

黔中地区潜在蒸散发的时空变化及对 土地利用变化的响应

杨铭珂, 贺中华, 任荣仪, 张浪

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 土地利用变化对潜在蒸散发的影响是水文等相关领域研究的热点问题。基于黔中地区 1995–2015 年气象数据, 应用 Penman–Monteith 公式估算潜在蒸散发 (ET_0), 同时利用 1995–2015 年 5 期土地利用数据, 分析近 20 年该地区 ET_0 的时空变化特征以及不同土地利用类型对 ET_0 的影响。结果表明: 1995–2015 年黔中地区 ET_0 总体呈增大趋势, 空间分布规律较为明显, 即自东南向西北整体呈递减趋势; 黔中地区近 20 年土地利用结构变化明显, 林地及建设用地面积的变化趋势以增大为主, 草地及耕地则以减少趋势为主; 不同土地利用类型的 ET_0 不同, 以林地为最大, 其次为耕地、草地、水域以及建设用地, 未利用地为最小, 草地以及耕地向林地转移面积会使 ET_0 增大, 林地、草地以及耕地向建设用地、未利用地转移面积会使 ET_0 减小。这表明土地利用变化明显时, ET_0 也会随着产生较大的变化。蒸散发研究对反映区域水文过程以及科学管理水资源均十分重要。

关键词: 潜在蒸散发; 时空特征; 土地利用; Penman–Monteith 公式; 黔中地区

中图分类号: TV11; P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0106-12

Spatio-temporal variation of potential evapotranspiration and its response to land use change in central Guizhou

YANG Mingke, HE Zhonghua, REN Rongyi, ZHANG Lang

(School of Geographical and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The impact of land use change on potential evapotranspiration is a hot issue in hydrology and other related fields. Based on the meteorological data of central Guizhou Province from 1995 to 2015, we estimated the potential evapotranspiration (ET_0) using Penman–Monteith equation and analyzed the spatio-temporal characteristics of ET_0 in this region and the impact of different land use types on ET_0 using the land use data from 1995 to 2015. The results show that the ET_0 of central Guizhou from 1995 to 2015 showed an overall upward trend, with a significant spatial distribution pattern, it decreased from southeast to northwest. The land use structure in central Guizhou changed significantly over the period of 1995–2015, the woodland and construction land were mainly increasing, whereas the grassland and cultivated land are mainly decreasing. Different land use types had different ET_0 , with the ET_0 of woodland being the largest, followed by that of cultivated land, grassland, water area and construction land, and unused land had the smallest ET_0 . The ET_0 increased when parts of the grassland and cultivated land were transferred to woodland, but it decreased when parts of woodland, grassland and cultivated land were transferred to construction land and unused land. This indicates that ET_0 changes simultaneously with the change of land use. This study on evapotranspiration can shed some light on the understanding of regional hydrological process and water resources management.

Key words: potential evapotranspiration (ET_0); spatio-temporal characteristics; land use; Penman–Monteith equation; central Guizhou

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1612441)

作者简介: 杨铭珂 (1994-), 女, 贵州锦屏人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。

通讯作者: 贺中华 (1976-), 男, 贵州兴义人, 博士, 教授, 研究生导师, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。

1 研究背景

全球变暖对水循环系统造成的影响日益明显,水资源短缺,但洪涝和干旱等灾害事件频发,如何有效管理以及有效利用水资源成为重要的研究课题^[1]。地表蒸散发是陆面水分平衡和地表能量平衡的主要组成部分,它直接影响地表和大气间的水汽输送^[2],所以蒸散发研究对反映区域水文过程以及科学管理水资源都十分重要。水文过程较为复杂,地表蒸散发难以获取,通常利用潜在蒸散发去估算区域蒸散发量以用于水资源管理以及评估^[3]。土地利用模式的变化会使得区域水资源也随着发生变化^[4],影响一个地区的水平衡,即影响该地区潜在蒸散发以及水供应^[5]。韩静艳等^[6]认为区域蒸散发即潜在蒸散发的变化能够反映不同土地利用类型对一个地区的水文循环系统的潜在影响。不同土地利用类型的潜在蒸散发变化存在差异,Boisier等^[7]研究发现森林面积减少会使得夏季蒸散发减少。而Liu等^[8]发现农业用地的蒸散发高于城市用地。并且区域蒸散发在不同地区也会出现不同的变化。研究表明,农业活动会使得蒸散发增加,但在中国西北地区,依赖灌溉的农业地区的潜在蒸散发有所下降^[9]。因此根据不同地区研究不同土地利用类型对潜在蒸散发的影响是非常有必要的。

黔中水利枢纽是解决该地区工程性缺水的重要调水工程,由于地处岩溶发育区,黔中地区的水资源有效利用率较低^[10]。随着地区经济的迅速发展,使得土地利用开发强度增大,而区域内土地利用模式转变将会引起该区域潜在蒸散发变化,这对该区域水资源有效调配提出了挑战。黔中地区有关水环境研究主要集中在降水、径流等时间序列变化^[11]、河流化学特征^[12]以及土壤养分研究等^[13],而社会研究主要集中在水资源有效利用等经济方面。因此本文将结合潜在蒸散发和土地利用变化,对黔中地区不同土地利用类型的潜在蒸散发变化进行分析,讨论人类活动即土地利用模式的转变对潜在蒸散发的影响,以了解区域水资源行为和水资源管理。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况

黔中地区位于贵州省中部核心地带,地处北纬 $25^{\circ}23'30'' \sim 25^{\circ}05'10''$,东经 $104^{\circ}10'20'' \sim 107^{\circ}02'20''$,研究区的海拔在479~2885 m,地形西高东低,95%以上为山地和丘陵地貌,土地利用类型主要以林地、

耕地和草地为主;气候属于亚热带季风气候,多年平均降水量在1100~1400 mm之间,1月平均气温为 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$,7月平均气温一般为 $22 \sim 25^{\circ}\text{C}$,云量多,日照时数少,多年平均相对湿度为79.1%。因研究区地处两江分水岭河源地带,岩溶地貌发育强烈,山高谷深水源低,雨水多,但不易蓄水,山体坡度大土层薄,使得该地区水土流失严重^[14],生态环境较为脆弱,水资源开发利用难度大,且水资源时空分配不均,人均水资源量较少。黔中地区水利工程区及周边地区气象站分布见图1。



图1 黔中地区水利工程区及周边地区气象站分布图

2.2 数据来源

本文收集了研究区内及周边的13个气象站(图1)1995-2015年的气象数据,获取了各站点1995-2015年逐日的最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速以及日照时数。1995、2000、2005、2010、2015年共5期的土地利用数据由地理空间数据云提供的Landsat遥感影像经过ENVI监督分类处理而得。依据全国遥感监测土地利用分类体系,将土地利用类型分为6个一级地类,不同年份各土地利用类型面积如表1所示。

表1 黔中地区不同年份各土地利用类型面积 km^2

土地利用类型	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年
林地	6426.6	6085.5	6751.2	6858.0	6812.7
草地	4640.8	4053.6	4057.4	3952.4	3939.4
耕地	4878.2	5689.3	4799.6	4733.0	4521.7
建设用地	231.4	332.8	517.1	584.4	818.9
未利用地	45.9	69.5	97.3	95.2	97.2
水域	94.1	86.5	94.5	93.9	127.1

2.3 研究方法

2.3.1 Penman-Monteith公式 研究表明^[15]Penman-

Monteith(P-M)公式能够较好地考虑气象要素的综合反映,适用于西南地区潜在蒸散发的计算,而且计算结果较为准确。本文研究采用FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)推荐的P-M公式估算黔中地区的潜在蒸散发量(ET_0)^[16-17],计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为潜在蒸发量,mm/d; R_n 为净辐射,MJ/($m^2 \cdot d$); G 为土壤热通量,MJ/($m^2 \cdot d$); γ 为干湿常数,kPa/°C; Δ 为饱和水汽压曲线斜率,kPa/°C; U_2 为2m高处的风速,m/s; e_s 为平均饱和水汽压,kPa; e_a 为实际水汽压,kPa; T 为平均气温,°C。

公式(1)中 R_n 计算公式为:

$$R_n = (1 - a) \left(a_s - b_s \frac{n}{N} \right) R_a - Q \left(\frac{T_{\max, k}^4 - T_{\min, k}^4}{2} \right) \cdot (0.56 - 0.08 \sqrt{e_a}) \left(0.1 - 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s) \quad (3)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (4)$$

式中: R_a 为大气顶层的太阳辐射,MJ/($m^2 \cdot d$); N 为最大日照时数,h; n 为实际日照时数,h; Q 为波尔兹曼常数($Q = 4.903 \times 10^{-9}$ MJ/($K^4 \cdot m^2 \cdot d$)); $T_{\max, k}$ 、 $T_{\min, k}$ 分别为最高、最低绝对气温,K; a_s 为云全部遮盖下($n = 0$)大气外界辐射到达地面的分量; b_s 为晴天($n = N$)大气外界辐射到达地面的分量; a 为地表反射度^[18],取值0.23; a_s 、 b_s 分别取值为0.248、0.752^[19]; $G_{sc} = 0.0820$ MJ/($m^2 \cdot min$); d_r 为日地距离订正; ω_s 为日落时角(弧度); ϕ 为示纬度(弧度); δ 为太阳高度角(弧度)。

公式(1)中 Δ 计算公式为:

$$\Delta = \frac{4098 \times \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.5} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (5)$$

公式(1)中 γ 计算公式为:

$$\gamma = \frac{1.013 \times 10^{-3} p}{0.622 \lambda} \quad (6)$$

$$p = 101.0 \left(\frac{293 - 0.0065h}{293} \right)^{5.26} \quad (7)$$

式中: p 为大气压,kPa; $\lambda = 2.501 - 0.002361 T$; λ 为蒸发的潜热系数; h 为海拔高度,m。

公式(1)中 e_a 和 e_s 的计算公式为:

$$e_a = \frac{R_h \cdot e_s}{100} \quad (8)$$

$e_s =$

$$\frac{0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3} \right) + 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right)}{2} \quad (9)$$

式中: R_h 为相对湿度; T_{\max} 、 T_{\min} 分别为最高、最低绝对气温,°C。

2.3.2 Mann-Kendall(M-K)趋势检验与突变分析

Mann-Kendall(M-K)是一种非参数检验法,常用于水文长时间序列的检验与突变分析,该方法既能发现该序列的变化趋势,也能找到该序列发生突变的时间^[20]。M-K趋势检验法将某一序列设为 X ,其时间长度为 n ,检验其统计量 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

$$\text{sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & (X_j - X_i > 0) \\ 0 & (X_j - X_i = 0) \\ -1 & (X_j - X_i < 0) \end{cases} \quad (11)$$

趋势变化统计量 Z :

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ (S + 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & (S < 0) \end{cases} \quad (12)$$

给定一个置信水平($\alpha = 0.05$ 为显著水平, ± 1.96 ; $\alpha = 0.001$ 则为极显著水平, ± 2.58), Z 在置信水平(Z 的绝对值超过1.28、1.64、2.32即分别通过置信水平90%、95%以及99%)上表示该时间序列呈增大或者减小趋势,即 Z 为正时表示增大, Z 为负时表示减小。

突变分析统计量 UF 为标准正态分布,其计算公式为:

$$UF = \frac{(S_k - E[S_k])}{\sqrt{\text{Var}[S_k]}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

$$UB = -UF \quad (14)$$

式中: $E[S_k]$ 为 S_k 的均值; $\text{Var}[S_k]$ 为 S_k 的方差。 UB 为 UF 的反序列,将两者绘制曲线,若在置信水平 α 内相交,则相交点对应的时间为序列突变时间。同时若 $UF > 0$,则表示序列层上升趋势; $UF < 0$ 则表示其呈下降趋势;当它们超过显著性水平对应的临

界值时,表明上升或下降趋势显著^[21]。

2.3.3 潜在蒸散发估算值精度检验 为了保证气象站点实测数据的精度,根据气象站点的空间分布位置以及剔除缺失数据,从 1995 - 2015 年的 13 个站点中挑选了 4 个气象站点,将气象测量仪器蒸发皿测量的蒸发数据依据折算系数换算成陆面蒸散发量,与估算的潜在蒸散发量做假设检验以及精度检验。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸散发量的空间分布

研究区春季、夏季、秋季及冬季的 ET_0 分别占年总 ET_0 的 30%、35%、22% 及 10%。图 2 为 1995 - 2015 年黔中地区季均 ET_0 空间分布。由图 2 可看出,不同季节 ET_0 的空间变化趋势不一致。春季 ET_0 空间分布特征呈自西向东递减的变化趋势(图 2 (a)),其高 ET_0 值区主要出现在毕节西部以及安顺

南部,最大值为 302.2 mm;低值区主要分布于贵阳东部,最低值为 245.2 mm。夏季时黔中地区 ET_0 整体出现高值区(图 2(b)),安顺以东等地区 ET_0 均在 315.6 mm 以上,而毕节西部以及六盘水北部出现低值区, ET_0 均低于 300 mm。秋季 ET_0 的空间变化均呈现自东南向西北逐渐递减的趋势,秋季 ET_0 最小值为 178.4 mm,主要位于六盘水北部,最大值为 216.6 mm,主要位于贵阳南部、东南部以及安顺东南部,中部地区平均 ET_0 为 197.5 mm。冬季 ET_0 最大值出现在毕节西部(图 2(d)),为 155.14 mm,最小值则主要出现在毕节南部,为 108.2 mm。由图 2 可知,夏季至冬季黔中地区 ET_0 的低值区由毕节西部向毕节南部、六盘水东北部以及贵阳东部移动,而高值区由安顺东部至贵阳东南部逐渐向毕节西部移动;夏秋季 ET_0 的空间分布均呈现高海拔低 ET_0 、低海拔高 ET_0 的规律。

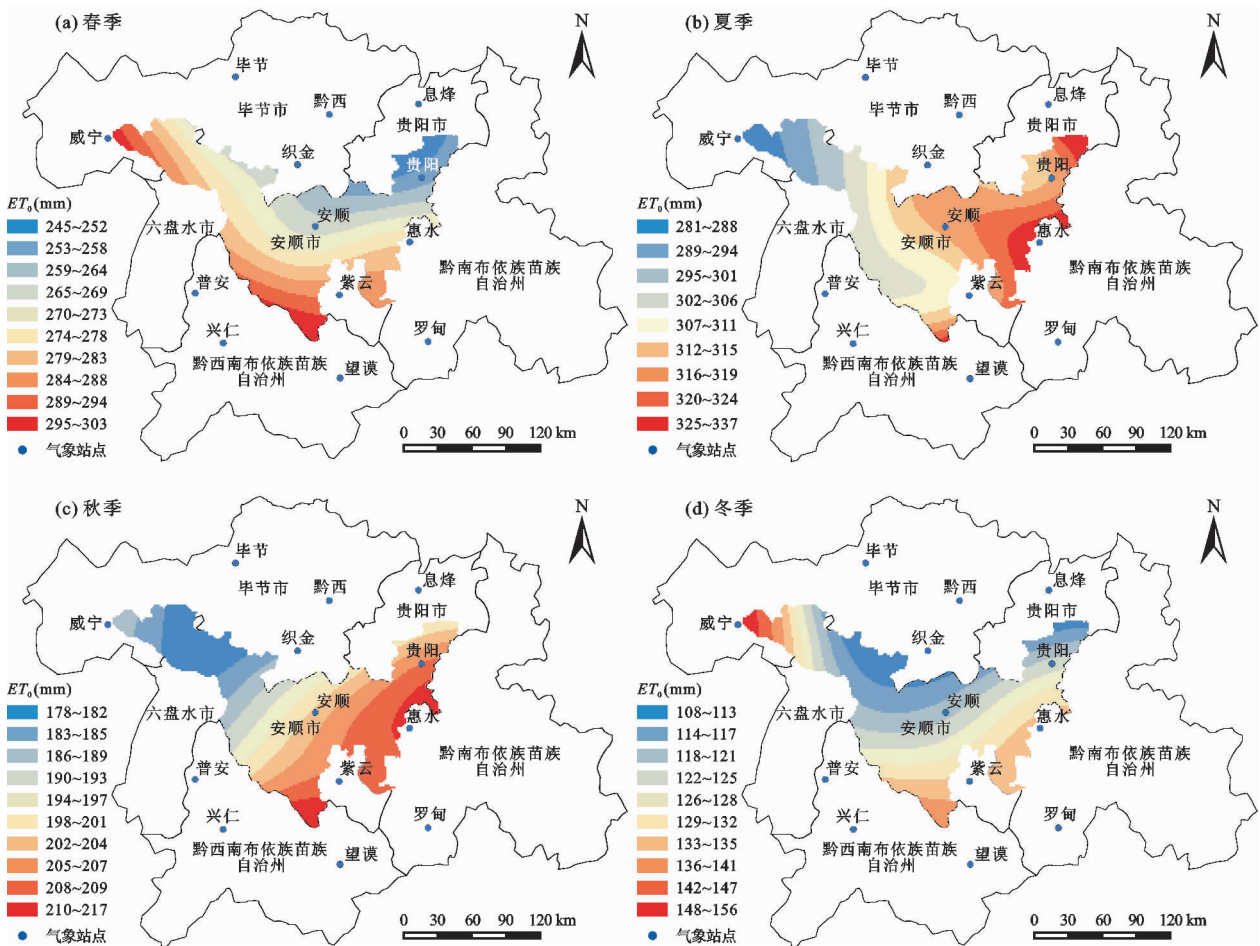


图 2 1995 - 2015 年黔中地区季均 ET_0 空间分布

图 3 为 1995 - 2015 年黔中地区年均 ET_0 空间分布。由图 3 可发现,黔中地区年均 ET_0 自东南向西北整体呈递减趋势,高值区主要位于贵阳市东南部,最

大 ET_0 值为 973.1 mm,低值区主要分布在六盘水北部,最小 ET_0 值为 854.4 mm。中部地区年均 ET_0 在 902.1 ~ 930.6 mm。黔中地区的地形呈西北高东南

低,由图3可以看出,区域高海拔地区 ET_0 低于低海拔地区,海拔在1700 mm以上地区的 ET_0 平均为882.5 mm,而海拔在1700 mm以下地区的 ET_0 平均为942.5 mm。地形通过影响降水、风速以及气温等气候因素从而影响了该地区 ET_0 的空间分布。

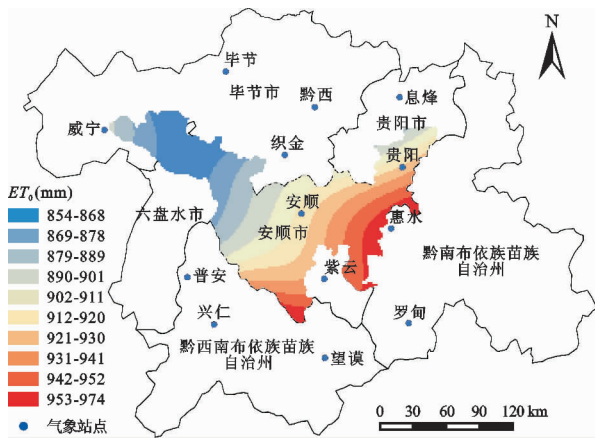


图3 1995-2015年黔中地区年均 ET_0 空间分布

3.2 潜在蒸散量的时间变化

图4为1995-2015年黔中地区月均 ET_0 值。

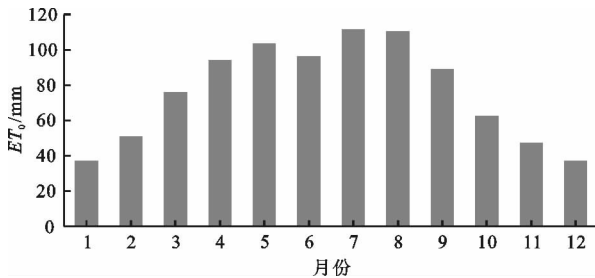


图4 1995-2015年黔中地区月均 ET_0 值

由图4可知,黔中地区月均 ET_0 年内呈双峰变化,月均 ET_0 最大值在7月,为111.5 mm,占全年 ET_0 的12%,最小均值在1月,为36.9 mm,占全年 ET_0 的4%,这与水热时间分布相似。但6月出现了明显的低峰,相关研究发现黔中地区6月降水最多,这表明当降水增多时,空气中的相对湿度会增大, ET_0 也会随之减少。1-3月, ET_0 增长速度要高于其他月份,4-7月, ET_0 增长速度变得平缓,在7月达到峰值,随后7-11月, ET_0 急速下降,12-1月 ET_0 变化平稳,在1月达到 ET_0 最低。结合黔中地区的气象条件来看,1-4月与10-12月的月均 ET_0 均低于100 mm,分别为61.0、48.9 mm,相比全年,这两个时段的平均气温较低、平均降水较少,使得植被生长速度缓慢,植物蒸腾作用下降,所以月均 ET_0 较低。5-8月为全年月均 ET_0 的高峰值区,这一时段,降水与气温逐渐增加并达到一年中最大值,日照

时数增加,相对湿度减少,这些因素综合作用使得这一时段的月均 ET_0 最大。8-10月的月均 ET_0 减少,这主要与降水减少、气温逐渐降低有关。由此可见,气温和降水的耦合作用也会引起月均 ET_0 变化。

图5为1995-2015年黔中地区多年月均 ET_0 的M-K变化趋势。由图5可知,1995-2015年黔中地区的月均 ET_0 整体呈增大趋势。月均 ET_0 增加趋势以7月为最大,Z值为1.72,超过95%的置信水平,增加显著;其次以增加趋势大小排序分别为2月>5月>8月>11月>4月>3月;月均 ET_0 以12月减小趋势最为明显,Z值为-1.60,通过了90%的置信水平,其次是1月、9月。这表明月际平均 ET_0 变化出现不稳定性,但大体上还是与水热月际分配一致。

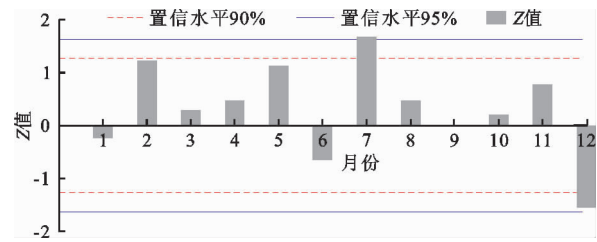


图5 1995-2015年黔中地区月 ET_0 的M-K变化趋势

图6为1995-2015年黔中地区 ET_0 各季节变化趋势。由图6可看出,1995-2015年黔中地区季均 ET_0 呈增加趋势,以春季最为显著。春季 ET_0 多年平均值为273.6 mm(图6(a)),呈增大—减小—增大的变化趋势,由春季 ET_0 的5 a滑动平均曲线可以看出,1995-2002年春季 ET_0 出现明显的增大再减小的峰值,其他年份变化相对稳定。夏季 ET_0 占全年 ET_0 总量的36.22%,整体呈增大趋势(图6(b))。夏季 ET_0 出现3个明显的峰谷,2005年 ET_0 值最小,为284.6 mm;2011、2013年出现两个高峰值, ET_0 值分别为372.9、369.1 mm,变化率为16.64%。夏季 ET_0 的5 a滑动平均曲线表明,夏季 ET_0 在1995-2009年一直呈增大趋势,但从2010年开始, ET_0 整体出现减小趋势。秋季的 ET_0 变化较为平稳(图6(c)),由5 a滑动平均曲线来看,秋季 ET_0 总体呈减小—增大—减小的趋势,具体为1995-2003年以减小趋势为主,2004-2007年则以增大趋势为主,2007年以后 ET_0 出现波动,但以减小趋势为主。冬季 ET_0 最大值与最小值相差49.93 mm,由冬季5 a滑动平均曲线发现,冬季曲线整体呈增加—减少的趋势,1995-2009年 ET_0 值波动增大,2010年以后呈减小趋势(图6(d))。

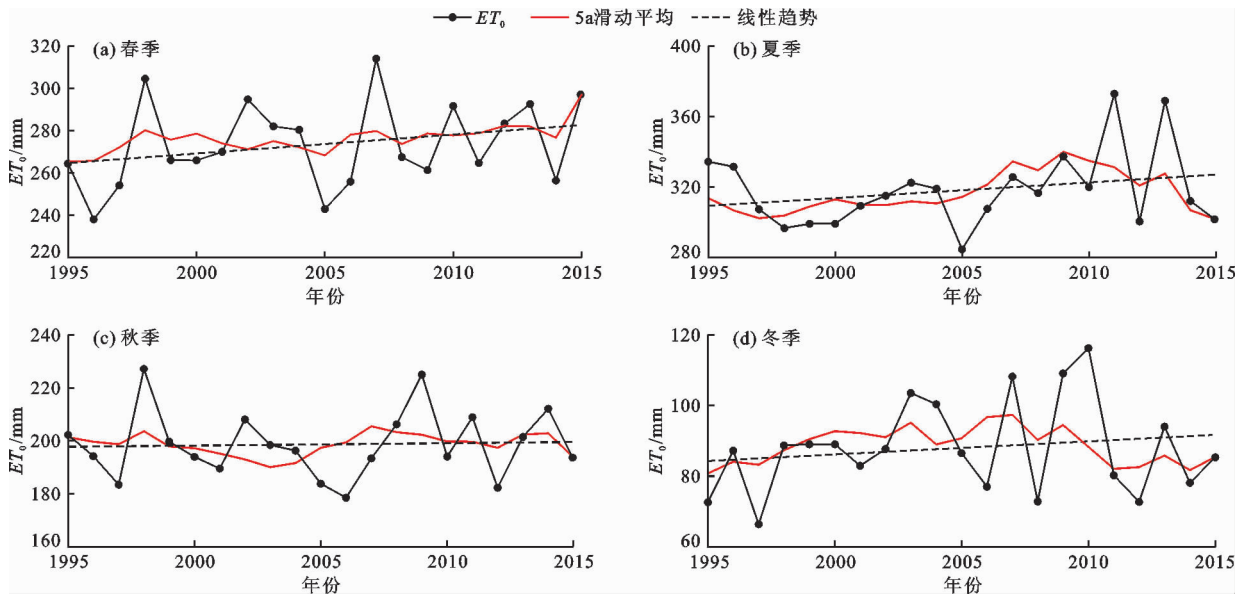


图 6 1995 - 2015 年黔中地区 ET_0 各季节变化趋势

图 7 为 1995 - 2015 年黔中地区各季节 ET_0 的突变分析。由图 7 可以发现,该地区 ET_0 在研究时段内各季节均出现了突变年份,表明各季节 ET_0 在研究时段内发生了明显变化。春季 ET_0 变化明显,2003 年以后,统计量 UF 以及 UB 均达到了 $\alpha = 0.05$ 的置信水平(图 7(a)),研究时段内共有 3 个突变年份,即 2003、2004 年春季 ET_0 发生了显著的减小趋势,2007 年则发生了显著的增大趋势,这与图 6(a) 春季 ET_0 变化趋势一致。夏季 ET_0 整体呈不明显增大趋势,仅

有 2002 年为突变年份(图 7(b))。秋季 ET_0 在 1995 - 2003 年以及 2006 - 2014 年 UF 统计量为正(图 7(c)),表明该两个时段秋季 ET_0 呈增大趋势,但增大趋势不显著,并在 2002 年左右发生突变。2004 - 2005 年秋季 UF 统计量为负,说明该时段秋季 ET_0 呈减小趋势,且不显著。冬季 ET_0 变化与春季大体相似(图 7(d)),1995 - 2015 年 UF 统计量均为正,表明冬季 ET_0 整体呈增大趋势,且 1996 - 2013 年间 ET_0 上升趋势显著,并在 2008 年发生突变。

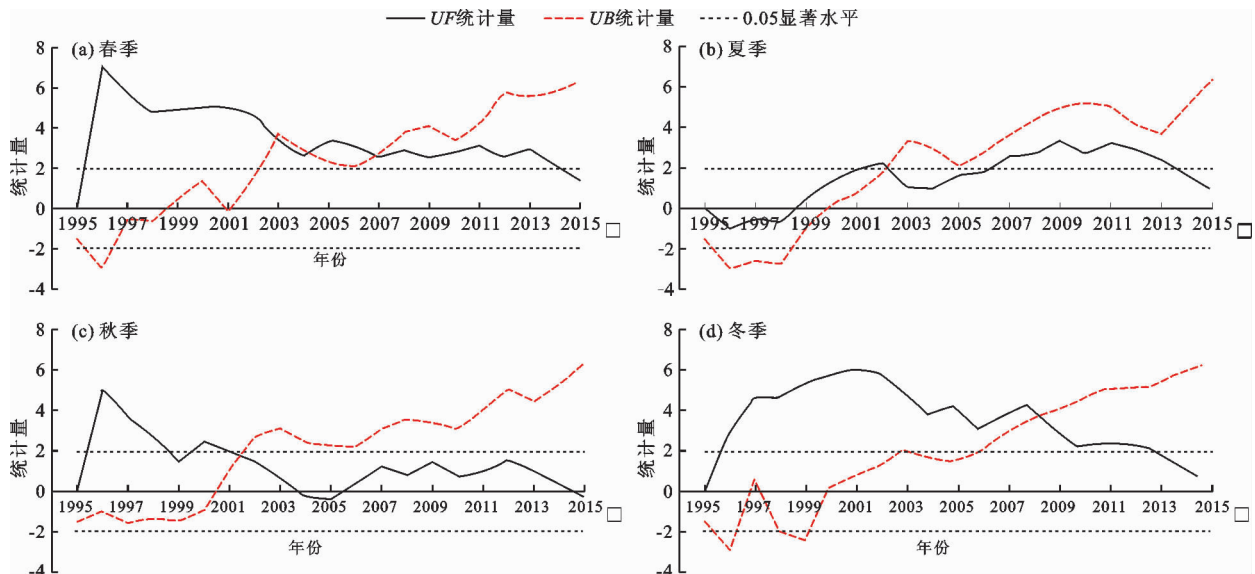


图 7 1995 - 2015 年黔中地区各季节 ET_0 的突变分析

图 8 为 1995 - 2015 年黔中地区 ET_0 的年际变化趋势。由图 8 可知,1995 - 2015 年期间黔中地区的 ET_0 整体呈增大趋势,增大幅度为 7.40 mm/10a;

多年平均 ET_0 为 914.6 mm, ET_0 最大值为 993.8 mm,最小值为 835.3 mm,两者差值为 158.5 mm;历年 ET_0 围绕多年平均 ET_0 波动幅度较大。图 8 中的

5 a 滑动平均曲线表明,年 ET_0 呈增大与减小交替的变化趋势,1995 - 2007 年 ET_0 总体呈增大趋势,2008 - 2015 年 ET_0 呈减小趋势。

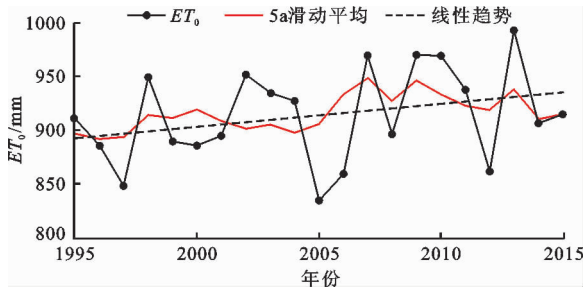


图8 1995 - 2015 年黔中地区 ET_0 的年际变化趋势

表 2 为黔中及周边地区各气象站点 ET_0 的 M - K 趋势变化统计量 Z 的特征值。由表 2 可以看出,贵阳是 13 个气象站点中唯一一个 Z 值为负值的站点,同时 Z 的绝对值大于 1.28,通过了信度 90%,说明贵阳站的 ET_0 呈显著的减小趋势;威宁、毕节、安顺、兴仁、紫云以及罗甸站的 Z 值虽然为正,但 ET_0 增大的趋势不明显。 ET_0 增大趋势显著的是普安、息烽以及惠水站,均通过了信度 99% 显著性检验,其次是黔西、织金以及望漠站,通过了信度 95% 显著性检查。

表 2 黔中及周边地区各气象站点 ET_0 的 M - K 趋势变化统计量 Z 的特征值

站名	平均值/ mm	最大值/ mm	最小值/ mm	C_v 值/ %	Z 值	趋势
威宁	929.75	1011.7	695.7	0.16	0.42	↑
普安	919.71	940.3	730.6	0.08	2.57***	↑
毕节	810.64	977.8	707.3	0.07	1.03	↑
息烽	858.24	1150.2	856.1	0.09	2.60***	↑
黔西	818.80	1070.5	880.2	0.07	1.81**	↑
织金	867.62	1051.8	754.7	0.05	2.17**	↑
安顺	905.71	973.5	723.0	0.09	1.00	↑
贵阳	900.96	1309.0	926.5	0.09	-1.30*	↓
兴仁	991.08	1486.3	755.3	0.11	0.33	↑
望漠	1030.01	1021.0	692.7	0.08	1.96**	↑
紫云	941.90	1248.9	775.1	0.05	0.82	↑
惠水	952.40	984.9	775.9	0.08	2.78***	↑
罗甸	963.43	1041.7	842.2	0.05	1.15	↑

注:(1) Z 值为正表示增加趋势,为负代表减少趋势;(2)“*”、“**”和“***”分别表示通过了置信度 90%、95%、99% 的显著性检验;(3) C_v 为差异系数,表示数值的相对离散程度。

图 9 为 1995 - 2015 年黔中地区年平均 ET_0 值 M - K 突变检验。由图 9 可看出,年际 ET_0 总体呈增大趋势, UF 统计量均为正值,1996 - 2003 年及

2005 - 2014 年的 UF 曲线超过了 $\alpha = 0.05$ 显著水平线,这表明黔中地区年平均 ET_0 增大趋势十分显著。年平均 ET_0 在 2002 - 2007 年出现了显著的突变点,说明在 2002 - 2007 年这段时期, ET_0 增大更为显著。

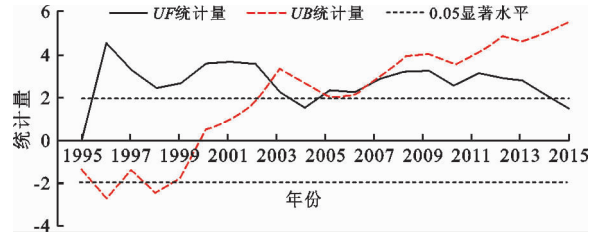


图9 1995 - 2015 年黔中地区年平均 ET_0 值 M - K 突变检验

3.3 潜在蒸散量的精度检验

研究表明,气象测量仪器蒸发皿实测蒸发数据应用于陆面地表蒸散发检验时,需要引入蒸发皿折算系数,使用蒸发皿蒸散发量和蒸发皿折算系数计算 ET_0 。依据王梅等^[22]的研究,蒸发皿折算系数为 0.9,鲍平勇^[23]根据地区修正认为湿润地区折算系数近似为 1。本文考虑地区差异,并没直接引用两位作者提出的折算系数,而是采用张鑫等^[24]在中国西南地区研究所提出的贵州蒸发皿折算系数 0.8。

选择年份与数据比较完整、分布比较均匀的 4 个气象站点,以 1995 - 2015 年逐月 ET_0 值与各站点实测蒸发值做相关性分析,即检验了两者在时间尺度上的相关性,也验证了两者在空间上的一致性。图 10 为该 4 个气象站点 ET_0 估算值与实测蒸发值的相关性分析。由图 10 可知, ET_0 估算值与实测蒸发值的相关系数平均值为 0.8, R^2 在 0.7 ~ 0.9 之间,其中毕节站的相关系数最大, R^2 为 0.901 0;兴仁站的相关系数最小, R^2 为 0.708 8。上述结果表明, P - M 公式估算的 ET_0 值与各气象站点的实测蒸发值具有良好的相关性,同时在时间与空间分布上保持较高的一致性,估算的 ET_0 精度可满足该研究的需求。

3.4 不同土地利用类型对潜在蒸散发量的影响

3.4.1 土地利用类型的变化 黔中地区的土地利用类型主要以林地、耕地及草地为主,其次是建设用地、少量的未利用地和水域。1995、2000、2005、2010、2015 年 5 期的林地、草地、耕地 3 种主要土地利用类型的面积之和占整个研究区总面积的比例分别为 97.7%、97.0%、95.6%、95.2% 以及 93.6%,其占比总体呈下降趋势,但不显著。

将研究时段按上述 5 期划分为 4 个阶段,即 1995 - 2000、2000 - 2005、2005 - 2010 以及 2010 - 2015 年,表 3 为各阶段黔中水利工程区土地利用的转移矩阵。

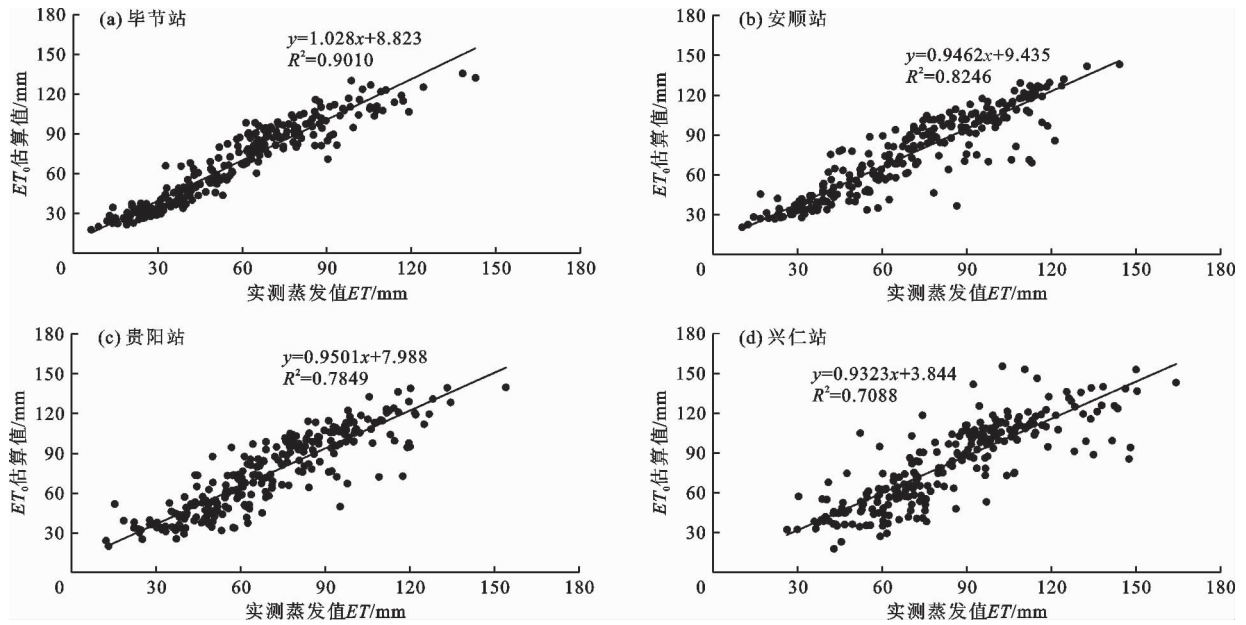


图 10 4 个气象站点 1995 - 2015 年逐月 ET_0 估算值与实测蒸发值的相关性分析

表 3 1995 - 2015 年不同阶段黔中水利工程区土地利用类型变化转移矩阵

km²

年份	土地利用类型	林地	草地	耕地	建设用地	未利用地	水域	减少量
1995 - 2000	林地	5547.4	520.7	346.3	2.9	9.1	0.3	879.4
	草地	455.6	3269.6	893.4	7.6	14.4	0.3	1371.2
	耕地	73.1	246.8	4373.4	164.2	18.9	1.8	504.7
	建设用地	5.8	7.9	61.0	156.6	0.0	0.2	74.8
	未利用地	2.3	8.0	7.5	1.0	27.1	0.1	18.9
	水域	1.3	0.7	7.8	1.2	0.0	83.9	11.0
	增加量	538.1	784.0	1316.0	176.8	42.4	2.6	
2000 - 2005	林地	5614.1	359.6	88.9	18.1	3.7	1.2	471.4
	草地	749.6	2963.5	305.0	14.5	20.3	0.6	1090.1
	耕地	381.2	721.9	4382.0	183.9	13.2	7.1	1307.3
	建设用地	2.3	5.3	22.8	300.3	1.4	0.7	32.5
	未利用地	3.8	6.7	0.3	0.0	58.7	0.0	10.8
	水域	0.3	0.2	0.5	0.4	0.1	85.0	1.5
	增加量	1137.2	1093.8	417.5	216.8	38.7	9.5	
2005 - 2010	林地	6740.3	10.6	0.0	0.3	0.0	0.0	10.9
	草地	111.6	3930.3	7.9	7.7	0.0	0.0	127.2
	耕地	6.2	10.8	4723.6	58.9	0.0	0.1	76.0
	建设用地	0.0	0.4	0.6	516.2	0.0	0.0	0.9
	未利用地	0.0	0.0	0.9	1.2	95.3	0.0	2.1
	水域	0.0	0.4	0.2	0.2	0.0	93.8	0.8
	增加量	117.8	22.2	9.5	68.3	0.0	0.1	
2010 - 2015	林地	6369.9	438.3	20.5	19.2	4.0	6.2	488.2
	草地	369.4	3337.1	190.8	26.9	4.0	24.4	615.4
	耕地	65.5	155.2	4301.6	196.5	11.5	2.7	431.5
	建设用地	0.9	2.4	8.7	568.4	3.7	0.4	16.1
	未利用地	7.0	6.4	0.1	7.7	74.0	0.0	21.2
	水域	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	93.4	0.5
	增加量	442.9	602.3	220.2	250.6	23.2	33.7	

由表3可见,1995-2015年黔中水利工程区土地利用类型转移主要发生在林地、草地、耕地以及建设用地4种地类,且每种土地利用类型转移的规律不一致,具体为:(1)1995-2015年草地面积减少趋势最为显著,共减少了701.3 km²,主要向林地与耕地转移,转移量分别为421.5、190.8 km²/a,转移率分别为13.1%、5.9%。(2)1995-2015年耕地面积总体呈减少趋势,共减少了356.4 km²,主要向林地、草地以及建设用地转移,转移量分别131.50、283.7、149.0 km²/a,转移率分别为5.6%、12.2%、6.4%。(3)1995-2015年林地面积的变化呈减少—增加—减少的趋势,但整体还是呈增加趋势,林地面积共增加了386.14 km²,主要向草地和耕地转移,转移量分别为332.3、151.8 km²/a,转移率分别为18.0%、8.2%。(4)1995-2015年建设用地面积主要呈增加趋势,是增加面积最多的地类,共增加了587.3 km²,主要由耕地面积转入,4个不同时期的转移面积分别为164.1、183.9、58.9、196.5 km²,转移率分别为7.0%、7.9%、2.5%、8.4%。

利用黔中地区的1995、2000、2005、2010、2015年的土地利用类型的数据来研究1995-2015年黔中连续4个时段的不同土地利用类型 ET_0 的时间变化特征,从而探求土地利用变化对黔中地区 ET_0 变化的影响。

3.4.2 不同土地利用类型的潜在蒸散量变化趋势

图11为1995-2015年4个时段黔中地区各土地利用类型的月均 ET_0 。由图11可以看出,不同时段各土地利用类型月均 ET_0 存在差异但并不显著。1995-2000年月均 ET_0 总体低于其他时段,这一时段,水域的月均 ET_0 最大,为74.6 mm,未利用地的月均 ET_0 最小,为69.0 mm,可以认为水域水面蒸发作用强烈,使得水域月均 ET_0 较大。该阶段各地类的月均 ET_0 大小排序为水域>建设用地>耕地>林地>草地>未利用地;2001-2005年未利用地月均 ET_0 最大,为76.4 mm,建设用地的月均 ET_0 最小,为74.4 mm。可以认为降水增多、气温较高时,表面无覆盖物的未利用土地 ET_0 会随之增大。该时段月均 ET_0 大小排序为未利用地>草地>林地>耕地>水域>建设用地;2006-2010年各地类月均 ET_0 总体大于其他时段的,林地月均 ET_0 为77.61 mm,在同时期各地类中为最大,建设用地的月均 ET_0 最小,为76.2 mm。同期林地面积最大,植被的蒸腾作用以及叶面指数会使其月均 ET_0 增加,该阶段各地类月均 ET_0 大小排序为林地>耕地>水域>未利用地>

草地>建设用地;2011-2015年林地月均 ET_0 最大,为76.4 mm,建设用地月均 ET_0 最小,为74.7 mm。该阶段各地类月均 ET_0 大小排序为林地>耕地>草地>未利用地>水域>建设用地。

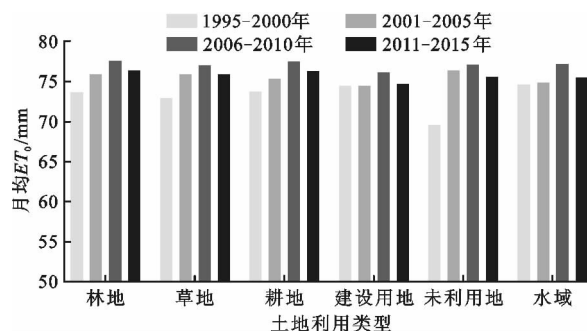


图11 1995-2015年4个时段黔中地区各土地利用类型的月均 ET_0 。

图12为1995-2015年4个时段黔中地区各土地利用类型的季均 ET_0 。由图12发现,不同时段不同季节的平均 ET_0 出现不同的变化。具体为:

(1)各地类春季 ET_0 在2001-2010年变化趋势大体一致,以未利用地的季均 ET_0 为最大,建设用地为最小; ET_0 在1995-2000年以及2011-2015年两个时段出现了明显差异,1995-2000年以草地季均 ET_0 为最大,未利用地为最小,而2011-2015年则以草地季均 ET_0 为最大,建设用地为最小。

(2)各地类夏季 ET_0 在不同时段变化趋势不一致。1995-2000年季均 ET_0 以水域为最大,以未利用地为最小;2001-2005年,各地类季均 ET_0 平均值大于300 mm,各地类之间 ET_0 相差不大,以林地季均 ET_0 为最大,以建设用地为最小;2006-2010年以及2011-2015年各地类 ET_0 变化趋势相似,均以水域季均 ET_0 为最大,但最小季均 ET_0 出现差异,2006-2010年以草地季均 ET_0 为最小,2011-2015年则以未利用地季均 ET_0 为最小。

(3)秋季各地类 ET_0 变化可以分为两个阶段。1995-2000年以及2001-2005年各地类秋季 ET_0 变化相似,均以未利用地季均 ET_0 为最小。但在最大季均 ET_0 上出现差异,1995-2000年以水域季均 ET_0 为最大,2001-2005年则以建设用地季均 ET_0 为最大。

(4)冬季各地类之间平均 ET_0 差值不大,但其变化大于其他季节。1995-2000年各地类中建设用地冬季 ET_0 最大,未利用地 ET_0 最小;2001-2005年季均 ET_0 以未利用地为最大,以建设用地季均 ET_0 为最小;2006-2010年以林地季均 ET_0 为最大,

以建设用地季均 ET_0 为最小;2011 - 2015 年冬季

ET_0 以草地为最大,以建设用地 ET_0 为最小。

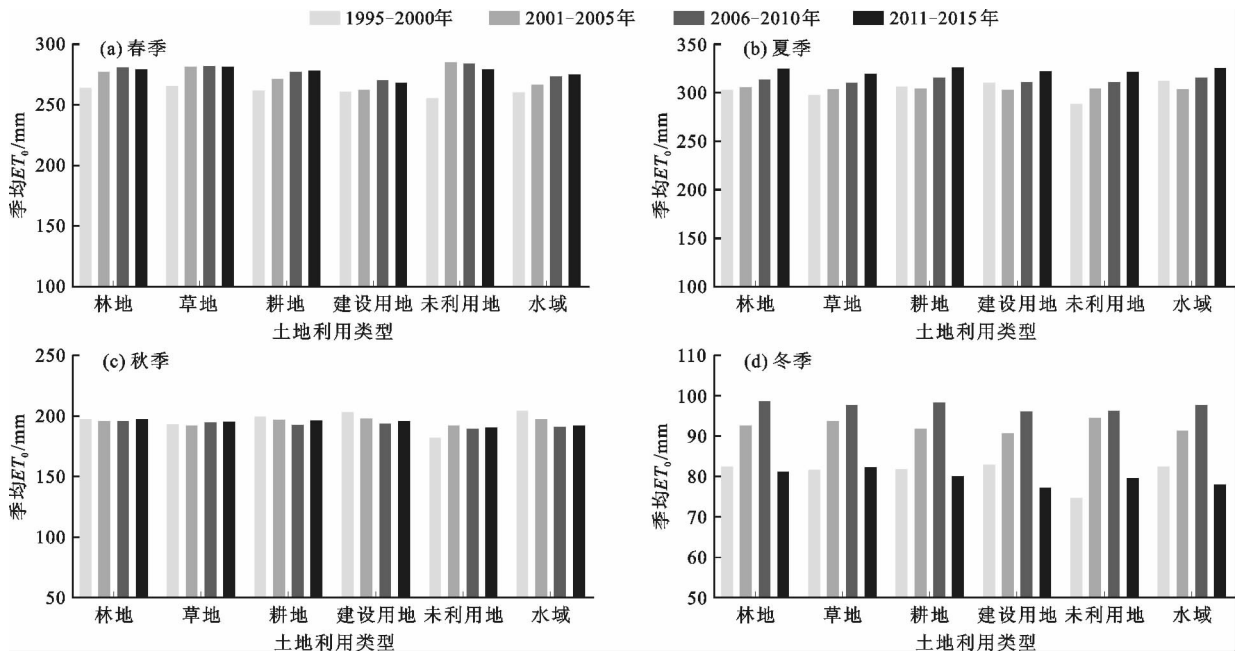


图 12 1995 - 2015 年 4 个时段黔中地区各土地利用类型的季均 ET_0

图 13 为 1995 - 2015 年及其 4 个时段黔中地区各土地利用类型的年均 ET_0 。

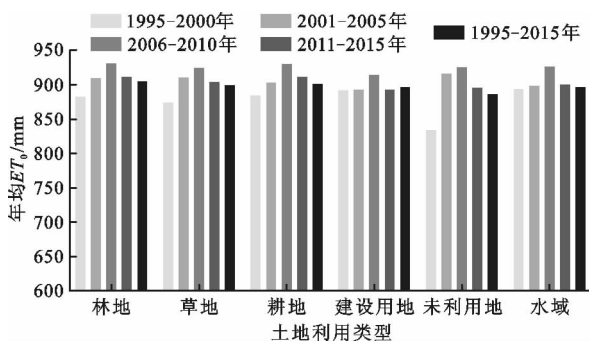


图 13 1995 - 2015 年及其 4 个时段黔中地区各土地利用类型的年均 ET_0

由图 13 可知,不同时段各地类年均 ET_0 出现较大的差异。各地类在 1995 - 2000 年年均 ET_0 最小,其中水域年均 ET_0 最大,为 894.2 mm,未利用地年均 ET_0 最小,为 834.5 mm,两者相差 59.7 mm,这表明 1995 - 2000 年年均 ET_0 变化十分显著;2006 - 2010 年各地类年均 ET_0 高于其他时段,林地年均 ET_0 最大,为 931.34 mm,建设用地年均 ET_0 最小,为 914.5 mm,两者相差 16.8 mm,这与 2001 - 2005 年以及 2011 - 2015 年年均 ET_0 变化幅度相似,变化幅度平均值为 19.4 mm。2001 - 2005 年年均 ET_0 最大值是 916.3 mm,地类为未利用地,年均 ET_0 最小值为 893.7 mm,地类为建设用地,两者相差 22.6 mm;

2011 - 2015 年年均 ET_0 最大值为 912.5 mm,地类为林地,年均 ET_0 最小值为 893.5 mm,地类为建设用地,两者相差 19.0 mm。由此可以得出各地类多年平均 ET_0 大小排序为林地 > 耕地 > 草地 > 水域 > 建设用地 > 未利用地。

4 讨论

1995 - 2015 年研究区不同时段各土地利用类型月均 ET_0 存在差异但并不显著,总体月均 ET_0 以林地为最大,以建设用地为最小,这与地类的属性和面积有关。林地面积较大且因其蒸腾作用以及叶面指数大等,整体月均 ET_0 较大;建设用地面积随着经济的发展快速增长,但因其多为不透水层,整体月均 ET_0 偏小。

不同季节不同土地利用类型的 ET_0 有所差异,春季以草地和林地的 ET_0 为最大,这与植被生长期需水及春季气温回升有关;夏季 ET_0 总体比其他季节的大,以耕地和水域为最大,贵州属于亚热带季风气候,6 月降水最多,7、8 月则高温少雨,相对湿度小,并且黔中地区的粮食作物为以水稻为主,这使得耕地的 ET_0 大于其他的地类,同时,夏季加快了水域表面的蒸发作用;秋季气温开始下降,植被生长变慢,蒸腾作用减弱,使得这个时期的林地、草地以及耕地 ET_0 减少;冬季受冷空气影响,温度、相对湿度较低,使得各地类的季均 ET_0 低于其他季节,未利用

地因其表面无覆盖物且其土壤很难蓄水等原因, 季均 ET_0 又低于其他地类。

研究时段内各地类多年平均 ET_0 总体均呈增加—减少的变化趋势, 由图 13 可知, 各地类年均 ET_0 可以分为两个阶段, ET_0 增加阶段为 1995—2010 年, ET_0 减少阶段为 2011—2015 年。1995—2010 年, 土地利用结构变化明显, 主要以林地、草地、耕地以及建设用地变化趋势为主, 具体为林地和建设用地面积增加, 草地以及耕地面积减少, 这一时段, 林地年均 ET_0 比草地以及耕地年均 ET_0 分别高 4.1、4.3 mm/a。究其原因: 一是根据林木根系吸水的生理特性, 林地面积的增加, 会使蒸腾作用加强; 二是植被的叶面积指数升高也能使林地的年均 ET_0 增大; 三是退耕还林政策的实行对其产生的影响。2010—2015 年年均 ET_0 逐渐减少, 该时期各土地利用变化以及转移较为明显, 主要体现为林地、建设用地以及水域面积增加, 耕地、草地以及未利用地面积减少。建设用地的不透水层以及未利用地无植被覆盖, 使得两者的年均 ET_0 小于其他地类。水域水体充足, 主要以水面蒸发为主, 所以年均 ET_0 较高。随着经济的发展, 耕地主要向建设用地转移以及退耕还林政策使其向林地转移, 这使得耕地年均 ET_0 呈减少趋势。林地以及草地面积波动范围较小, 这一时期年均 ET_0 虽然小于 1995—2010 年时段的年均 ET_0 , 但仍然高于其他地类。

5 结 论

本文基于黔中地区 13 个气象站逐日常规气象观测资料, 采用 FAO 的 Penman—Monteith 公式估算了研究区 1995—2015 年逐月和逐年潜在蒸散发 ET_0 , 结合 Mann—Kendall 检验法, 对 ET_0 的时空格局特征进行了分析, 并进一步研究了 ET_0 对土地利用变化的响应, 得出以下主要结论:

(1) 1995—2015 年黔中水利工程区 ET_0 整体呈增加趋势。月尺度与季尺度的 ET_0 变化与水热时间分配一致, 且年内分配不均匀。月尺度 ET_0 最大值出现在 7、8 月, 最小值在 1、12 月; 季尺度 ET_0 最大值在夏季, 最小值在冬季。年尺度 ET_0 呈增加趋势, 且 1995—2015 年发生了 3 次突变, 变化显著, 呈波动式增大。黔中地区 ET_0 表现为较显著的空间分布格局, 自东南向西北整体呈递减趋势。

(2) 1995—2015 年黔中水利工程区土地利用结构变化明显, 主要以林地、草地、耕地以及建设用地变化趋势为主, 且研究区内林地、草地以及耕地面积

占比最大。林地、建设用地面积的变化以增加趋势为主, 草地、耕地面积则以减少趋势为主。

(3) 不同土地利用类型的 ET_0 总体呈增加—减少的变化趋势, 草地以及耕地向林地转移面积会使 ET_0 增大, 林地、草地以及耕地向建设用地、未利用地转移面积会使 ET_0 减小。这表明土地利用变化明显时, ET_0 也会随之产生较大的变化。

本文通过不同土地利用类型的 ET_0 变化来研究不同地类对 ET_0 的影响, 然而水文过程非常复杂, 其受多种因素的影响, 比如地形因子(坡度、海拔、地表粗糙度等)、地表参数(植被归一化 NDVI、地表比辐射率、地表反照率等)以及气象因子(相对湿度、风速、气压、净辐射等), 单独考虑土地利用变化对潜在蒸散发的影响是不够的, 需要进一步的完善。因此, 未来时期将会继续致力于地表蒸散发的研究, 将土地利用类型与各影响因子相结合, 进一步探求影响地表蒸散发的原因和机理。

参考文献:

- [1] 吴宗俊. 基于 Penman—Monteith 模型的鄱阳湖湿地潜在蒸散发量遥感估算研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- [2] GUAN Xiaoxiang, ZHANG Jianyun, YANG Qinli, et al. Changing characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Huang—Huai—Hai River Basin, China[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2021, 133:97—108.
- [3] 张璐, 朱仲元, 张圣微, 等. 近 59 a 锡林河流域潜在蒸散发及地表干湿状况变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4):997—1003.
- [4] 周正模, 杜付然, 江海涛, 等. 淮河上游土地利用变化对流域蒸散发能力影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(1):60—65+70.
- [5] KUNDU S, KHARE D, MONDAL A. Past, present and future land use changes and their impact on water balance[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197:582—596.
- [6] HAN Jingyan, ZHAO Yong, WANG Jianhua, et al. Effects of different land use types on potential evapo-transpiration in the Beijing—Tianjian—Hebei region, North China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6):922—934.
- [7] BOISIER J P, DE NOBLET N, CIAIS P. Historical land-use-induced evapotranspiration changes estimated from present-day observations and reconstructed land-cover maps[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(9):3571—3590.
- [8] LIU Wenjuan, HONG Yang, KHAN S I. Actual evapotranspiration estimation for different land use and land cover in urban regions using Landsat 5 data[J]. Journal of Ap-

- plied Remote Sensing, 2010,4(1):041873.
- [9] HAN Songjun, TANG Qihong, ZHANG Xuezheng, et al. Surface wind observations affected by agricultural development over Northwest China[J]. Environmental Research Letters, 2016,11(5):054014.
- [10] 田仁伟,赵翠薇,贺中华,等. 1995-2016年三岔河上游土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2019,39(3):12-18.
- [11] 张一鸣,田雨,雷晓辉,等. 三岔河上游近50年降水径流变化特征分析[J]. 水文, 2016,36(5):79-84.
- [12] 焦树林,刘丽,孙婷,等. 三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应[J]. 地理研究, 2013,32(6):1025-1032.
- [13] 陈志霞,喻阳华,吴银菇. 黔中石漠化区大理石矿山不同植被恢复对土壤养分及化学计量的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2020,38(1):95-102.
- [14] 吴清林,梁虹,熊康宁,等. 喀斯特地区水土流失监测方法评述[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2020,38(3):30-38.
- [15] 郎登潇,师嘉祺,郑江坤,等. 近52a西南地区潜在蒸散发时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2017,26(6):945-954.
- [16] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements — FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome:FAO, 1998.
- [17] CUNHA A C, FILHO L R A G, TANAKA A A, et al. Influence of the estimated global solar radiation on the reference evapotranspiration obtained through the Penman-Monteith FAO 56 method[J]. Agricultural Water Management, 2021,243:106491.
- [18] 朱国锋,何元庆,蒲焘,等. 1960-2009年横断山区潜在蒸散发量时空变化[J]. 地理学报, 2011,66(7):905-916.
- [19] 张波,谷晓平,古书鸿,等. 近55年贵州省潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(3):20-26.
- [20] 黄玥,黄志霖,肖文发,等. 基于Mann-Kendall法的三峡库区长江干流入库断面水质变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019,28(4):950-961.
- [21] 贾立斌,吴伟宏,袁国华. 基于Mann-Kendall的中国近岸海域海洋生态环境承载力评价与预警[J]. 生态经济, 2019,35(2):208-213+224.
- [22] 王梅,王建波,那景坤. E-601型蒸发器水面蒸发实验分析[J]. 黑龙江水专学报, 2014,31(3):10-12.
- [23] 鲍平勇. 半干旱区域日蒸散发估算的遥感研究[D]. 南京:河海大学, 2015.
- [24] 张鑫,庄文化,李洪宇,等. 中国西南地区蒸发皿系数 K_p 研究[J]. 灌溉排水学报, 2016,35(9):109-112.

(上接第105页)

- [11] 张杰,邓晓军,翟禄新,等. 基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J]. 水土保持研究, 2018,25(5):385-389+396.
- [12] 郑乐,杨法暄,钱会,等. 基于超效率DEA模型的宁夏工业水资源利用效率研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(2):81-86.
- [13] 应卓晖,赵衡,王富强,等. 基于DEA和Tobit模型的河南省水资源利用效率评价及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021,19(2):255-262.
- [14] 张国基,吴华清,刘业政,等. 中国水资源综合利用效率测度及其空间交互分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2020,37(8):123-139.
- [15] 颜俊,崔瑞鹏. 淮河生态经济带旅游经济时空分异与收敛性研究[J]. 地域研究与开发, 2020,39(4):91-97.
- [16] 国务院. 淮河生态经济带发展规划[EB/OL]. (2018-10-18) [2021-6-26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-10/18/content_5332105.htm.
- [17] 杨丹,唐德善,周祎. 基于正态云模型的人水和谐度评价[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(3):53-58.
- [18] 李德毅,刘常显,涂文燕. 正态云模型的重尾性质证明[J]. 中国工程科学, 2011,13(4):20-23.
- [19] WANG Xintong, LI Shucui, XU Zhenhao, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels excavation based on normal cloud model[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019,78(5):3783-3798.
- [20] 侯代男,江鸿,周慧秋. 基于熵权-正态云模型的政策性农业保险实施效果评价——以黑龙江省为例[J]. 干旱区资源与环境, 2020,34(4):33-38.
- [21] 薛黎明,刘保康,郑志学,等. 基于理想点-可拓云模型的煤炭资源可持续力评价[J]. 自然资源学报, 2018,33(9):1657-1665.
- [22] 叶达,吴克宁,刘需珈. 基于正态云模型与熵权法的景泰县耕地后备资源开发潜力评价[J]. 中国农业资源与区划, 2016,37(6):22-28.
- [23] 刘莉,汪丽娜. 基于熵权-正态云模型的水资源可持续性评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020,52(1):77-84.
- [24] 周云哲,栗晓玲,周正弘. 基于"量-质-域-流"四维指标体系的水资源荷载状况评价——以黑河流域三城市为例[J]. 干旱地区农业研究, 2019,37(3):215-223+231.
- [25] 张丽洁,康艳,栗晓玲. 基于正态云模型的黄河流域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉, 2019(1):76-83.
- [26] 魏光辉,马亮. 基于正态云模型的区域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉, 2015(1):68-71.
- [27] 李玉平,朱琛,张璐璇,等. 基于改进层次分析法的水环境生态安全评价与对策——以邢台市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019,55(2):310-316.