安堡 2 个乡镇。盐池县蒸散的空间分布特征与全县自东南向西北由典型草原向荒漠草原过渡的植被类型变化具有一定的相似性，同时也受局地人为农林活动的影响，如近些年盐池县周边发展起来的部分灌溉农田和人工林地较大的拉高了其蒸散量。

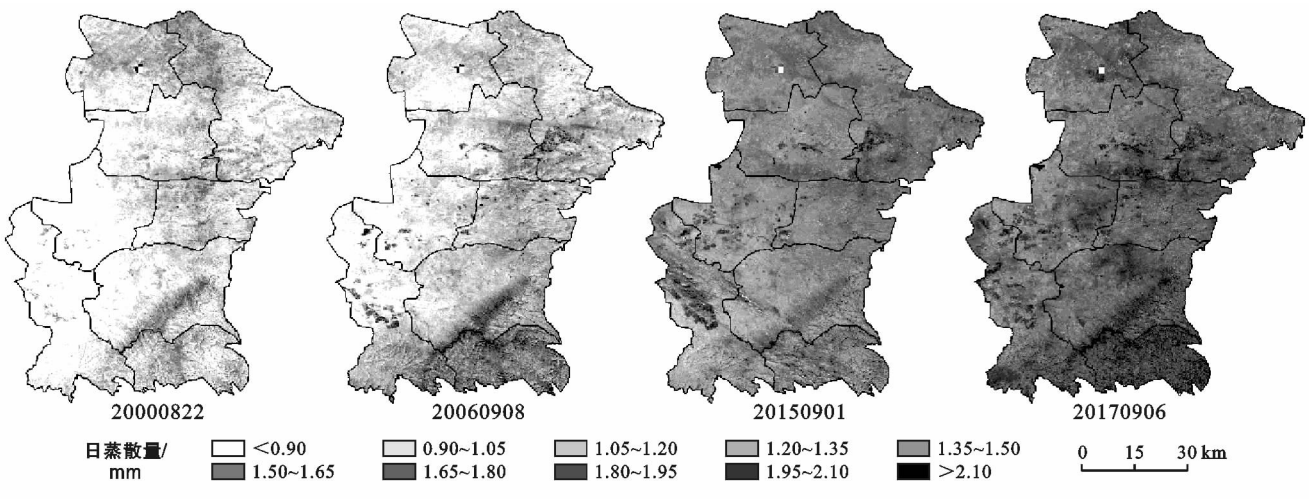


图 2 盐池县不同时间的日蒸散空间分布

此外，从不同时期的蒸散空间分布图对比来看，近 17 a 来盐池县的蒸散在逐渐增强（图 2），但不同区域间的蒸散增强幅度存在较大差异（图 3）。2000—2017 年盐池县蒸散年均增幅主要集中在 0.00～0.12 mm，其中西南部的惠安堡镇和冯记沟乡的蒸散年均增幅高于其它地区，平均在 0.04～0.12 mm，而其它乡镇的蒸散年平均增幅则主要在 0.00～0.08 mm，尤以盐池县西北部的高沙窝镇和花马池镇北部最低。同时，不同时间段的蒸散增强幅度也存在较大差异（图 3）。

2000—2006 年盐池县蒸散年均增幅表现出明显的南高北低特征，其中惠安堡镇、麻黄山乡和冯记沟乡南部的蒸散年均增幅在 0.08 mm 以上，但西北部的高沙窝镇和花马池镇北部不增反降，年均增幅在－0.01～0.00 mm；2006—2015 年盐池县蒸散年均增幅则与之前的变化基本相反；而最近的 2015—2017 年，盐池县蒸散年均增幅则出现非常大的波动，即南部增幅量非常大，出现高于 0.16 mm 的增幅（图 3）。近 17 a 的平均增幅基本上体现了区域实施封育禁牧政策、退耕还林还草等一系列生态治理工程所产生的生态水文效应，植被盖度的增加和气象活动的增强导致蒸散增加。

而短期几年的蒸散变化则与降水、气温等气象条件的短期波动有关，如 2014—2017 年盐池县的年平均降水量在 347.10～393.30 mm，比近 50 a 的平均值高出 50 mm 多，气温也较近 50 a 平均值高出 1 ℃以上，较高的气温和降水量导致这几年蒸散增幅很大。

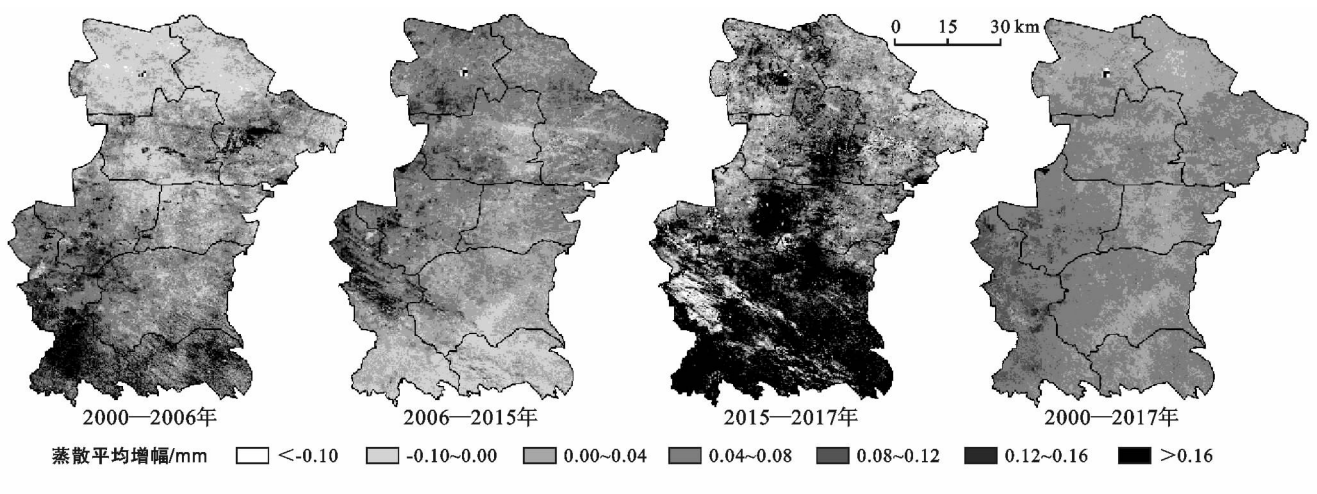


图 3　不同时间段盐池县日蒸散量的年均增幅

2.3　不同地类的蒸散特征

土壤含水量的空间差异性和不同地物的耗水特性会导致不同地类的蒸散具有一定的差异性,本研究利用土地利用数据对盐池县 4 期蒸散数据进行掩膜,获得耕地、林地和草地 3 种主要地类的蒸散值。2000—2017 年各地类蒸散由高到低依次是耕地、林地和草地(图 4),且各地类的蒸散增幅明显,蒸散年增幅最大的地类是草地,其次为林地和耕地。近 17 a 耕地的日蒸散量为 1.01～1.76 mm/d,均值为 1.42 mm/d,日蒸散量最大,其蒸散年均增幅为 0.044 mm;林地的日蒸散量为 0.92～1.70 mm/d,均值为 1.33 mm/d,其蒸散年均增幅为 0.046 mm;草地的日蒸散量为 0.84～1.68 mm/d,均值为 1.27 mm/d;虽然草地的日蒸散量最小,但其蒸散年均增幅却最大,达到了 0.05 mm。

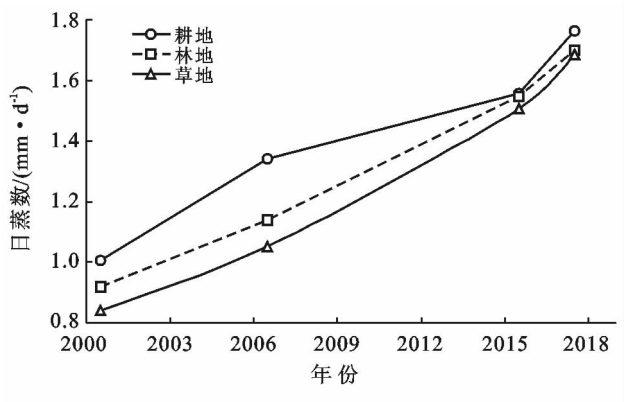


图 4　盐池县 2000－2017 年各地类蒸散变化特征

由以上结果可得,盐池县的耕地是最耗水的一个生态系统,耕地包括旱地和水浇地,其中水浇地受人为灌溉活动的影响,其土壤水分供应充足,农作物的种植密度较高,导致耕地的土壤蒸发和植被蒸腾都很强烈,总体蒸散最强。此外,现有研究表明,盐池县近些年水浇地面积增加明显,旱地面积持续减少[20],这将继续增加盐池县总的蒸散量。盐池县的林地由乔木林和灌木林混杂构成,其林地斑块碎杂,连片高密度的乔木林面积较少,其生态系统生物量不大,叶片蒸腾不高,整个系统水分消耗不强,故其蒸散弱于耕地。草地是盐池县面积最大的地类,但大多数为荒漠草原,部分典型草原的盖度和密度也不甚高,故该类生态系统的蒸散强度最弱。不管是哪一类地类,在近 17 a 间均表现出了蒸散增强的趋势,这与区域生态系统整体好转有关。

2.4　盐池县生态需水量

利用 SEBAL 模型反演的日蒸散数据,估算宁夏盐池县 2000—2017 年的生态需水量。结果看出,盐池县秋季初的平均生态需水量为 9.23×10^6 m^3,其中最低的 2000 年为 5.96×10^6 m^3,最高的 2017 年 1.15×10^7 m^3,年均增幅为 3.25×10^5 m^3,生态需水量在近 17 a 中表现出明显的增加趋势。从不同地类来看(图 5),生态需水量由高到低依次是草地、耕地和林地,因盐池县的草地面积占总县域面积的 60%,故草地生态需水量最高。从变化趋势来看,草地的生态需水量增加最多,近 17 a 增加了 3.37×10^6 m^3;其次是耕地,其生态需水量增加了 8.00×10^5 m^3;生态需水量增加最少的是林地,增加了 7.20×10^5 m^3。但从各地类的单位面积生态需水量来看,其由高到低依次是耕地、林地和草地,即单位面积的草地生态需水量是最低的地类,而单位面积的耕地生态需水量却最高,3 种地类中耕地生态耗水率最高,可见在盐池县这种水资源极度匮乏的地区,不易大面积发展高耗水的耕作农业,应保持适度面积的草原,以保持盐池县农牧交错区农牧复合系统的稳定性[22]。

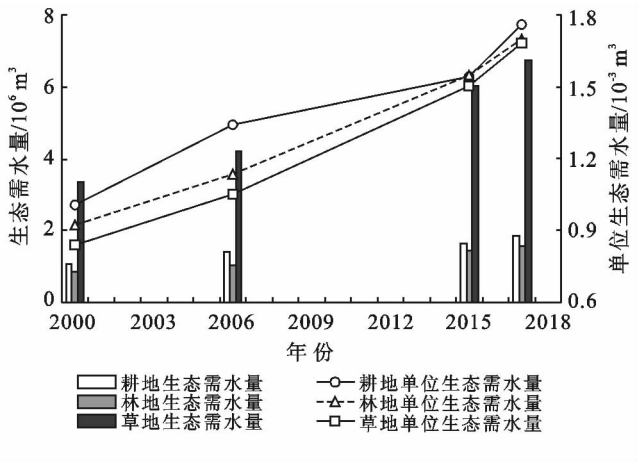


图 5 各土地利用类型的生态需水量

尽管盐池县生态需水总量和各地类的生态需水量近 17 a 中都在增加，但各地类的生态需水量组成格局却在发生变化。从各地类生态需水量占总生态需水量的百分比来看，耕地和林地生态需水量占总生态需水量的比例在下降，而草地生态需水量占总生态需水量的比例在上升(表 1)。盐池县实施的封育禁牧、退耕还林还草、防沙治沙土地荒漠化治理工程是引起这一变化的原因，这些生态治理工程改变了地表植被覆盖结构和植被盖度，生态系统的整体好转和植被盖度增加，整体增加了区域生态系统需水总量，而退耕还林还草工程使旱耕地面积大幅减少，草地与林地的面积增加，这种地表植被覆盖结构的变化引起了各地类的生态需水量占比发生变化。

表 1 盐池县各地类需水量占总生态需水量的比例 %

日期	耕地	林地	草地
20000822	17.86	14.36	56.53
20060908	18.60	13.85	55.21
20150901	16.00	14.08	58.96
20170906	16.24	13.72	58.67

3 讨论与结论

刘可等[23]研究得出，宁夏回族自治区中部和南部草地的蒸散以增强为主；张霞等[24]认为近 30 a 来全球干旱半干旱区年蒸散量的变化明显，中国北部呈增加趋势；全球气候的变暖使大气中水汽含量变低、地表蒸散量增大并加速全球水循环[25]；这些研究结论与本文的结果一致。范亚云等[18]在艾比湖流域的研究结果显示，不同地类日蒸散量由高到低依次为乔木林地、耕地、牧草地和灌木林地，而本研究得到盐池县日蒸散量由高到低依次为耕地、林地和草地。由于盐池县的林地既非单一的乔木林地，也非单一的灌木林地，本研究在地物类别划分时将乔木林地、灌木林地等斑块碎杂的林地斑块均划分为林地，从而造成本研究中林地蒸散介于乔木林地和灌木林地之间。本研究得出的地类间蒸散差异的结果和大小顺序，与张晓玉等[26]利用 SEBS 模型在干旱区反演的日蒸散量结果一致，也与代鹏超等[27]基于 SEBAL 模型在新疆精河流域研究的结果相同。范亚云等[18]在艾比湖流域的研究结果显示，生态需水量整体呈增加的趋势，与本文研究结果一致，而李金燕[12]研究得到盐池县草地的生态需水量远高于林地，主要是由于该研究分析的是 2014 年典型平水年份，而本文主要分析了近 17 a 的盐池县生态需水量的变化情况。近 17 a 盐池县蒸散的增强和生态需水量的增加，主要与其实施的一系列生态治理工程有关，封育禁牧、退耕还林还草、防沙治沙等生态工程改变了地表下垫面结构[21,23]，使得地表植被覆盖度增加，植被蒸腾增强。然而，地表蒸散变化还与区域气象条件等因素有关[23-24]，干旱半干旱区地表蒸散的主要水分供给来源是大气降水，降水直接影响地表土壤含水率大小，影响蒸散大小[28]。已有报道显示，盐池降水量近些年在波动增加[15]，气象资料统计显示，2000—2017 年的年平均降水量为 301.57 mm，除去 2000 年和 2005 年的大旱年份[23]，这一时期的平均降水量达到了 317.96 mm，高于近 1958—2017 年的平均值(296.99 mm)，降水增加在一定程度上促进了植被的蒸散，也保障了区域生态系统维持的水分供给。然而，由于本研究受遥感数据的限制，每年相同日期或相近日期可用的 Landsat 数据量较少，故近 17 a 间只优选出了 4 期数据用于反演蒸散。因遥感数据为单日瞬时观测结果，而蒸散受降水量、相对湿度、气温、太阳辐射、日照时数、风速等气象因素的影响明显[7,28-29]，所以用单日遥感数据反演的蒸散在表征生态系统整体蒸散强弱时也有一定的局限性，在今后的研究中应采用数据量丰富、时间连续性强的数据进行蒸散演变规律的研究。此外，本文主要侧重研究区蒸散时间演变规律和空间分布格局，因受限于数据资料局限，关于蒸散变化驱动力及其驱动机制等方面的研究不够深入，这也是未来需加强的方向。决定地表蒸散强弱的因素主要有地表入射能量、区域气象条件和下垫面条件[23-24]等，同时也受土地利用类型变化以及人类生产活动的共同影响[29]，而在综合考虑这些因子基础之上的蒸散反演模型，将会提高干旱半干旱区遥感蒸散反演的精度以及生态需水量估算的可靠性。综上研究表明，近 17 a 盐池县日蒸散量变化趋势明显，并具有较强的时空异质性。日蒸散量由 2000 年的 0.89 mm/d 增加到了 2017 年的

1.71 mm/d,增幅为 92.1%,增强趋势显著。在空间上,日蒸散呈南高北低的格局,尤以东南部的黄土丘陵区蒸散最高,但不同时间段、不同区域的蒸散增强幅度存在较大差异。不同地类的日蒸散量具有一定的差异性,蒸散年增幅最大的是草地。盐池县生态需水总量和各地类的生态需水量也都在增加,但各地类的生态需水结构却发生变化。

[参 考 文 献]

[1] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012,50(2):1-54.

[2] 吴炳方,熊隽,闫娜娜. ETWatch 的模型与方法[J]. 遥感学报,2011,15(2):224-239.

[3] Katul G G, Oren R, Manzoni S, et al. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system[J]. Review of geophysics, 2012,50(3):RG3002.

[4] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010,467(7318):951-954.

[5] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790):1068-1072.

[6] 任庆福,杨志勇,李传哲,等. 变化环境下作物蒸散研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(11):1227-1238.

[7] 张荣华,杜君平,孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述[J]. 地球科学进展,2012,27(12):1295-1307.

[8] 白娟,杨胜天,董国涛,等. 基于多源遥感数据的三江平原日蒸散量估算[J]. 水土保持研究,2013,20(3):190-195.

[9] 李放,沈彦俊. 地表遥感蒸散发模型研究进展[J]. 资源科学,2014,36(7):1478-1488.

[10] 周玲,张丽,许君一,等. 基于 SEBAL 模型的漓江流域蒸散量变化分析[J]. 水土保持研究,2015,22(4):332-337.

[11] 赵奎,丁国栋,吴斌,等. 宁夏盐池毛乌素沙地柠条锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J]. 干旱区研究,2009,26(3):390-395.

[12] 李金燕. 宁夏中部干旱带盐池县植被生态需水规律研究[J]. 干旱区地理,2018,41(5):1064-1072.

[13] 白一茹,王幼奇,王建宇. 宁夏荒漠草原区参考作物蒸散量估算方法比较[J]. 灌溉排水学报,2015,34(11):89-92.

[14] 李媛,谢应忠,王亚娟. 宁夏中部干旱带潜在蒸散量变化及影响因素[J]. 生态学报,2016,36(15):4680-4688.

[15] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等. 基于 Landsat 影像的宁夏盐池县植被景观格局变化特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(6):75-84.

[16] 李根. 基于 SEBAL 和 SEBS 模型的鹰潭小流域蒸散发估算研究[D]. 江苏 南京:南京信息工程大学,2014.

[17] 阿布都沙拉木·吐鲁甫,买买提·沙吾提,马春玥,等. 基于 SEBAL 模型的渭—库绿洲蒸散量特征及影响因子研究[J]. 地球信息科学学报,2018,20(9):1361-1372.

[18] 范亚云,郭玉川,卢刚,等. 艾比湖流域植被生态需水量[J]. 中国沙漠,2018,38(4):865-871.

[19] Chen Yaning, Li Baofu, Li Zhi, et al. Water resource formation and conversion and water security in arid region of Northwest China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(7):939-952.

[20] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等. 基于像元二分法的盐池县植被覆盖度与地质灾害点时空格局分析[J]. 国土资源遥感,2018,30(2):195-201.

[21] 王重玲,朱志玲,白琳波,等. 景观格局动态变化对生态服务价值的影响:以宁夏中部干旱带为例[J]. 干旱区研究,2015,32(2):329-335.

[22] 宋乃平,王兴,杨新国,等. 农牧交错带县域农牧系统对气候波动的响应机制[J]. 生态学报,2016,36(13):3969-3977.

[23] 刘可,杜灵通,候静,等. 2000—2014 年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律[J]. 草业学报,2018,27(3):1-12.

[24] 张霞,李明星,马柱国. 近 30 年全球干旱半干旱区的蒸散变化特征[J]. 大气科学,2018,42(2):251-267.

[25] Liu Binhui, Xu Ming, Henderson M. A spatial analysis of pan evaporation trends in China,1955—2000[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D15):D15102.

[26] 张晓玉,范亚云,热孜宛古丽·麦麦提依明,等. 基于 SEBS 模型的干旱区流域蒸散发估算探究[J]. 干旱区地理,2018,41(3):508-517.

[27] 代鹏超,牛苏娟,毋兆鹏,等. 新疆精河流域实际蒸散发时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报,2017,33(7):600-606.

[28] 杨秀芹,王国杰,潘欣,张余庆. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980—2011 年地表蒸散发时空变化[J]. 农业工程学报,2015,31(21):132-141.

[29] 田静,苏红波,陈少辉,等. 近 20 年来中国内陆地表蒸散的时空变化[J]. 资源科学,2012,34(7):1277-1286.