

基于 Penman-Monteith 的江南丘陵地区地表参考蒸散量 和水分盈亏量特征分析

刘 燕¹, 刘友存^{1*}, 陈 明¹, 边晓辉², 丁倩倩²

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 赣州 341000; 2. 江西理工大学建筑与测绘工程学院, 赣州 341000)

摘 要: 依据 69 个气象站点 1951—2013 年的气象资料, 运用 Penman-Monteith 方程计算出参考蒸散量, 同时结合累积距平、反比距离插值、Mann-Kendall 检验和小波分析等方法, 从参考蒸散量和水分盈亏量的角度分析了江南丘陵地区地表水分变化特征。结果表明: ①江南丘陵地区参考蒸散量夏季最高, 冬季最低; 水分盈亏量则是春季最高, 秋季最低。年参考蒸散量呈缓慢上升趋势, 且受气温突变影响, 在 1954 年出现突变点; 而年水分盈亏量呈波动下降趋势, 受降水量突变影响, 在 1956 年、1962 年和 2007 年出现突变点, 二者发生突变的时间都集中在 20 世纪 50 和 60 年代。②参考蒸散量的低值和水分盈亏量的高值区域主要出现在高海拔地区, 空间上东部地区的参考蒸散量和水分盈亏量都高于西部地区。除少数站点外, 参考蒸散量的趋势系数均为正值, 呈现缓慢上升; 水分盈亏量的趋势系数均为负值, 呈现缓慢下降。③江南丘陵地区的参考蒸散量和水分盈亏量由于分别受到相对湿度和降水量周期变化的影响, 都存在以短周期震荡为主的变化特征, 其中水分盈亏量在秋季还存在中长周期震荡。

关键词: 参考蒸散量; 水分盈亏量; 突变分析; 小波分析; 江南丘陵

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)04-0680-09

Analysis on the variation characteristics of surface water in the Jiangnan Hills based on the Penman-Monteith method

LIU Yan¹, LIU Youcun¹, CHEN Ming¹, BIAN Xiaohui², DING Qianqian²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000;

2. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

Abstract: In this paper, the meteorological data of 69 meteorological stations from 1951 to 2013 were selected and the reference evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith equation. Combined with the methods of cumulative and inverse distance interpolation, Mann-Kendall test, wavelet analysis, etc. the surface water condition was analyzed from the aspect of reference evapotranspiration and water deficit. The results showed: ①the reference evapotranspiration in the Jiangnan hills from 1951 to 2013 showed a slowly increasing trend, and there was an abrupt point around 1954. The water deficit showed a fluctuating declining trend and appeared abrupt points in 1956, 1962, and 2007 respectively. The time of abrupt points in weather stations was concentrated in the 50s and 60s of the 20th century. The reference evapotranspiration was the highest in summer and the lowest in winter; the water deficit was the highest in spring and lowest in autumn. ② In the Jiangnan hills for nearly 63 years, the low value of reference evapotranspiration and the high value of water deficit mainly occur in high altitude areas, but in the space, the east is higher than the west. Except for a few sites, the reference evapotranspiration trend coefficient is positive, showing a slow rise; the water deficit coefficient is negative, showing a slow decline. ③ As affected by the cyclical changes of relative humidity and precipitation respectively, the reference evapotranspiration and water deficit in the Jiangnan hills are variations in the characteristics of short- period

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 国家自然科学基金 (41861002, 51664025), 江西省自然科学基金项目 (20181BAB203026), 江西省创新创业高层次人才“千人计划”创新人才长期项目(青年类), 赣州市重点研发计划项目(赣市财教字[2017]179 号)和江西理工大学“清江学者”拔尖人才科研启动项目(JXUSTQJBJ2017002)资助。

作者简介: 刘 燕, 硕士研究生。E-mail: 2905191720@qq.com

* 通信作者: 刘友存, 博士, 副教授, 博士生导师。E-mail: liuyoucun@126.com

oscillations, in which the water deficit still have medium-long period oscillations in autumn.

Key words: reference evapotranspiration; water deficit; mutation analysis; wavelet analysis; Jiangnan hills

蒸散是地表水分消耗的重要途径, 其变化影响着区域内水量平衡的各分量。水分盈亏量(降水量与参考蒸散量差值)是衡量一个地区地表水分状况的重要指标之一。参考蒸散量和水分盈亏量, 不仅影响着地表植被和河流水文状况^[1], 而且还严重影响着区域内农业生产、水资源利用和经济可持续发展。国内外对参考蒸散量和水分盈亏量的研究比较多(尤其是在生态环境脆弱区), Yang 等^[2]利用 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 方法对全球参考蒸散量进行了敏感性分析, Roderick 等^[3]研究发现过去 50 年间北半球参考蒸发量普遍减小, 并探讨了其可能的原因。此外, 有学者对我国东北^[4-5]、西北^[6-7]、西南^[8-9]、黄河流域^[10-11]和长江流域^[12-13]等地区进行了地表水分状况的分析研究。而黄会平^[14-16]等学者的研究指出近 50 多年来中国年均参考蒸散量大体呈下降趋势, 而在西北地区下降趋势最为显著。蒸散量很大程度上影响着农作物给水和生长情况, 部分学者还将参考蒸散量和农业发展联系起来, 对农业灌溉区的蒸散状况进行研究^[17]。总之, 北方尤其是西北地区由于气候条件恶劣, 生态环境脆弱, 对其参考蒸散量和水分盈亏量的研究颇多并取得了丰硕成果。然而, 处在湿润气候区的江南丘陵地区, 由于气候条件优越, 生态环境良好, 参考蒸散量和水分盈亏量的研究往往易被忽视。另外, 江南丘陵地区的洞庭湖和鄱阳湖流域作为我国南方重要的产粮区, 虽然降水量丰沛, 但近几十年来参考蒸散量和水分盈亏量分别呈现增加和减少的趋势, 洪水和干旱等自然灾害时有发生, 甚至频率和规模呈现增加和扩大的趋势。因此, 对该区域参考蒸散量和地表水分状况的研究显得尤为重要^[18-19], 可为区域农业生产和水资源利用及管理提供科学指导和建议。

1 研究区概况

江南丘陵地区(25.0~31.2°N, 109.9~119.9°E)通常指我国长江以南、南岭以北、雪峰山以东、武夷山以西广大丘陵地区, 属典型的亚热带季风气候区, 夏季高温多雨, 冬季温和少雨, 年降水量 1 300~1 800 mm, 年均温 16~20 °C。研究区域内水源充足, 湖泊河流众多, 主要有洞庭湖、鄱阳湖、赣江、湘江等(见图 1)。而洞庭湖和鄱阳湖流域是我国南方主要的两个粮食生产区, 粮食作物以水稻和玉米为主。经济作物以甘蔗、柑橘、棉花和茶叶为主。同

时林业和渔业也较发达。

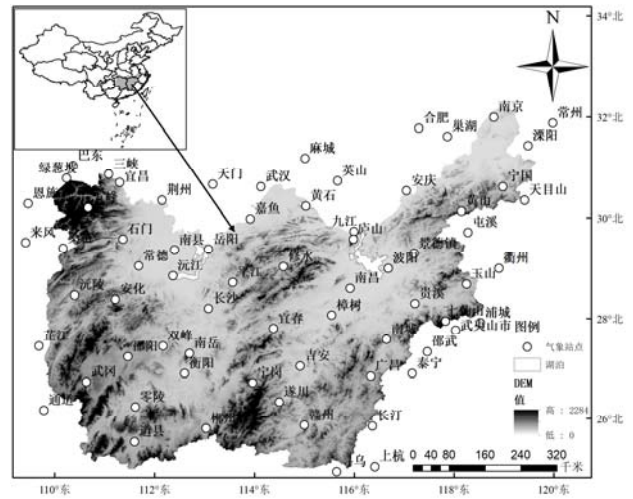


图 1 研究区位置图及气象站点分布

Figure 1 Location map of the study area and distribution of meteorological stations

2 资料和方法

2.1 数据来源

本研究选用的气象资料由国家气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供, 共选择了江南丘陵地区 69 个气象站点(图 1) 1951—2013 年的气象数据, 主要包括降水量、气温、风速、相对湿度和日照百分率等相关气象要素。

2.2 研究方法

2.2.1 参考蒸散量 参考蒸散量的计算方法很多, 主要有 Penman-Monteith 法^[20]、Hargreaves and samani 法^[21]、Thornthwaite 法^[22]和 Makkink 法^[23]等。目前, 国内外使用最多的是 1998 年联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 方程^[20], 本文同样选用了 Penman-Monteith 方程, 此方程在计算参考蒸散量时, 主要涉及的气象要素有降水量、气温、风速、相对湿度和日照百分率等。

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

式中 ET_0 为参考蒸散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), R_n 为地表净辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), U_2 为 2 m 高度处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e_s 为饱和水汽压 (KPa), e_a 为实际水汽压 (KPa), $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差 (KPa), Δ 为水汽压曲线斜率 ($\text{KPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ 为湿度计常数。

2.2.2 水分盈亏量 水分盈亏量是表征地表干湿程度的一个重要指标,通常用同一时期降水量与蒸散量之差表示。

$$K=P-ET \quad (2)$$

式中: K 为水分盈亏量(mm), P 为降水量(mm), ET_0 为参考蒸散量(mm)。当 $K=0$ 时地表水分达到盈亏平衡, $K>0$ 时地表水分出现盈余, $K<0$ 时则地表水分出现亏损。

2.2.3 气候趋势系数 气候趋势系数是研究气候变化趋势的重要参数,体现了气象要素在气候变化中的变化情况^[5]。其值范围为 $[-1,1]$,越接近-1表明下降趋势越显著,越接近1表明上升趋势越显著。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (3)$$

式中 r_{xt} 为气候趋势系数, n 为年数,是第 i 年

要素值,为样本均值,当这个值为正(负)值时,表示该要素在所计算的 n 年内呈现线性增(减)趋势。

3 结果与分析

3.1 参考蒸散量和水分盈亏量的时间变化特征

参考蒸散量表征的是土壤水分亏损状况的重要参数之一,它在某一时间段内的变化在一定程度上反映土壤水分的损失情况。水分盈亏量则受降水量和参考蒸散量的双重影响,其变化不仅是参考蒸散量的反应,很大程度上受降水量的制约,而且影响着地表的干湿状况。开展江南丘陵地区参考蒸散量和水分盈亏量的时间变化特征研究,不仅可以了解63年来研究区的地表干湿状况,而且能更进一步分析其在时间上的变化规律,从而为当地农业生产提供指导和参考^[24]。

表 1 参考蒸散量和水分盈亏量的季节变化

Table 1 Seasonal changes in reference evapotranspiration and water deficit

项目 Item	季节 Season	线性方程 Linear equation	相关系数(R) Correlation coefficient (R)	多年平均值/mm Multi-year average / mm
参考蒸散量/mm Reference evapotranspiration	春	$Y=1.55x-2768.28$	0.610**	301.26
	夏	$Y=0.033x+445.45$	0.008	509.95
	秋	$Y=0.513x-700.71$	0.240*	315.83
	冬	$Y=0.47x-760.35$	0.370*	166.63
水分盈亏量/mm Water deficit	春	$Y=-3.12x+6379.45$	0.490**	222.79
	夏	$Y=1.23x-2416.8$	0.150	26.51
	秋	$Y=-0.88x+1669$	0.160	-80.57
	冬	$Y=-0.26x+545.05$	0.070	26.55

注:表中用**和*分别表示通过0.01和0.05的显著性检验。

Note: ** and * in the table indicate the significance test by 0.01 and 0.05 respectively.

3.1.1 参考蒸散量和水分盈亏量的季节变化 江南丘陵地区63年来参考蒸散量和水分盈亏量的季节变化如表1所示。夏季和冬季的参考蒸散量差别最大,夏季最高,冬季最低,这主要是夏、冬季节日照和气温差异大而所致。从参考蒸散量的线性变化趋势来看,各季节的参考蒸散量随时间变化都呈增加趋势,但春季最为显著,相关系数也最高,苏布达等学者也证实,在全球升温的大背景下,中国大部分地区春季蒸散发增长速率最大,秋季最小^[25]。地表水分盈亏量春季盈余最多,秋季亏损最多,这主要是春季降水充沛,气温低,土壤水分补给量远大于损失量,地表湿润。秋季降水较少,气温高,土壤水分补给少而损失大,地表水分亏损大,地表干燥。故在农耕区的秋季要做好作物的给水工作。从水分盈亏量的线性变化趋势来看,除夏季外,其

它季节的地表水分盈余量都呈现下降趋势,其中春季下降最为显著,其相关系数也最高,这主要是春季参考蒸散量上升显著所致。

3.1.2 参考蒸散量和水分盈亏量的年变化

图2(a)为江南丘陵地区63年来年均参考蒸散量的年际变化。多年平均参考蒸散量为1284mm,其中最高值为1611mm(2013年),表明地表水分蒸散最多;最小值为1081mm(1952年),地表水分蒸散最少。年参考蒸散量以 $28.3\text{ mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率呈波动上升趋势,并通过了0.01的显著性检验($R=0.45$, $N=63$, $P<0.01$),杨永刚等学者也表明近几十年来长江中下游平原参考蒸散量呈上升趋势^[26]。而参考蒸散量的五年滑动平均有增有减,但总体上呈波动上升趋势,并在2001年上升明显,主要是2001年以后太阳辐射量增加,导致气温出现明显的波动上

升, 气温的升高加剧了地表蒸散量。参考蒸散量年累积距平曲线经历了下降、缓慢波动上升、迅速波动下降和迅速上升 4 个阶段 (图 2 (c)), 表明研究区参考蒸散量呈现减-增-剧减-剧增的变化趋势。

图 2 (b) 为江南丘陵地区 63 年来年均水分盈亏量的变化。多年平均水分盈亏量为 220 mm, 其中最低值为-333 mm (2013 年), 地表较干燥; 最高值为 826 mm (1953 年), 地表较湿润。水分盈亏量年变化趋势与参考蒸散量相反, 以 $-36.8 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率呈现下降的趋势, 并通过了 0.05 的显著性检验 ($R=0.25, N=63, P<0.05$)。而水分盈亏量的五

年滑动平均则呈现波动下降趋势, 且受 2001 年参考蒸散量增加的影响, 2001 年五年滑动平均下降明显。水分盈亏量的最低 (高) 值年份和参考蒸散量的最高 (低) 值年份几乎一致, 表明二者具有极好的负相关关系。但是水分盈亏量最高值年份滞后于参考蒸散量最低值年份 1 年, 表明在此期间除参考蒸散量影响外, 在很大程度上降水量制约着水分盈亏量的变化。水分盈亏量的累计距平曲线除极个别时段外, 大体上与参考蒸散量反向同步变化 (图 2 (d))。

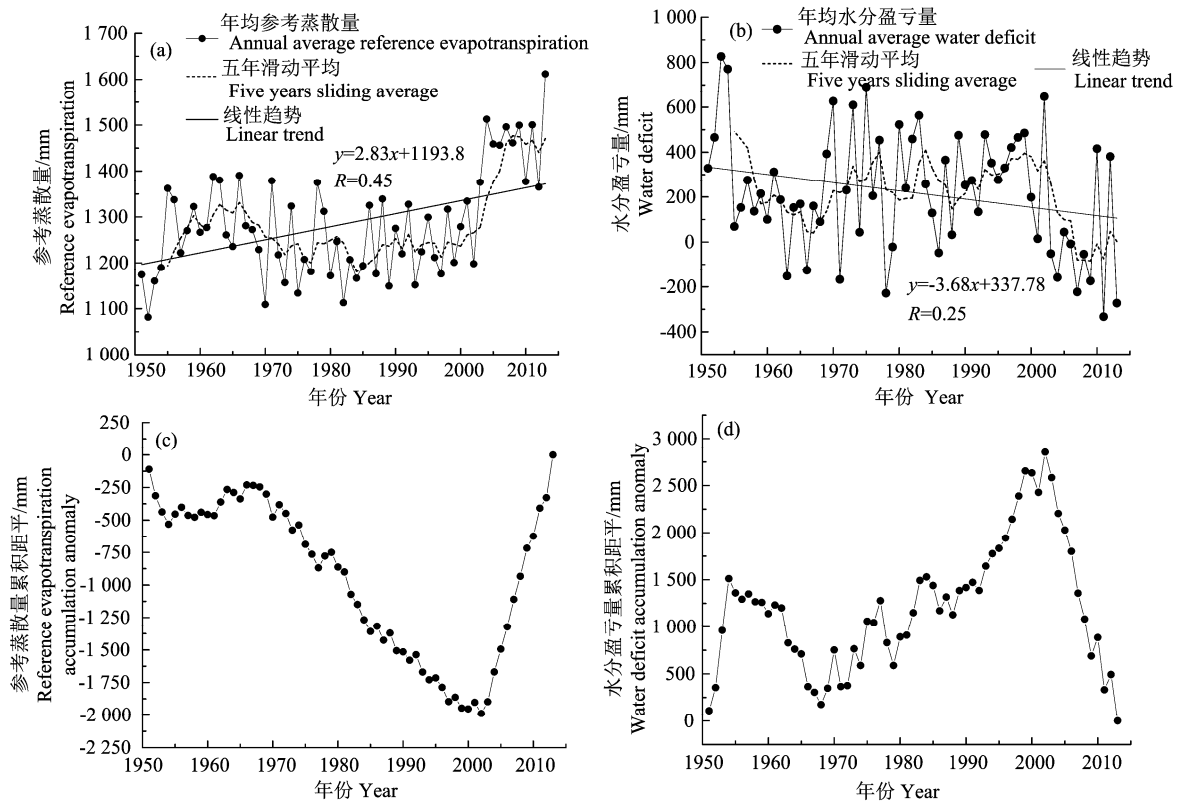


图 2 参考蒸散量和水分盈亏量的年变化及其累积距平

Figure 2 The annual average and seasonal variation and cumulative anomalies of reference evapotranspiration and water deficit

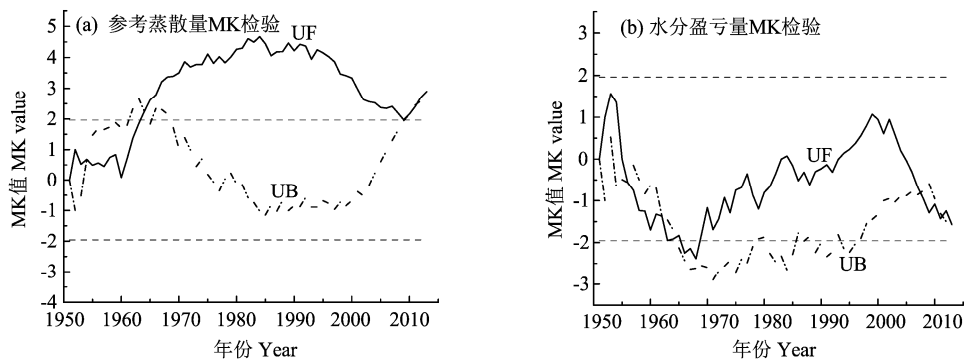


图 3 参考蒸散量和水分盈亏量 MK 检验

Figure 3 MK test of reference evapotranspiration and water deficit

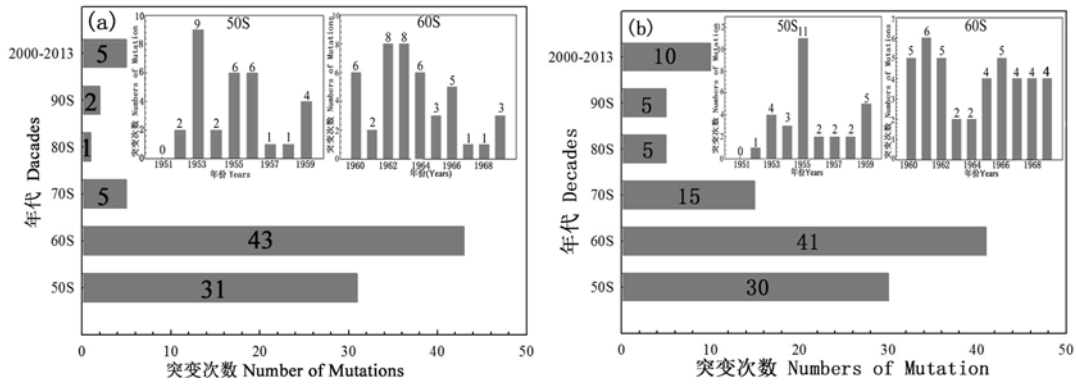


图 4 各气象站点参考蒸散量 and 水分盈亏量突变次数时间分布

Figure 4 Time distribution of mutation numbers of reference evapotranspiration and water deficit at each weather station

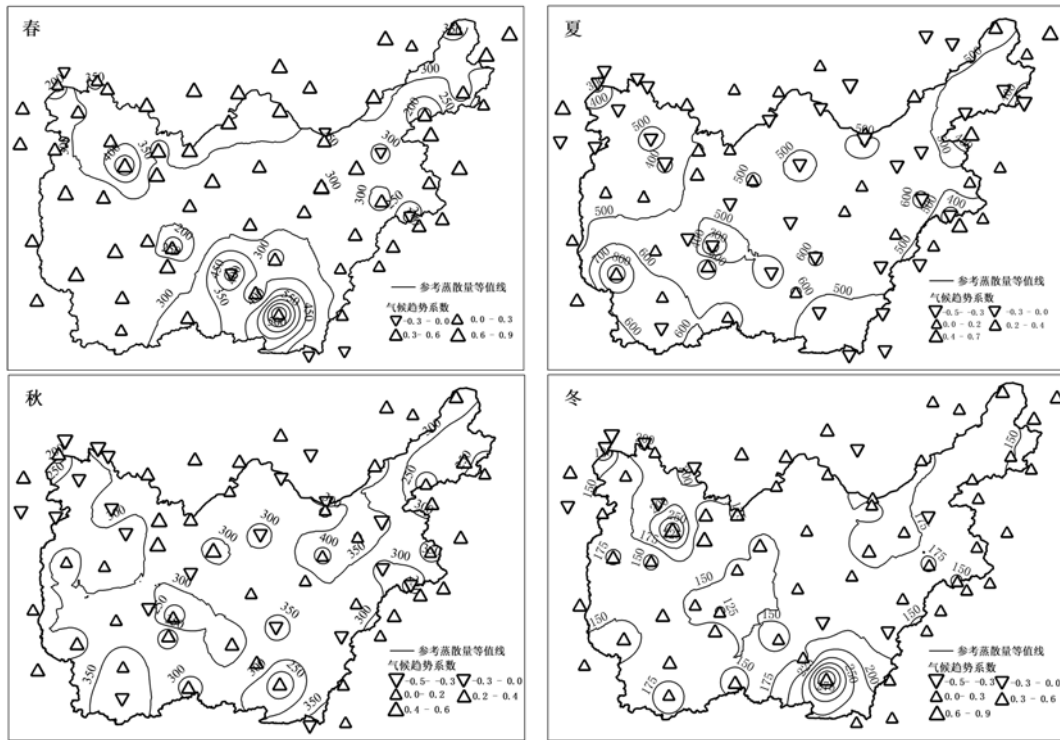


图 5 季节参考蒸散量及其趋势系数空间分布

Figure 5 Spatial distribution of seasonal Reference evapotranspiration and its trend coefficients

3.1.3 参考蒸散量和水分盈亏量的突变性分析 为进一步描述参考蒸散量和水分盈亏量在时间上的变化规律，用 MK 检验方法对 63 年来江南丘陵地区参考蒸散量和水分盈亏量进行了突变分析，时间子序列为 5 年。图 3 为参考蒸散量和水分盈亏量的 MK 检验，UF 为顺序统计曲线（实线），UB 为逆序统计曲线（虚线），并给定显著性水平 $\alpha=0.05$ ，临界线 $U=\pm 1.96$ 。从图 3 中可以看出参考蒸散量的 MK 值在 1954 年存在一个交点，之后 UF 均为正值，表明 1954 年很可能是参考蒸散量由下降到增加的突变点，在这之后参考蒸散量呈现显著的增加趋势。这主要是因为 1954 年左右气温存在一个增加的突

变点，气温升高加速了地表蒸发。水分盈亏量的 MK 值在 1956 年、1962 年和 2007 年左右存在多个交点，而 UF 均为负值，表明 1956 年、1962 年和 2007 年左右很可能是水分盈亏量减少的突变年份，由于降水量在 1955 年、1970 年、2006 年左右存在由增到减的突变点，降水量减少趋势的突变在一定程度上导致了水分盈亏量减少趋势的突变。

图 4 为各个年代参考蒸散量和水分盈亏量发生突变的气象站点数量（部分气象站点可能在多个年代都存在突变）。参考蒸散量存在突变的气象站点共 65 个，占统计站点数的 94.2%（图 4a），表明近 63 年来大部分地区的参考蒸散量都经历过大的波动。

20 世纪 50 和 60 年代发生突变的站点最多, 表明 20 世纪 50 和 60 年代大部分站点的参考蒸散量具有显著敏感性。水分盈亏量存在突变的站点共 68 个, 占统计站点的 98.6% (图 4b)。与参考蒸散量突变站点集中的年代相似, 水分盈亏量突变次数同样在 20 世纪 50 和 60 年代最多, 表明多数站点的水分盈亏

量在 20 世纪 50 和 60 年代也具有较强的敏感性。但和参考蒸散量相比, 水分盈亏量 70 年代以后 (尤其是 21 世纪初) 发生突变的站点明显比参考蒸散量增多, 这是因为 70 年代 (尤其是 21 世纪以后), 降水量发生了多次减少的突变, 在一定程度上加剧了水分盈亏量的突变。

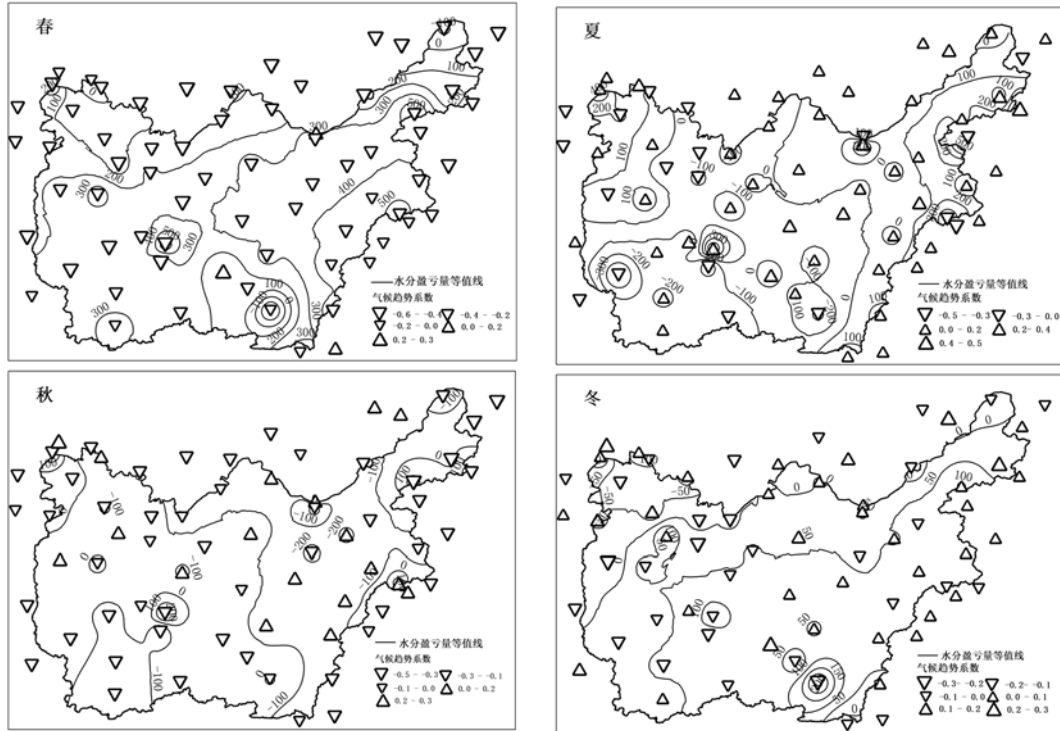


图 6 季节水分盈亏量及其趋势系数空间分布

Figure 6 Spatial distribution of seasonal water deficit and its trend coefficients

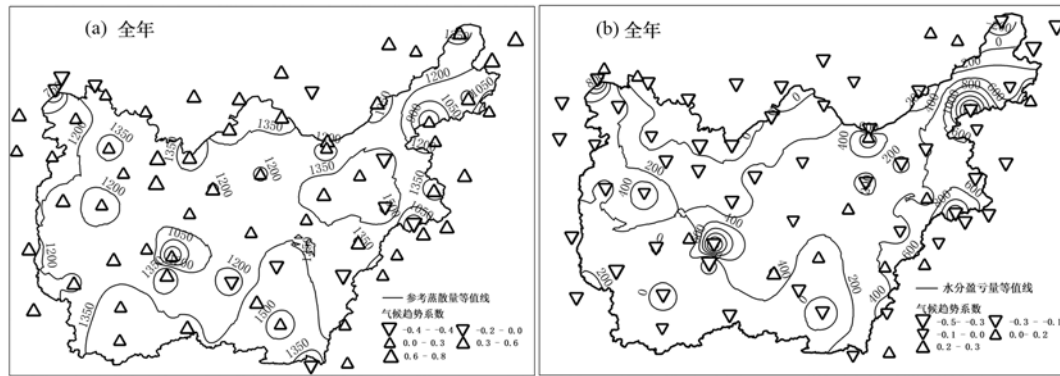


图 7 年均参考蒸散量、水分盈亏量及趋势系数空间分布

Figure 7 Spatial distribution of annual reference evapotranspiration, water deficit and them trend coefficient

3.2 参考蒸散量和水分盈亏量的空间变化特征

江南丘陵地区范围广阔、地势地形复杂、河网水域密布。这种景观差异往往造成气候因子空间分布的差异^[27], 并导致参考蒸散量和水分盈亏量的空间差异。为了进一步探讨地表水分的变化特征, 有必要对参考蒸散量和水分盈亏量的空间分布状况

进行深入分析研究。

3.2.1 季节参考蒸散量及其趋势系数的空间分布

图 5 为江南丘陵地区季节参考蒸散量及其趋势系数的空间分布。春季赣州 (644 mm)、宁冈 (467 mm) 和常德 (450 mm) 附近的参考蒸散量较高, 其趋势系数介于 0.3~0.6, 趋势系数为正值站点占

89.9%，绝大部分地区参考蒸散量呈上升趋势，仅在区域东南部及巴东等极少数地区呈现下降趋势。夏季参考蒸散量由西南向东北呈减少趋势，其趋势系数集中于-0.3~0.0，趋势系数为正值的站点占47.8%，参考蒸散量上升趋势与下降趋势范围大致相当，上升区域主要在东北部和西南部。秋季东部地区参考蒸散量总体高于西部地区，其趋势系数介于0.0~0.4，趋势系数为正值的站点占69.6%，表

明秋季区域参考蒸散量大体为上升趋势。冬季常德（269 mm）和赣州（327 mm）附近参考蒸散量较大，与春季参考蒸散量的空间分布规律类似，其趋势系数集中在0.0~0.3，趋势系数为正值的站点占85.5%，绝大部分地区参考蒸散量呈上升的趋势，而下降趋势的站点主要集中在西北部和东部的少数地区。

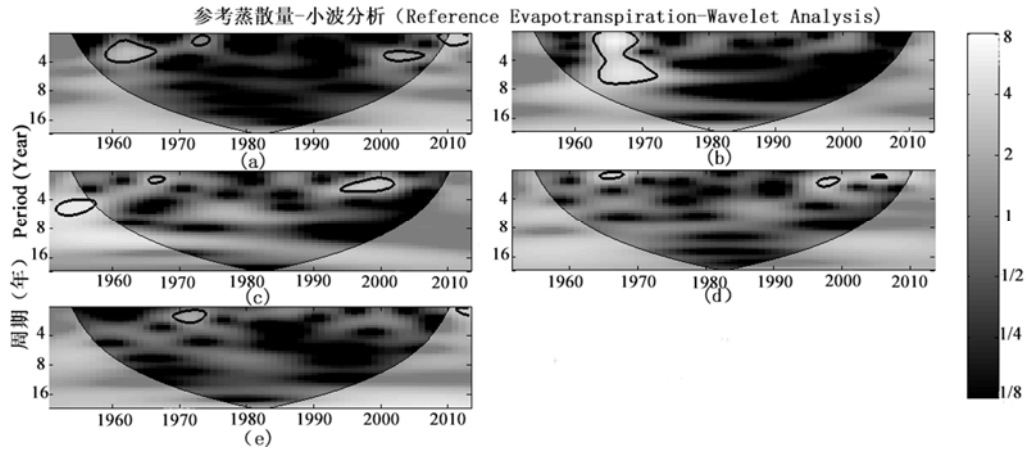


图 8 参考蒸散量连续小波分析

Figure 8 Continuous wavelet analysis of reference evapotranspiration

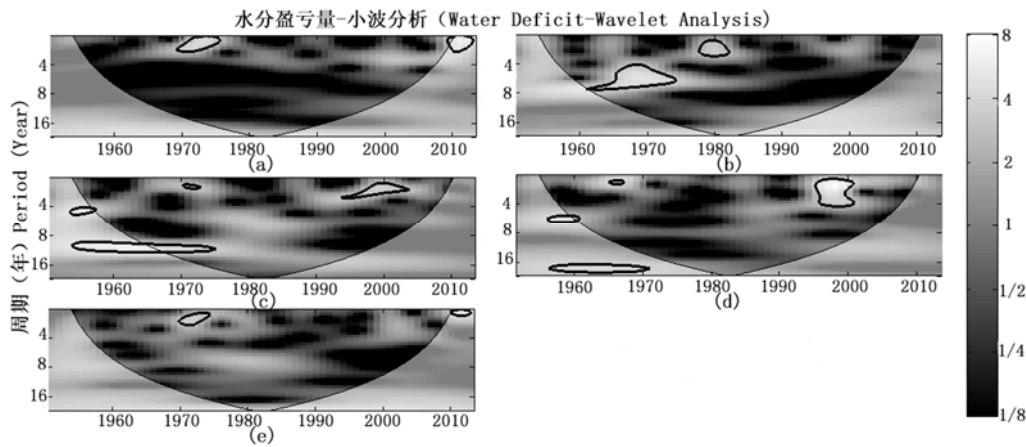


图 9 水分盈亏量连续小波分析

Figure 9 Continuous wavelet analysis of water deficit

3.2.2 季节水分盈亏量及其趋势系数的空间分布

图 6 为江南丘陵地区季节水分盈亏量及其趋势系数的空间分布。从季节上看，春季西北部、东北部及赣州附近的地表水分盈余较少，这主要是春季这些区域参考蒸散量大所致。春季水分盈亏量趋势系数集中在-0.4~-0.2 之间，其趋势系数正值的站点仅占 4.3%，大部分区域水分盈亏量都呈下降趋势。夏季水分盈亏量在区域东北部、西北部和中部南岳附近较高，趋势系数主要在 0.0~0.2 之间，其趋势系

数正值的站点占 72.5%，水分盈亏量表现为大范围上升趋势，但东西部水分盈亏量变化趋势差异较大，东部多表现为上升趋势，而西部则多为下降趋势。秋季与夏季相似，水分盈余量高的区域也主要集中在东北部、西北部和中部南岳附近，但水分盈亏量大范围呈下降趋势，而上升区域零星分布于区域中北部，趋势系数集中在-0.3~0.0 之间，其趋势系数正值的站点仅占 26.1%。冬季地表水分盈余由东南部向西北部逐渐减少，趋势系数集中在-0.1~

0.1, 总体呈上升趋势, 正值的站点略多于负值的站点, 东部多为上升趋势, 西部多为下降趋势。

3.2.3 年均参考蒸散量、水分盈亏量及趋势系数空间分布 从图 7a 可看出, 年均参考蒸散量的空间变化与季节性的变化相似, 但并不完全一致。年均参考蒸散量低值区域和季节参考蒸散量的低值区域基本重合, 但高值区域差异较大。年均参考蒸散量介于 685~1 586mm 之间, 且东部明显高于西部, 这与秋季参考蒸散量空间分布状况基本一致。在绿葱坡 (685mm)、南岳 (712 mm)、黄山 (740 mm)、庐山 (987 mm)、天目山 (716 mm) 和七仙山 (828 mm) 等附近出现了年均参考蒸散量的低值, 低值区域大多位于海拔较高的山区。这主要是因为山区气温低, 相对湿度大, 地表水分蒸发小, 湿润状况良好。江南丘陵地区年均参考蒸散量趋势系数集中在 0.0~0.3, 趋势系数正值的站点占 84.1%, 总体呈上升趋势。趋势系数较大的区域主要在西部、北部 (主要位于湖北省, 这与吕晓蓉等^[28]的研究结论完全吻合) 和东北部, 表明这些区域呈显著上升趋势。

年均水分盈亏量高值区与参考蒸散量的低值区域大致相同 (图 7b)。除极少数区域外, 江南丘陵地区年均地表水分均出现盈余, 尤其在绿葱坡、南岳英山、七仙山和庐山地区水分盈余尤为显著。总体上年均水分盈余量东部多于西部, 这是由于距海的远近导致东、西部水热条件差异增大。而年均水分盈亏量趋势系数集中在-0.3~0.0 之间, 趋势系数正值的站点仅占 20.3%, 且正值的站点零星分布于东部地区。

总体上, 江南丘陵地区的参考蒸散量东部高于西部, 而山区 (黄山、庐山、七仙山等) 的参考蒸散量较小; 参考蒸散量在绝大部分地区呈上升趋势, 只有在七仙山和武夷山等高海拔地区呈缓慢下降趋势。除秋季地表水分盈余量西部略高于东部地区外, 其它季节和年均水分盈亏量都是东部高于西部地区; 水分盈亏量呈上升趋势的范围也是东部地区大于西部地区, 这表明江南丘陵地区东部地表水分状况优于西部。此外, 参考蒸散量低值区和水分盈亏量峰值区基本分布在英山和武夷山等高海拔地区。

3.3 参考蒸散量和水分盈亏量的周期分析

运用连续小波分析来研究江南丘陵地区参考蒸散量和水分盈亏量的周期变化。小波分析的震荡强弱指示参考蒸散量和水分盈亏量变化的平稳程度, 弱震荡表明变化较平稳, 强震荡表明变化较大。江南丘陵地区春季参考蒸散量在 1959—1966 年、1972—1975 年和 2001—2007 年分别存在 1.5~4 年、

1.2~2 年和 2.5~3.7 年的震荡周期, 且都通过了 95% 的红噪声检验。夏季参考蒸散量在 1963—1973 年存在一个 (通过了 95% 红噪声检验) 1~7 年的主震荡周期。秋季参考蒸散量在 1966—1969 年和 1994—2003 年分别存在 (通过了 95% 红噪声检验) 1.2~2 年和 1.2~3.5 年的短周期。冬季参考蒸散量在 1965—1968 年、1997—2000 年和 2005—2008 年分别存在 (通过了 95% 红噪声检验) 1.2~1.7 年、1.2~2 年和 1.2~1.5 年的短周期。年均参考蒸散量的小波分析显示 (图 8), 参考蒸散量在 1968—1974 年存在 (通过了 95% 红噪声检验) 1.2~2 年的震荡短周期, 并且 2011~2013 年的短周期在未来还有持续的趋势。而年均参考蒸散量在 70 到 90 年代末震荡较弱, 表明此期间参考蒸散量变化平稳, 这与图 2a 的参考蒸散量年变化类似。总体而言, 各季节和年均参考蒸散量具有 1.5~5.0 左右的短周期变化。通过对各气象因子的小波分析 (图略), 发现参考蒸散量的周期变化和相对湿度的周期变化最为同步, 表明参考蒸散量的周期变化主要是相对湿度的短周期震荡导致的。

江南丘陵地区地表水分盈亏量也存在周期特征 (图 9)。春季水分盈亏量在 1969—1976 年存在一个 (通过了 95% 红噪声检验) 1~2 年的主震荡短周期。夏季水分盈亏量在 1961—1974 年和 1978—1982 年分别存在 4.2~7.8 年的主震荡周期和 1.5~3.5 年的短震荡周期, 且都通过了 95% 的红噪声检验。秋季水分盈亏量存在多个震荡周期, 如 1.8~2 年、10~12 年和 1.5~3.5 年的震荡周期分别出现在 1970—1973 年、1965—1976 年和 1994—2004 年, 且都通过 95% 的红噪声检验。冬季水分盈亏量在 1966—1968 年和 1995—2001 年分别存在 (通过 95% 的红噪声检验) 1.2~1.8 年和 1.2~5 年的长短不等的震荡周期。年均水分盈亏量在 1969—1974 年 (通过了 95% 红噪声检验) 则存在 1.2~2.0 年的主震荡周期。年均水分盈亏量在 90 年代震荡最弱, 表明 90 年代水分盈亏量变化最平稳, 这与图 2b 水分盈亏量年变化类似。总体而言, 江南地区水分盈亏量与参考蒸散量周期变化相似, 多为 1.5~3.5 年左右的短震荡周期。通过对各气象因子的小波分析 (图略), 水分盈亏量的周期变化和降水量的周期变化较为同步, 表明影响水分盈亏量周期变化特征的主要原因是降水量的周期变化。

4 结论

1951—2013 年江南丘陵地区参考蒸散量呈现

减-增-剧减-剧增的变化特征,但总体呈现缓慢上升趋势。参考蒸散量夏季最高,冬季最低,而春季的增加趋势最为显著。参考蒸散量在1954年出现由下降到上升的突变点,94.2%的气象站点的参考蒸散量在过去63年发生过突变,且发生突变的年代都集中于20世纪50和60年代。

1951—2013年水分盈亏量呈现增-减-增-减的变化特征,总体呈现波动下降趋势。地表水分盈余量春季最多,亏损量秋季最多,但春季水分盈亏量下降尤为显著。水分盈亏量分别在1956年、1962年和2007年出现了由增到减的突变点,98.6%的气象站点的水分盈亏量在过去63年发生过突变,与参考蒸散量的突变年代相似,水分盈亏量发生突变的年代也集中在20世纪50和60年代,但是与参考蒸散量突变年份相比,水分盈亏量70年代以后(尤其是21世纪初期)发生突变的站点明显更多。

江南丘陵地区东部的参考蒸散量高于西部,且大部分地区呈现上升趋势,只有少数高海拔山区较小,并呈现缓慢下降趋势。水分盈亏量大的区域几乎都出现在高海拔地区,而在空间上地表水分盈亏量东部优于西部,东部比西部呈上升趋势的区域更广。江南丘陵地区参考蒸散量和水分盈亏量分别受相对湿度和降水量的周期变化影响,多呈现短周期震荡;但水分盈亏量在秋季还存在中长周期震荡。

参考文献:

- [1] 张淑兰,张海军,王彦辉,等. 泾河流域上游景观尺度植被类型对水文过程的影响[J]. 地理科学, 2015, 35(2): 231-237.
- [2] YANG Q, MA Z G, ZHENG Z Y, et al. Sensitivity of potential evapotranspiration estimation to the Thornthwaite and Penman-Monteith methods in the study of global drylands[J]. *Adv Atmos Sci*, 2017, 34(12): 1381-1394.
- [3] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [4] 张淑杰,张玉书,陈鹏狮,等. 东北地区湿润指数及其干湿界线的变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 226-232.
- [5] 张淑杰,张玉书,隋东,等. 东北地区参考蒸散量的变化特征及其成因分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1750-1761.
- [6] 韩项,尹云鹤,吴绍洪,等. 汾沁地区蒸散模拟及其时空变化特征[J]. 资源科学, 2018, 40(8): 1658-1671.
- [7] LI C, WANG R H. Recent changes of precipitation in Gansu, Northwest China: An index-based analysis[J]. *Theor Appl Climatol*, 2017, 129(1/2): 397-412.
- [8] 王建兵,王素萍,汪治桂. 1971-2010年若尔盖湿地潜在蒸散量及地表湿润度的变化趋势[J]. 地理科学, 2016, 35(2): 245-250.
- [9] 张克新,潘少明,曹立国,等. 横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1869-1877.
- [10] 邵晓梅,许月卿,严昌荣,等. 黄河流域气候水分盈亏时空格局分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(1): 74-80.
- [11] 徐冬平,卜金洋,杨军辉,等. 黄河流域水分盈亏量时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 739-746.
- [12] 王琼,张明军,潘淑坤,等. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1292-1302.
- [13] 裴超重,钱开铸,吕京京,等. 长江源区蒸散量变化规律及其影响因素[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 362-368.
- [14] 黄会平,曹明明,宋进喜,等. 1957-2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 315-326.
- [15] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956-2000年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378-387.
- [16] 吴霞,王培娟,霍治国,等. 1961-2015年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 964-977.
- [17] 杨永刚,崔宁博,胡笑涛,等. 中国三大灌区参考作物蒸散量温度法模型的修订与适应性评价[J]. 中国农业气象, 2018, 39(6): 357-369.
- [18] 胡振鹏,林玉茹. 气候变化对鄱阳湖流域干旱灾害影响及其对策[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(7): 897-904.
- [19] 李景保,代勇,尹辉,等. 1950-2009年洞庭湖流域农业旱灾演变特征及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1391-1398.
- [20] ALLEN R G, PERREIRA L S, RAES D. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: 1998.
- [21] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. *Appl Eng Agric*, 1985, 1(2): 96-99.
- [22] PEREIRA A R, PRUITT W O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration[J]. *Agr Water Manage*, 2004, 66(3): 251-257.
- [23] MAKKINK G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters[J]. *J Inst Water Eng*, 1957, 11: 277-288.
- [24] 刘燕,刘友存,边晓辉,等. 江南丘陵地区湿润指数变化特征及敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 263-271.
- [25] 苏布达,周建,王艳君,等. 全球升温1.5℃和2.0℃情景下中国实际蒸散发时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2018, 39(5): 293-303.
- [26] 杨永刚,崔宁博,胡笑涛,等. 中国粮食主产区参考作物蒸散量演变特征与成因分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(4): 245-255.
- [27] 边晓辉,刘友存,王杰,等. 赣江上游太平江流域景观格局演变及驱动因素分析[J]. 江西理工大学学报, 2019, 40(1): 54-61.
- [28] 吕晓蓉,王学雷. 湖北省潜在蒸散量的时空变化及其影响因子分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2016, 50(5): 764-769.