

DOI: 10.5846/stxb201312022869

王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 刘宪锋. 华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析. 生态学报, 2014, 34(19): 5589-5599.

Wang P T, Yan J P, Jiang C, Liu X F. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in the North China Plain. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5589-5599.

华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析

王鹏涛¹, 延军平^{1,*}, 蒋冲^{2,3}, 刘宪锋⁴

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710019;

2. 北京师范大学全球变化与地球科学研究院地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 4. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要: 根据华北平原 56 个气象站 1960—2012 年逐日气象数据和 Penman-Monteith 模型计算了各站及区域整体参考作物蒸散量 (ET_0), 利用样条插值法、气候倾向率、累积距平、敏感性系数等方法对华北平原 ET_0 的时空变化及其影响因素进行了分析。结果表明: (1) 华北平原多年平均 ET_0 为 1071.37mm, 空间上呈现高低值相间分布格局, 高值中心分布在冀北、鲁中、豫西, 而低值中心分布在冀东、鲁南、豫东及豫南等地; (2) 近 53 年 ET_0 呈减少趋势 (-12.8mm/10a), 山东半岛北部及冀北等地有缓慢增加趋势, 其余地区以减少为主; (3) ET_0 对气温、平均风速、日照时数为正敏感, 而对相对湿度为负敏感。平均气温与日照时数敏感系数呈现下降趋势, 相对湿度与风速敏感系数表现出上升趋势。 ET_0 对气温和风速敏感度高的区域同时对日照时数和相对湿度敏感度较低; (4) 归因分析表明, 华北平原 ET_0 的主导因子是日照时数, 平均风速次之, 相对湿度、最高温度、最低温度对 ET_0 变化影响较小, 日照时数主导区域包括冀北、坝上地区、冀中、豫西、豫南、鲁中及鲁西北, 平均风速的主导区域为冀南、河南黄河以北、豫中、鲁西北, 温度主导区域零星分布于冀北、豫西、山东半岛等地, 相对湿度的主导区域主要分布在鲁南、山东半岛。

关键词: 华北平原; 参考作物蒸散量; Penman-Monteith 公式; 敏感系数

Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration and its influencing factors in the North China Plain

WANG Pengtao¹, YAN Junping^{1,*}, JIANG Chong^{2,3}, LIU Xianfeng⁴

1 College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Shaanxi 710019, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

4 College of Resource Science & Technology, Beijing 100875, China

Abstract: Potential evapotranspiration is the theoretical upper limit value of actual evapotranspiration, which constitutes the important parameters for the research of regional thermal balance, water budget, water resources assessment and crop water requirements. Study on regional response of potential evapotranspiration to global climatic changes in China has significance in global hydrological cycling, energy balance and eco-environmental evolution research. Reference crop evapotranspiration (ET_0) as a common parameter is largely an evolution of definition of potential evapotranspiration and with the method of Penman-Monteith Model recommended by Food and Agriculture Organization for computing crop water requirements in 1998, reference crop evapotranspiration could be estimated quickly and accurately. Based on the daily observation data of the 56 meteorological stations in the North China Plain from 1960 to 2012, reference crop evapotranspiration were calculated, then the spatial-temporal variation patterns of reference crop evapotranspiration over North China Plain was

基金项目: 国家自然科学基金(41171090)

收稿日期: 2013-12-02; 修订日期: 2014-07-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanjp@snnu.edu.cn

analyzed with the methods of linear regression, spline interpolation and accumulative anomaly method. In the meantime, the dominant factors of the ET_0 's variations in North China Plain were quantitatively analyzed by calculating sensitivity coefficients of reference crop evapotranspiration to climate elements and the relative change of the climate elements. The result showed that: (1) Annual reference crop evapotranspiration of north China plain was 1071.37mm and the spatial distribution pattern was high center alternating with low center. The high value reference crop evapotranspiration areas mainly distributed in the northern Hebei, central part of Shandong mountainous region and western regions of Henan, while the low value centers distributed in the eastern regions of Hebei, southern Shandong, eastern and southern regions of Henan province. (2) The reference crop evapotranspiration has decreased obviously in North China Plain during the last 53 years by the rate of 12.8mm/10a, and its decadal variation showed that the decade anomaly consistently decreased. From the perspective of the regional distribution of ET_0 change, the ET_0 of the northern Shandong Peninsular and the northern regions of Hebei province showed a slowly increasing trend, while the ET_0 of the rest areas decreased. (3) The sensitivity coefficients of reference crop evapotranspiration to the daily temperature (S_{AT}), sunshine hours (S_{SH}), wind speed (S_{WS}) were positive values, while the sensitivities coefficients of reference crop evapotranspiration increased slowly, while S_{RH} and S_{WS} decreased. There was a corresponding relationship for the sensitivity coefficients of reference crop evapotranspiration, which meant areas of high sensitivity to temperature and wind speed had relative low sensitivity to sunshine hour and the relative humidity. (4) The dominant factors of ET_0 in North China Plain were as follows; sunshine hours and wind speed were the dominant factors caused change of ET_0 in North China Plain, while relative humidity, daily maximum temperature and minimum temperature contributed less to the change of ET_0 . Sunshine hours was the determining factor in the change of ET_0 in many regions of the northern and the central regions of Hebei province, Bashang District of Hebei Province, the southern and western region of Henan province and the central regions of Shandong province. The regions affected by wind speed expanded across the Southern region of Hebei province, southern Henan Province and the north of the Yellow River in Henan Province, the central regions of Henan province, northwestern regions of Shandong province. The meteorological stations affected by temperature scattered in the west of northern Henan Province, western region of Henan province and Shandong peninsula, while relative humidity only had significant influence on the ET_0 of the southern regions of Shandong province and Shandong peninsula.

Key Words: North China Plain; reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith; sensitivity analysis

全球变暖已成为不争的事实,第四次 IPCC 报告指出 1906—2005 年全球平均升温幅度为 $(0.74 \pm 0.18)^\circ\text{C}$,这一数值大于第三次评估报告给出的 1901—2000 年全球平均升温幅度 $(0.6 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ ^[1],全球变暖背景下的区域气候系统的响应研究已成为热点问题^[2-5]。潜在蒸散量是实际蒸散的理论上限,是区域水热平衡的重要指标,也是水资源规划中的必要参量。全球变暖促使地表蒸散速率的加快,从而加快水循环,并最终导致水资源的再分配,因此在气候变暖背景下研究潜在蒸散量的时空变化及其影响因素就显得尤为重要^[6-8]。近年来全球潜在蒸散量普遍减少,这一现象受到国内外学者的广泛关注^[6-14]。Jensen 等^[15]考虑到作物特性对估算潜在蒸散量影响,在潜在蒸散量的基础上提出参考作物蒸散量的概念。1977 年世界粮农组织(FAO)对参

考作物进行了进一步的规定,明确定义了参考作物蒸散量(ET_0)的概念^[16]。1998 年 FAO 提出修订 Penman-Monteith 公式^[17],用以计算参考作物蒸散量。国内学者利用该公式对中国全境^[6-9],中国北方^[10],海河流域^[11]、西北五省^[18]、江河源区^[19]、秦岭南北^[20]、黄土高原^[21]、渭河流域^[22]、黑河流域^[23]、长江流域^[24]等地 ET_0 的变化趋势进行了深入研究,发现我国 ET_0 存在普遍下降趋势,受 ET_0 影响的有关研究包括气候干湿状况^[25],水分盈亏^[26]及“蒸发悖论”现象^[27-28]也在进行。需要指出的是,“蒸发悖论”这一现象的成因仍存在较大争议,还有较大的不确定性^[6,27-28]。因此在气候变暖背景下,研究 ET_0 的区域差异与时空变化,分析气象要素对其影响以及归因显得尤为重要^[6]。

华北平原是我国的政治、经济和文化中心,也是我国的粮食主产区,水资源短缺是制约这一地区农业生产提升的主要因素。谭方颖等^[29]和延军平等^[30]研究表明,气温升高和降水的剧烈波动使得这一地区的干旱化趋势有所加剧;郭军等^[31]、刘园等^[32]、马洁华等^[33]、莫兴国等^[34]分别利用气象和遥感数据对华北平原 ET_0 的变化进行了研究,指出该区 ET_0 存在显著下降趋势。郭军等^[31]认为造成 ET_0 减小的直接原因可能是日照时数和太阳辐射的减少。谢贤群等^[10]认为太阳辐射等下降对 ET_0 减少的贡献达到 78% 左右。刘园等^[32]认为日照时数因子的变化可以解释 50% 以上的太阳辐射变化,华北平原 ET_0 减少主要受日照时数影响。Thomas^[9]认为该区 35°N 以北主要受日照时数影响,其余地区则主要受相对湿度影响。目前,华北平原蒸散量变化的主导因子还不明确。另外,定量辨识不同气候要素对华北平原地区 ET_0 变化的贡献率大小的研究并不多见。基于此,本文利用 Penman-Monteith 公式和华北平原 56 个气象站 1960—2012 年逐日观测数据计算了该区 ET_0 序列,并运用线性趋势、累积距平、GIS 空间插值、敏感性系数和相关分析法分析了 ET_0 的时空变化特征,各气象因素的敏感系数和各气候要素对 ET_0 的贡献率,试图对华北平原潜在蒸散量进行归因分析,以期对这一地区的区域水资源规划以及农业生产布局等工作提供一些参考依据。

1 研究区域

华北平原又名黄淮海平原,地理位置介于 32°N—43°N 和 113°E—123°E 之间,在行政范围上包括北京、天津、河北、河南、山东等 5 个省(直辖市),总面积 $53.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。华北平原由黄河、淮河、海河等河流冲积而成,地势低平,自西向东倾斜^[5]。该区地处我国东部季风区,冬季寒冷干燥、夏季高温多雨,雨热同期,年降水量在 600—800mm,降水的季节分配不均匀,主要集中在夏季。

2 数据来源与研究方法

2.1 资料来源与处理

研究所用气象资料来自中国气象数据共享服务网提供的(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的《中国地面气候资料日值数据集》,选取 1960—2012 年时间连

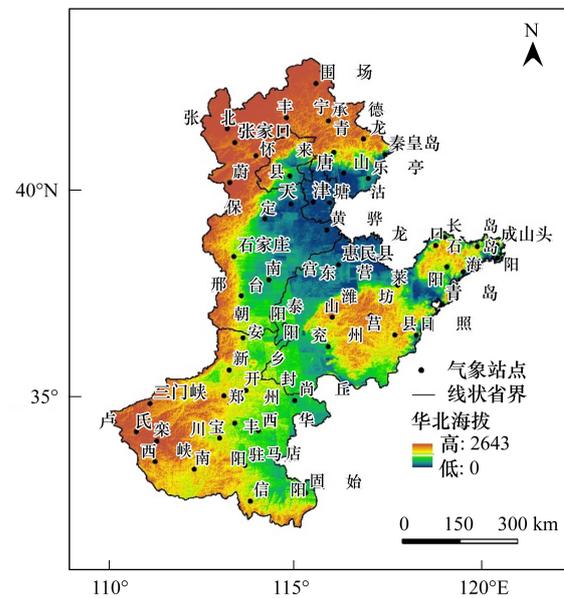


图 1 华北平原范围及气象站点分布图

Fig.1 Study area and distribution of meteorological stations

续性较好的 56 个国家气象观测台站的逐日最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照时数、气压等指标计算逐日 ET_0 。季节的划分采用气象学标准,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—次年 2 月为冬季。对于少数站点个别时段缺测数据采用线性回归法插补。

2.2 研究方法

2.2.1 参考作物蒸散(ET_0)计算公式

世界粮农组织(FAO)将参考作物蒸散(ET_0)定义为“假设作物高度为 0.12m,冠层阻力和反照率分别为 70m/s 和 0.23 的参考冠层的蒸散,相当于生长旺盛,长势一致,完全覆盖地面且水分供应充足的开阔绿色草地的蒸散^[16,35]。1998 年修订的 Penman-Monteith 公式无论在干旱还是湿润区的估算值与实测作物需水量值都最为接近,适合于我国地表潜在蒸散量研究,因此得到学者们的广泛应用^[18-24],具体计算方法:

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

式中, ET_0 代表站点参考作物蒸散量(mm/d), R_n 为净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), G 为土壤热通量密度($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), T 为 2m 高处日平均气温($^{\circ}\text{C}$),由日最高气温和最低气温平均值计算得到, U_2 为 2m 高处风速

(m/s), e_s 为饱和水汽压 (kPa), Δ 为饱和水汽压斜率 (kPa/°C), γ 为干湿表常数, 气温、湿度、风速观测资料的处理及订正方法见参考文献^[27]。 R_n 是太阳总辐射 R_s 的函数, $R_n = f(R_s)$ ^[8], R_s 计算方法:

$$R_s = (a_s + b_s \frac{S}{N}) R_a \quad (2)$$

式中, R_a 为大气顶层太阳辐射 (W/m^2), S 为日照时数, N 为最大可照时数, a_s 和 b_s 为线性参数, 本文中取 $a_s = 0.25$, $b_s = 0.5$ ^[11,17]。

2.2.2 气象因子的敏感性分析

敏感系数由 McCuen^[36] 首先提出, 利用 ET_0 对各气候因子的偏导数, 即 ET_0 的相对变化量与单个气象因子相对变化量之比计算, 具体计算方法:

$$Sv_i = \lim_{\Delta v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0}{\Delta v_i} \cdot \frac{ET_0}{v_i} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial v_i} \cdot \frac{v_i}{ET_0} \quad (3)$$

式中, v_i 代表气象因子, Sv_i 代表相应气象因子的敏感系数。将气象因子对 ET_0 的变化无量纲化, 使得比较 ET_0 对单个气象因子的敏感性变得简单可行^[37]。气候因子的敏感系数已成为判断气候因子对 ET_0 扰动的有效方法, 并得到广泛应用^[37-41]。敏感系数的正负反映了 ET_0 与气象因子的相关性, 敏感系数为正表明气候因子与 ET_0 呈正相关; 敏感系数为负则表明气候因子与 ET_0 呈负相关。绝对值的大小则反映了气象因子对 ET_0 的影响大小, 绝对值越大, 气候因子对 ET_0 的影响也越大^[38]。为研究方便, 本文将日最高气温、日最低气温、平均气温、相对湿度、风速和日照时数分别简写为 HT, LT, AT, RH, WS, SH, 则各气象因子的敏感系数分别表示为 S_{HT} , S_{LT} , S_{AT} , S_{RH} , S_{WS} , S_{SH} 。

Yin 等^[6] 认为气候因子的相对变化 (R_{vi}) 与其敏感系数 (S_{vi}) 的乘积可表示该气候因子变化对 ET_0 变化的贡献量 (G_{vi}), 贡献量最大的气象要素可以归因为站点 ET_0 变化的主导因子, 计算公式:

$$G_{vi} = \frac{\Delta v_i}{v_i} \cdot S_{vi} \quad (4)$$

式中, Δv_i 代表研究时段气候因子的相对变化, v_i 代表气候因子的平均值的绝对值^[6,18,23]。

3 结果与分析

3.1 参考作物蒸散量的空间分布特征

华北平原 ET_0 的多年平均值为 1071.37mm。由

图 2 可知, 区域内存在 3 个明显的高值区和 3 个低值区, 其中冀北、鲁中和豫西地区为高值区, 站点张北、济南、泰山相对较高, 年 ET_0 均达到了 1250mm 以上, 其余等地相对较低, 以冀东、鲁南、豫东及豫南为代表, 鲁南的日照, 莒县及冀东的遵化和秦皇岛等站 ET_0 普遍未超过 990mm。

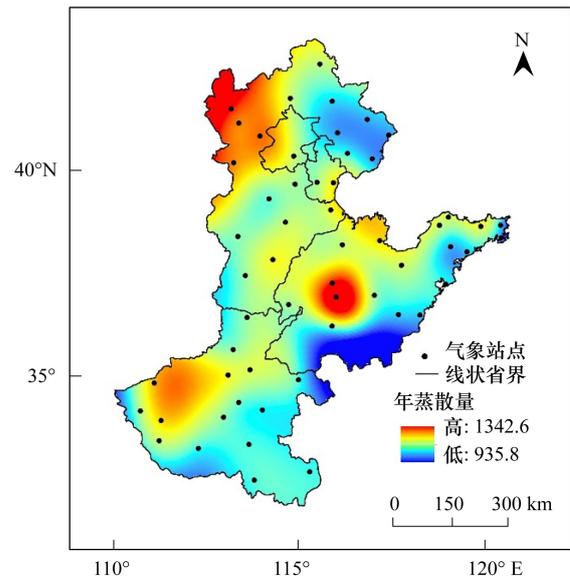


图 2 年 ET_0 的空间分布

Fig.2 Spatial distributions of annual ET_0

四季 ET_0 空间分布与年 ET_0 高低值的分布格局基本一致 (图略)。春季, 山东丘陵的高值区域较常年 ET_0 分布更广泛, 鲁中地区与山东半岛交界均为高值区; 夏季 ET_0 的高值现象仅出现在鲁中地区; 秋季、冬季与年 ET_0 分布格局的差异表现在秋、冬两季豫中成为区域的又一个低值中心, 而豫南和豫东成为高值区。表 1 为华北平原与各省季节 ET_0 变化统计。全区 ET_0 的年内变化则较为明显, 夏季贡献最大, 占到全年的 39%, 春季、秋季和冬季则分别占全年的 31%、20% 和 10%。各省份横向比较, 年和四季尺度 ET_0 的差异不大, 年 ET_0 以天津最多, 河南最少; 春季 ET_0 以北京最大, 河南最小; 夏季 ET_0 天津最大, 河南较小; 秋季的最大值和最小值分别出现在山东和河北; 冬季 ET_0 最大值出现在河南, 最小值出现在河北。

3.2 参考作物蒸散量的时空变化特征

近 53 年来, 华北地区 ET_0 呈下降趋势, 下降速率为 12.8mm/10a, 全区 ET_0 在 60—80 年代初期呈上升趋势, 1982 年以后呈下降趋势 (图 3)。

表 1 各省份季节 ET_0 统计
Table 1 Statistics of seasonal ET_0 in different provinces

地区 Region	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年 Annual
北京	358.31	420.33	204.86	106.19	1089.50
河北	349.01	433.96	201.54	89.08	1073.71
河南	318.75	420.53	209.67	116.43	1065.65
山东	325.34	399.01	233.21	111.58	1069.38
天津	353.57	430.53	221.35	97.70	1103.27
华北	333.08	418.60	214.74	104.72	1071.37
季节 ET_0 贡献 Contribution of seasonal $ET_0/\%$	31.1	39.1	20.0	9.7	100

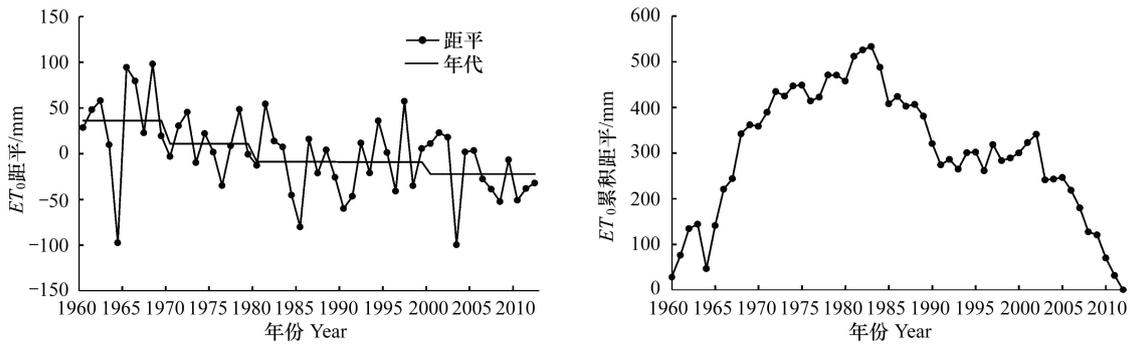


图 3 ET_0 距平和累积距平曲线
Fig.3 Anomaly and accumulative anomaly of annual ET_0

年代际变化上, ET_0 各年代距平值持续降低。20 世纪 60 年代及四季均为正距平, 说明这 10a 为 ET_0 最大的 10a; 70 年代除冬季为负距平外, 其余各季和年尺度均为正距平; 1980 年之后, 各年代的距平均有所减少, 1980—2012 年间, 除 90 年代秋季与 2000—2010 年春季为正距平外, 其余年代的距平均为负距

平。2000—2012 年负距平达到最大, 说明该时段为 ET_0 最小的 10a。春季距平的最高值和最低值分别位于 60 年代和 90 年代, 夏季的最值分别位于 60 年代和 2000—2010 年, 秋季最值为 70 年代和 2000—2010 年, 冬季为 60 年和 80 年代。从年代距平可以看出, 夏季和全年 ET_0 的年代际变化较为一致。

表 2 年度和季节 ET_0 的年代际距平
Table 2 Decadal anomalies of annual and seasonal ET_0

年代 Decades	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年平均 Annual
1960—1969	3.83	26.75	1.04	4.08	36.17
1970—1979	2.56	4.32	4.02	-0.25	10.90
1980—1989	-2.77	-2.97	-0.71	-4.37	-8.97
1990—1999	-11.77	-4.28	4.99	3.26	-9.18
2000—2012	6.66	-18.32	-7.18	-2.27	-22.25

图 4 为年和各季 ET_0 变化倾向率的空间分布。年尺度上, 区域内有 9 个站 (16.1%) ET_0 呈现缓慢的增加趋势, 其中 4 个站变化趋势达到显著水平, 仅威海增速超过 20mm/10a, 增加区域分布于山东半岛北部及冀北。豫北、冀南及山东丘陵地区均为明显的 ET_0 减少区。季节尺度上, 春、秋、冬的变化趋势较为

一致。春季, ET_0 增加站点达到 23 个 (41.1%), 显著增加的站点达到 12 个; 秋季 ET_0 呈增加趋势的站点为 14 个 (25%), 鲁西北部增加趋势显著 6 个, 显著增加的站点均分布在该区; 冬季 ET_0 增加站点为 19 个 (33.9%), 鲁西北和冀南的增加区域较大, 12 个显著变化的站点在两地也均有分布; 夏季 ET_0 的变化趋

势与年尺度相当, ET_0 增加站点仅为 4 个 (7.1%), 且均未达到显著水平。年尺度上表现出 ET_0 增加的站点 (日照、栾川、丰宁、蔚县、北京、莱阳、龙口、海阳、威海) 在春、秋、冬三季均有明显的增加趋势。夏季

ET_0 对全年贡献量达到 39%, 大部分地区年 ET_0 仍然呈现减少趋势, 这与郭军等^[31] 利用小型蒸发皿及高歌等^[7] 研究全国潜在蒸散量得到的结果基本一致。

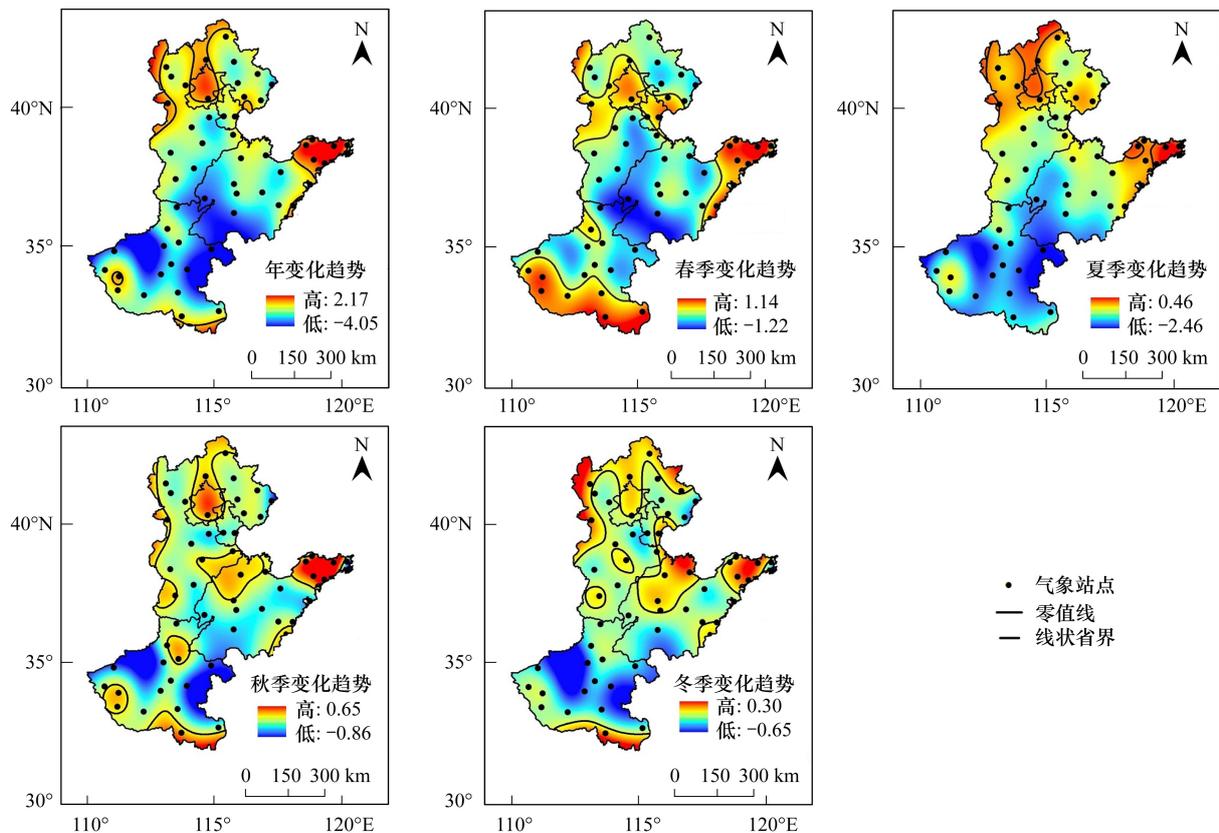


图 4 年度和季节 ET_0 变化趋势的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of annual and seasonal ET_0 change trends

3.3 参考作物蒸散量对气象因子的敏感性分析

3.3.1 敏感系数的时间变化

如图 5 所示, 各气候因子对 ET_0 的敏感系数都存在一定的波动变化趋势。 S_{AT} , S_{SH} 和 S_{WS} 为正值, 表明 ET_0 随气温、平均风速和日照时数增加而增加, ET_0 仅对相对湿度为负敏感。通过比较 4 个气候要素敏感系数的绝对值 (相对湿度 > 日照时数 > 平均温度 > 平均风速), 说明 ET_0 对相对湿度最敏感, 对风速敏感性较低。从年际变化来看, 敏感系数 S_{AT} , S_{SH} , S_{WS} , S_{RH} 年际变化的方差分别为 2×10^{-4} , 1×10^{-4} , 2×10^{-4} , 5×10^{-3} , 表明全区各气象要素的敏感系数的离散程度均比较小, 年际变化不大。从年尺度上看, S_{AT} 与 S_{SH} 呈现缓慢的下降趋势, S_{RH} 与 S_{WS} 呈现上升趋势, 敏感系数线性变化趋势分别为 $-0.0004/10a$,

$-0.005/10a$, $0.005/10a$ 和 $0.027/10a$, 其中 S_{WS} 与 S_{RH} 的线性倾向率较大, 表明 ET_0 对平均风速的正敏感性逐渐增强, 而对相对湿度的负敏感性有所减弱。

3.3.2 敏感系数的空间变化

ET_0 对各气象因素的敏感系数空间分布如图 6 所示, S_{AT} , S_{WS} 和 S_{SH} 为正值的站点分别占到站点总数的 98%, 98% 和 100%, S_{RH} 为负值的站点则占到 100%, 进一步表明 ET_0 对气温、平均风速和日照时数为正敏感, 对相对湿度为负敏感。从空间分布上看, S_{AT} 和 S_{WS} 的空间分布均表现为冀北、豫西和鲁中 3 个低值中心, 冀南及鲁西北交界区和鲁南两个高值区的分布格局, 表明这些区域是 ET_0 对气温及风速敏感区, 其他区域次之; 河北坝上地区和冀北一直向南到豫西一带均为敏感系数 S_{RH} 的高值区, 鲁中地区的

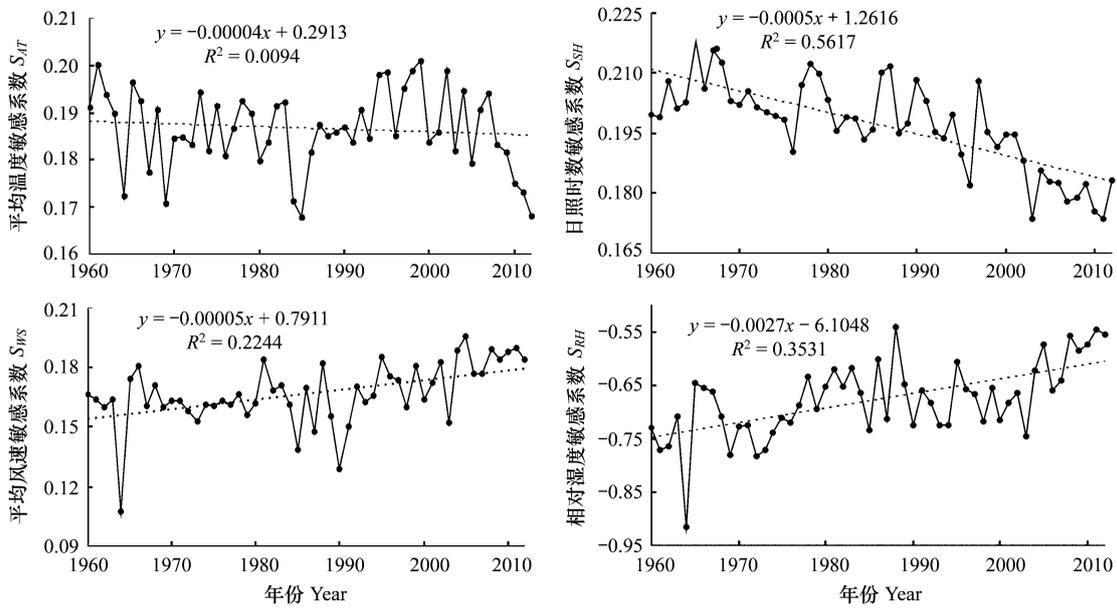


图 5 1960—2012 年气象要素敏感系数变化

Fig.5 Sensitivity coefficients of meteorological factors from 1960 to 2012

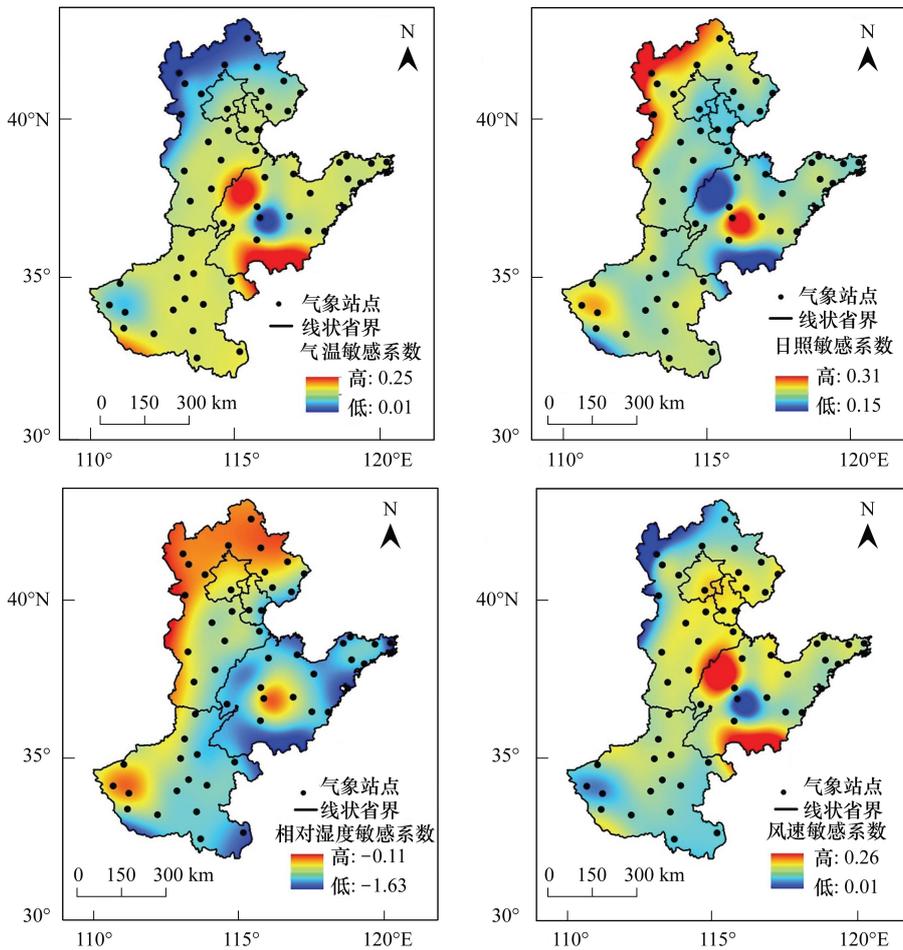


图 6 华北平原各气象因子敏感系数的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of sensitivity coefficients for each climate variable in North China Plain

泰山及济南周边区域由于山地地形影响也成为敏感系数高值区,其余地区均为 S_{RH} 低值区。冀北、豫西和鲁中 3 个变化中心区既是 S_{AT} 和 S_{WS} 的低值中心,又是 S_{RH} 的高值中心。冀南与鲁西北交界区和鲁南既是 S_{AT} 和 S_{WS} 的高值区,又是 S_{RH} 低值区,这说明对气温和风速敏感度高的区域同时对日照时数和相对湿度敏感度较低。汇总 56 个站点分析结果发现,蔚县和张北站的 S_{AT} 和 S_{WS} 居于所有站点的前 5 位, S_{RH} 和 S_{SH} 则居于最后 5 位,再次说明对气温和风速高敏感的站点也同时属于日照时数及相对湿度的低敏感区。总体上看,鲁西北、冀南和鲁南地区是气温和风速高敏感区以及日照时数低敏感区,鲁中泰山周边地区、河北坝上地区和豫西为气温和风速低敏感区以及日照时数高敏感区。豫西地区、河北坝上及鲁中地区为相对湿度高敏感区,其余区域普遍为相对湿度的低敏感区。

3.4 参考作物蒸散量影响因素分析

由 P-M 公式可知, ET_0 主要受到气温、风速、相对湿度和日照时数等气候因素的共同影响。采用相关分析法分析热力因子(日最高气温,日最低气温,日平均气温)、动力因子(风速)和湿度因子(相对湿度)对 ET_0 影响的大小,进一步探讨气候因素对 ET_0

的影响(表略)。 ET_0 与日照时数、最高气温、平均气温、平均风速呈正相关关系,且大多数站点的相关系数达到 0.01 显著水平,日照时数与 ET_0 的正相关系数最大,最高温度次之,其次是温度和风速, ET_0 与相对湿度则表现为负相关。计算 ET_0 对气候因子的敏感系数(S_{ei})与气候要素的相对变化(R_{ei})的乘积,求得各气候要素对 ET_0 变化的贡献量(G_{ei}),可以进一步分析气候因子对 ET_0 变化的影响大小和影响 ET_0 变化的主要因素,代表站点分析结果见表 3。可以看出,气候因子的总贡献量(G_{ET_0})与 ET_0 的相对变化(R_{ET_0})接近,各站点 G_{ET_0} 相对 R_{ET_0} 的误差均在 $\pm 8\%$ 以内。张北、天津、石家庄、信阳、卢氏站分别位于华北平原北部、中部和南部, ET_0 变化的主导因素都是日照时数,日照时数的变化对该地 ET_0 的减小的贡献最大。北京、丰宁、莱阳的 ET_0 有所增加,但是增加的原因各不相同。北京的 ET_0 变化主要归因于相对湿度的减小,丰宁 ET_0 变化是由最高气温增加引起的,莱阳 ET_0 的显著变化则主要是由于最低气温的变化引起的。惠民、秦皇岛、新乡 R_{ET_0} 的减小都是由平均风速的负贡献引起,兖州站则以相对湿度为 ET_0 变化的主导因子。

表 3 部分站点气候因子对 ET_0 的贡献量

Table 3 Contribution of climate factors to ET_0 in representative stations

站点 Stations	蒸散量/mm ET_0	气候因子贡献量/%					总贡献/ $R_{ET_0}/\%$	ET_0 相对变化 $R_{ET_0}/\%$	主导因素 Dominant factor
		G_{HT}	G_{LT}	G_{RH}	G_{WS}	G_{SH}			
北京	1089.5	2.99	2.77	6.19	-3.99	-2.85	5.11	5.23	相对湿度 (RH)
丰宁	1085.42	3.26	-3.51	1.59	1.76	-1.22	1.88	1.96	最高气温 (HT)
惠民	1083.85	1.02	2.21	1.83	-6.86	-3.43	-5.23	-5.29	平均风速 (WS)
莱阳	974.12	3.27	8.38	-4.66	-0.25	5.45	12.19	13.56	最低气温 (LT)
卢氏	1071.87	1.15	0.16	0.19	-1.17	-4.76	-4.43	-5.65	日照时数 (SH)
秦皇岛	960.84	1.32	1.09	-5.08	-12.2	-2.65	-17.52	-14.54	平均风速 (WS)
石家庄	1046.52	1.03	2.55	4.23	-5.65	-8.54	-6.38	-8.53	日照时数 (SH)
天津	1064.85	2.12	0.62	2.45	-5.39	-6.35	-6.55	-7.88	日照时数 (SH)
新乡	1054.32	0.47	1.83	3.98	-5.82	-4.68	-4.22	-5.42	平均风速 (WS)
信阳	1024.69	0.56	1.22	1.52	1.81	-7.15	-2.04	-2.95	日照时数 (SH)
兖州	1058.73	0.68	0.71	-6.95	-4.51	-4.36	-14.43	-15.53	相对湿度 (RH)
张北	1252.68	0.55	5.59	0.16	-3.09	-5.87	-2.66	-2.82	日照时数 (SH)

HT, LT, AT, RH, WS 和 SH 分别表示日最高气温 (High Temperature)、日最低气温 (Low Temperature)、平均气温 (Average Temperature)、相对湿度 (Relative Humidity)、风速 (Wind Speed) 和日照时数 (Sunshine Hours); G_{HT} , G_{LT} , G_{RH} , G_{WS} , G_{SH} 分别为相应气候要素对 ET_0 变化的贡献率, G_{ET_0} 为各要素对 ET_0 变化贡献的总和, R_{ET_0} 为 ET_0 的实际变化量

华北地区 ET_0 变化的主导因子存在空间差异 (图 7)。区域内 9 个 ET_0 上升站点, 其中北京、龙口、日照、威海、海阳 ET_0 上升的主要原因为相对湿度的下降, 丰宁、蔚县 ET_0 上升则主要归因于最高气温的上升, 栾川及莱阳 ET_0 上升则归因于最低气温的上升。 ET_0 下降的站点, 其变化则主要是由于日照时数的减少引起的。河北中部、河北北部及坝上地区 ET_0 减少区的主导因子为日照时数, 仅廊坊站及环渤海区的青龙、秦皇岛、乐亭站受风速影响大。河北南部、鲁西北地区、豫中及河南黄河以北地区也是平均风速的主要影响区。河南省豫西、豫南、豫东地区 ET_0 的下降则普遍是由于日照时数引起的, 鲁中地区也是日照时数的主要影响区。相对湿度的影响站点则主要分布在山东半岛及鲁南地区。从全区来看, 日照时数的减小是导致华北平原蒸散量减少的主要原因。结合敏感系数来看, 主导因素的空间变化与敏感系数的空间格局并不对应, 这是因为 ET_0 贡献量的变化取决于敏感系数和气象要素相对变化两方面。从全区各站贡献主导因素的统计来看, 31 个站以日照时数为主导因子, 其次是风速 (13 个), 相对湿度占到了 8 个, 最高温度与最低温度均为 2 个。

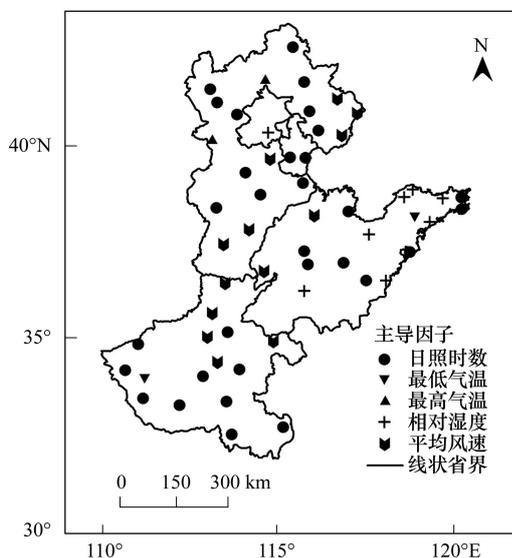


图 7 1960—2012 年华北平原 ET_0 变化主导因子

Fig.7 Dominant factors of ET_0 variation in North China Plain from 1960 to 2012

4 结论与讨论

(1) 华北平原多年平均 ET_0 为 1071.37mm, 空间分布上冀北、鲁中和豫西为区域 ET_0 高值中心, 冀东、

鲁南、豫东及豫南为 ET_0 低值中心, 四季 ET_0 空间分布与年尺度分布格局基本一致。

(2) 近 53 年 ET_0 呈减少趋势, 减少速率为 12.8mm/10a, 1982 年为正负距平的转折点。从年代变化来看, ET_0 各年代距平值持续降低。区域内有 9 个站呈现缓慢的增加趋势, 分布于山东半岛北部及冀北, 其余地区为减少区。

(3) ET_0 对气温、风速和日照时数为正敏感, 仅相对湿度为负敏感。 S_{AT} 与 S_{SH} 呈现缓慢的下降趋势, S_{RH} 与 S_{WS} 呈现上升趋势。空间分布上, 对气温和风速敏感度高的区域同时对日照时数和相对湿度敏感度较低。

(4) ET_0 与日照时数、最高气温、平均气温和平均风速均呈正相关关系, 与相对湿度呈负相关关系。日照时数的下降是该区 ET_0 变化的主要原因, 从全区各站贡献主导因素的统计来看, 31 个站以日照时数为主导因子, 其次是风速 (13 个), 相对湿度占到了 8 个, 最高温度与最低温度均为 2 个。日照时数的主导区域分布于冀北、坝上地区、冀中、豫西、豫南、鲁中等地, 风速主导区域包括冀南、河南黄河以北、豫中及鲁西北, 相对湿度的主导区域为山东半岛、鲁南, 温度主导区域零星分布在冀北、山东半岛及豫西。

本文关于 ET_0 敏感系数的研究结果与张调风等^[39]对黄土高原、曾丽红等^[40]对东北地区和李斌等^[41]对澜沧江流域 ET_0 对气象因子敏感性研究得出的敏感系数不同, 与刘昌明等^[8]对黄河、海河和淮河流域片区以及梁丽乔等^[38]对松嫩平原研究得出的敏感系数大小较为接近, 可见地域差异会对敏感性系数产生一定的影响。但是敏感系数只是给出了 ET_0 对单一气象因子的响应大小, 还不能用来度量每个因子对 ET_0 的实际贡献水平。本文在敏感系数研究的基础上, 进一步结合气象因子的相对变化, 计算 ET_0 的贡献量, 定量评价了各气象因子对 ET_0 的影响大小。近年来, “蒸发悖论”现象在很多地区得到广泛的关注和验证, 华北平原气温的升高并没有导致区域 ET_0 升高。究其原因, 很大程度上是因为该区域气温对 ET_0 的贡献率在总贡献率里 (G_{ET_0}) 占的比重并不大, 因此大部分区域 ET_0 并没有因为气温的变化而发生显著变化, 而日照时数及风速的变化是大部分区域 ET_0 变化的主要原因。

References:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007; The Physical Science Basis Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; Cambridge University Press, 2007.
- [2] Jiang C, Wang F, Mu X M, Li R. Effects of temperature and precipitation variation on vegetation net primary productivity in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1960 to 2011. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32 (9): 1888-1896.
- [3] Jiang C, Wang F, Liu Y X, Mu X M, Li R. Spatial-temporal variation and mutation of wind speed in the northern and southern regions of the Qinling Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(2): 244-250.
- [4] Li S S, Yan J P, Wan J. The spatial-temporal changes of vegetation restoration on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 960-970.
- [5] An H, Yan J P, Zhang T T, Liao G M. Temporal and spatial characteristics of extreme precipitation events in North China plain on background of climate warming. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(3): 144-148.
- [6] Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971—2008. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(29): 3329-3337.
- [7] Gao G, Chen D L, Ren G Y, Chen Y, Miao Y M. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 378-387.
- [8] Liu C M, Zhang D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66 (5): 579-588.
- [9] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 381-396.
- [10] Xie X Q, Wang L. Changes of potential evaporation in Northern China over the past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 683-691.
- [11] Zheng H X, Liu X M, Liu C M, Dai X Q, Zhu R R. Assessing contributions to pan evaporation trends in Haihe River Basin, China. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D24), doi: 10.1029/2009JD012203.
- [12] Espadafor M, Lorite I J, Gavilán P, Berengena J. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in southern Spain. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1045-1061.
- [13] Saeid E, Mohammad J K, Jahangir A K. Effects of variations in climatic parameters on evapotranspiration in the arid and semi-arid regions. *Global and Planetary Change*, 2011, 78 (3/4): 188-194.
- [14] Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 2001, 243 (3/4): 192-204.
- [15] Jensen M E, Wright J L, Pratt B J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Transactions of ASABE*, 1971, 14(5): 954-959.
- [16] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 1977.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, ISBN 92-5-104219-5, FAO, Land and Water Development Division. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [18] Liu X F, Pan Y Z, Zhang J S, Lin Z H. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in five provinces of Northwest China in 1960—2011. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(9): 2564-2570.
- [19] Wang S P. 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): 960-966.
- [20] Jiang C, Wang F, Mu X M, Li R. Spatial-temporal variations and mutations of potential evapotranspiration in the northern and southern regions of the Qinling Mountains. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(5): 573-581.
- [21] Li Z. Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4139-4145.
- [22] Zuo D P, Xu Z X, Li J Y, Liu Z F. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River basin under future climate change. *Advances in Water Science*, 2011, 22 (4): 455-461.
- [23] Ma N, Wang H A, Wang P L, Sun Y M, Dong C Y. Temporal and spatial variation characteristics and quantification of the affect factors for reference evapotranspiration in Heihe River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 975-989.
- [24] Wang Q, Zhang M J, Pan S K, Ma X N, Li F, Liu W L. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in the Yangtze River basin of China. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5): 1292-1302.
- [25] Jin L Y, Li J, Wang X, Chen F H. The temporal and spatial distribution of surface dry-wet conditions over Northwestern China in recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (6): 847-854.
- [26] Zeng L H, Song K S, Zhang B. Spatial and temporal structure of water deficit over Northeast China during the period of 1951—2008. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 858-870.
- [27] Jiang C, Wang F, Liu S J, Mu X M, Li R, Li Y X. Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 844-855.
- [28] Ma X N, Zhang M J, Wang S J, Ma Q, Pan S K. Evaporation paradox in the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 645-656.
- [29] Tan F Y, Wang J L, Song Y B. Characteristics of climate change in the North China Plain for recent 45 years. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(5): 40-45.
- [30] Yan J P. Research on Symmetry of Major Natural Disasters. Xi'an: Shannxi Normal University Press, 2013: 200-204.
- [31] Guo J, Ren G Y. Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watershed, China.

- Advances in Water Science, 2005, 16(5): 666-672.
- [32] Liu Y, Wang Y, Yang X G. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 923-932.
- [33] Ma J H, Liu Y, Yang X G, Wang W F, Xue C Y, Zhang X Y. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3818-3827.
- [34] Mo X G, Xue L, Lin Z H. Spatio-temporal distribution of crop evapotranspiration from 1981—2001 over the North China Plain. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 181-187.
- [35] Duan C F, Miu Q L, Cao W, Wang Y. Estimation of reference crop evapotranspiration by Chinese pan evaporation in Northwest China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(4): 94-99.
- [36] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *Water Resource Bulletin*, 1974, 10(3): 486-497.
- [37] Zhou Y, Zhang X, Xu J. Changes of reference crop evapotranspiration and sensitivity analysis of meteorological factors in eastern plateau agricultural region of Qinghai Province. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 765-775.
- [38] Liang L Q, Li L J, Zhang L, Li J Y, Jiang D J, Xu M X, Song W X. Sensitivity of the reference crop evapotranspiration in growing season in the West Songnen Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(5): 1-5.
- [39] Zhang T F, Zhang B, Liang Y, Han L Y, Liu X L, Wang D. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration to key meteorological factors during growing season in Loess Plateau. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(2): 162-169.
- [40] Zeng L H, Song K S, Zhang B, Wang Z M. Sensitive analysis on reference evapotranspiration to key meteorological factors in Northeast China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(1): 11-18.
- [41] Li B, Li L J, Tan Q C, Liang L Q, Li J Y, Liu Y M, Zeng H W. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in the Lancang River Basin. *Resources Science*, 2011, 33(7): 1256-1263.
- [18] 刘宪锋, 潘耀忠, 张锦水, 林志慧. 1960—2011年西北五省潜在蒸散的时空变化. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2564-2570.
- [19] 王素萍. 近40a 江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因子分析. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 960-966.
- [20] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 秦岭南北潜在蒸散量时空变化及突变特征分析. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(5): 573-581.
- [21] 李志. 黄土高原1961—2009年参考作物蒸散量的时空变异. *生态学报*, 2012, 32(13): 4139-4145.
- [22] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 刘兆飞. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征. *水科学进展*, 2011, 22(4): 455-461.
- [23] 马宁, 王乃昂, 王鹏龙, 孙彦猛, 董春雨. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 975-989.
- [24] 王琼, 张明军, 潘淑坤, 马雪宁, 李菲, 刘文莉. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1292-1302.
- [25] 靳立亚, 李静, 王新, 陈发虎. 近50年来中国西北地区干湿状况时空分布. *地理学报*, 2004, 59(6): 847-854.
- [26] 曾丽红, 宋开山, 张柏. 1951—2008年东北地区水分盈亏量时空格局. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 858-870.
- [27] 蒋冲, 王飞, 刘思洁, 穆兴民, 李锐, 刘焱序. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨. *生态学报*, 2013, 33(3): 844-855.
- [28] 马雪宁, 张明军, 王圣杰, 马潜, 潘淑坤. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨. *地理学报*, 2012, 67(5): 645-656.
- [29] 谭方颖, 王建林, 宋迎波. 华北平原近45年气候变化特征分析. *气象*, 2010, 36(5): 40-45.
- [30] 延军平. 重大自然灾害时空对称性研究. 西安: 陕西师范大学出版社, 2013: 200-204.
- [31] 郭军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析. *水科学进展*, 2005, 16(5): 666-672.
- [32] 刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素. *生态学报*, 2010, 30(4): 923-932.
- [33] 马洁华, 刘园, 杨晓光, 王文峰, 薛昌颖, 张晓煜. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势. *生态学报*, 2010, 30(14): 3818-3827.
- [34] 莫兴国, 薛玲, 林忠辉. 华北平原1981—2001年作物蒸散量的时空分异特征. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 181-187.
- [35] 段春锋, 缪启龙, 曹雯, 王勇. 西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 94-99.
- [37] 周瑶, 张鑫, 徐静. 青海省东部农业区参考作物蒸散量的变化及对气象因子的敏感性分析. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 765-775.
- [38] 梁丽乔, 李丽娟, 张丽, 李九一, 姜德娟, 胥铭兴, 宋文献. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 1-5.
- [39] 张调风, 张勃, 梁芸, 韩兰英, 刘秀丽, 王东. 黄土高原地区生长季参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析. *中国农业气象*, 2013, 34(2): 162-169.
- [40] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 王宗明. 东北地区参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析. *中国农业气象*, 2010, 31(1): 11-18.
- [41] 李斌, 李丽娟, 覃馥楚, 梁丽乔, 李九一, 柳玉梅, 曾宏伟. 澜沧江流域潜在蒸散发敏感性分析. *资源科学*, 2011, 33(7): 1256-1263.

参考文献:

- [2] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 1960—2011年秦岭南北气温和降水变化对植被净第一性生产力的影响研究. *西北植物学报*, 2012, 32(9): 1888-1896.
- [3] 蒋冲, 王飞, 刘焱序, 穆兴民, 李锐. 秦岭南北风速时空变化及突变特征分析. *地理科学*, 2013, 33(2): 244-250.
- [4] 李双双, 延军平, 万佳. 近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(7): 960-970.
- [5] 安华, 延军平, 张涛涛, 廖光明. 变暖背景下华北平原极端降水事件时空变化特征. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 144-148.
- [6] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971—2008年我国潜在蒸散时空演变的归因. *科学通报*, 2010, 55(22): 2226-2234.
- [7] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 陈峪, 廖要明. 1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势. *地理研究*, 2006, 25(3): 378-387.
- [8] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. *地理学报*, 2011, 66(5): 579-588.
- [10] 谢贤群, 王菱. 中国北方近50年潜在蒸发的变化. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 683-691.