

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

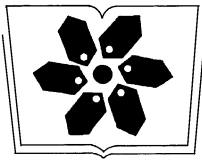
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 11 期 Vol.32 No.11 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 11 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子·····	蔡文华, 杨健, 刘志华, 等 (3303)
基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价·····	杨柳, 李泳慧, 王俊才, 等 (3313)
川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征·····	马姜明, 刘世荣, 史作民, 等 (3323)
老龄阔叶红松林下层木空间分布的生境关联分析·····	丁胜建, 张春雨, 夏富才, 等 (3334)
内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较·····	张媛媛, 马成仓, 韩磊, 等 (3343)
角果藜的生长动态及其生殖配置·····	全杜娟, 魏岩, 周晓青, 等 (3352)
基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例·····	侍昊, 王笑, 薛建辉, 等 (3359)
祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布·····	姜林, 耿增超, 李珊珊, 等 (3368)
水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响·····	马树庆, 王琪, 吕厚荃, 等 (3378)
施氮对水稻土 N ₂ O 释放及反硝化功能基因 (<i>narG/nosZ</i>) 丰度的影响·····	郑燕, 侯海军, 秦红灵, 等 (3386)
中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因·····	曹雯, 申双和, 段春峰 (3394)
基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究·····	杜加强, 舒俭民, 张林波 (3404)
异速生长法计算秋茄红树林生物量·····	金川, 王金旺, 郑坚, 等 (3414)
乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征·····	马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等 (3423)
不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系·····	张萍, 刘林德, 柏新富, 等 (3432)
浑善达克沙地沙地榆种子雨的扩散规律·····	谷伟, 岳永杰, 李钢铁, 等 (3440)
咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响·····	何新林, 陈书飞, 王振华, 等 (3449)
外源 NO 对 NaHCO ₃ 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节·····	刘建新, 王金成, 王鑫, 等 (3460)
呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化·····	丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等 (3467)
海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性·····	耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等 (3477)
江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价·····	陈京都, 戴其根, 许学宏, 等 (3487)
应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系·····	黎道洪, 苏晓梅 (3497)
利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性·····	屠腾, 李蕾, 毛冠男, 等 (3505)
中国主要入海河流域河口集水区划分与分类·····	黄金良, 李青生, 黄玲, 等 (3516)
基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力·····	殷燕, 张运林, 时志强, 等 (3528)
低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力·····	王娜, 邵晨, 颜志刚, 等 (3538)
转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化·····	祝向钰, 李志毅, 常亮, 等 (3546)
尼日利亚非洲蜂和安徽意大利蜜蜂及其杂交二代形态特征与微卫星 DNA 遗传多样性·····	余林生, 解文飞, 巫厚长, 等 (3555)
北京城市公园湿地休憩功能的利用及其社会人口学因素·····	李芬, 孙然好, 陈利顶 (3565)
基于协整理论的经济增长与生态环境变化关系分析——以重庆市渝东南地区为例·····	肖强, 胡聃, 肖洋, 等 (3577)
感潮河网区环境合作博弈模型及实证·····	刘红刚, 陈新庚, 彭晓春 (3586)
专论与综述	
国内外生态效率核算方法及其应用研究述评·····	尹科, 王如松, 周传斌, 等 (3595)
全球变化背景下的现代生态学——第六届现代生态学讲座纪要·····	温腾, 徐德琳, 徐驰, 等 (3606)
问题讨论	
流域环境要素空间尺度特征及其与水生态分区尺度的关系——以辽河流域为例·····	刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 等 (3613)
研究简报	
不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响·····	鲁艺芳, 石蕾, 严善春 (3621)
木荷种源间光合作用参数分析·····	熊彩云, 曾伟, 肖复明, 等 (3628)
基于能值分析的深圳市三个小型农业生态系统研究·····	杨卓翔, 高阳, 赵志强, 等 (3635)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 342 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2012-06



封面图说: 爬升樟木沟的暖湿气流——樟木沟是中国境内横切喜马拉雅山脉南坡的几条著名大沟之一,它位于我国西藏聂拉木县境内的希夏邦马峰东南侧,延绵 5400km 的 318 国道在此沟中到达其最西头。从聂拉木县城到樟木口岸短短的 30km 中,海拔从 4000m 急降至 2000m。在大气环流作用下,来自印度洋的暖湿气流沿樟木沟不断费力地往上爬升,给该沟谷留下了大量的降水。尤其是在雨季到来时,山间到处是流水及悬垂崖头的瀑布,翠峰直插云霄,森林茂密苍郁,溪流碧澄清澈,奇花异葩繁多,风景美如画卷,气势壮丽非凡。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201105120613

曹雯, 申双和, 段春锋. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因. 生态学报, 2012, 32(11): 3394-3403.

Cao W, Shen S H, Duan C F. Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3394-3403.

中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因

曹 雯^{1,2}, 申双和^{1,2,*}, 段春锋^{1,2}

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要:潜在蒸散是区域干湿状况评价、作物需水量估算和水资源合理规划的关键因子。基于 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和 126 个台站 1961—2009 年逐日气象观测资料估算西北干旱半干旱区的潜在蒸散量 ET_0 , 并对其空间分布特征进行了讨论。通过非参数化 Sen 趋势分析法和 M-K 统计检验法方法分析潜在蒸散的时间演变规律, 并定量探讨了西北地区影响 ET_0 变化的主导因素。结果表明: 49 a 来, 西北地区 ET_0 的年平均值约为 980.63 mm, 其中夏季的值最大, 冬季的值最小。年平均 ET_0 的大值区位于西北日照时数的高值中心, 低值区主要位于海拔高, 气温低的山区。西北地形和气候的多样性导致多年平均潜在蒸散的变化及其原因具有明显的时空差异。 ET_0 的变化主要归因于风速和气温, 而相对湿度和日照时数的作用较小。由于风速的负贡献超过气温的正贡献, 导致年平均 ET_0 整体上呈下降趋势。四季中, 春、冬两季的 ET_0 缓慢上升, 冬季的变化率是春季的两倍; 夏、秋两季的 ET_0 有所下降, 但只有夏季的变化趋势显著。春、夏、秋三季 ET_0 变化的首要主导因子是风速, 而冬季的首要主导因子是气温。空间上, 西风带气候区 ET_0 降低主要归因于风速的减小, 陕南地区 ET_0 下降主要归因于日照时数的减少, 其它地区 ET_0 上升的主要原因是气温的增加。

关键词:潜在蒸散; 主导因子; 定量化; 西北地区

Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China

CAO Wen^{1,2}, SHEN Shuanghe^{1,2,*}, DUAN Chunfeng^{1,2}

1 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Potential evapotranspiration represents the maximum possible evaporation and is the rate that would occur under given meteorological conditions from a continuously saturated surface. As a main component of the hydrological cycle, potential evapotranspiration (ET_0) is essential for understanding regional moisture conditions, estimating crop water requirements and managing water resources. In recent years, change trends in ET_0 and its dominant factors across the different regions of the world have been studied by many researchers. Despite global warming, decreasing trends in ET_0 have been detected in several countries including United States, Russia, India, China, Australia and New Zealand. Decreasing sunshine duration, declining wind speed and increasing relative humidity have been considered to be the main causes for the decreasing ET_0 .

Northwest China in the hinterland of Eurasia and far away from oceans is one of the driest areas in the world. Water shortage is a serious problem for agriculture in this area. So far, detailed investigation on the change trend in ET_0 over Northwest China has been lacking.

基金项目:科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906023, GYHY201106043); 中国气象局气候变化专项(CCSF-09-12); 江苏省普通高校毕业生科研创新计划资助项目(CX10B_297Z); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

收稿日期: 2011-05-12; 修订日期: 2011-09-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yqzhr@nuist.edu.cn

In this paper, daily ET_0 was computed with the recommended FAO-56 Penman-Monteith equation for the arid Northwest China using data collected 126 weather stations during 1961 to 2009 and its spatial variations were characterized. Temporal variations in ET_0 were also investigated using the nonparametric Sen's method and the Mann-Kendall test, and determining factors in ET_0 trends were inquired into through partial derivative quantification analysis for the study region. Results showed that the mean annual ET_0 was 981 mm over the whole region during the study period. ET_0 peaked in summer and decreased to a minimum in winter. Higher ET_0 was found over areas with high solar radiation, while lower values occurred over mountain areas with low air temperatures. The spatial distribution of spring, summer and autumn ET_0 had roughly similar patterns compared to that of the annual ET_0 . Great differences either in the mean annual ET_0 or in its determining factors existed from area to area due to the diverse topographies and climates in the Northwest China. Both wind speed and air temperature were the dominant factors contributing to its interannual change, with less contribution from relative humidity or sunshine duration. The annual ET_0 showed a general decline at a rate of -4.6 mm/decade owing to a more negative contribution of falling wind speed than a positive contribution of rising air temperature. The decrease occurred mainly from 1974 to 1993. After reaching the lowest value in 1993, ET_0 began to increase slowly. ET_0 increased slightly in both spring and winter and decreased in both summer and autumn. The rate of the increase in the winter was twice that in the spring, and ET_0 decreased more significantly in the summer than in the autumn. The main impacting factor was wind speed in the spring, summer and autumn, and but it was air temperature in the winter. Decreases in ET_0 in the western part of the region and the southern part of Shannxi Province arose from both declining wind speed and falling sunshine duration. Rising air temperature was the determining factor in ET_0 increase over other areas of the region.

Key Words: potential evapotranspiration; determining factor; quantification; Northwest China

水资源是人类生产和生活必不可少的自然资源,也是生物赖以生存的环境资源。近几十年来,全球水资源在数量和质量上的危机不断加剧,水资源短缺已演变成世界倍受关注的资源环境问题之一。在此背景下,作为农业生产的命脉,水资源能否得到科学配置和合理利用将直接影响到农业的可持续发展。潜在蒸散是水分循环的重要参量之一,它在作物需水量估算,区域干湿状况评价和灌溉决策制定等方面发挥着关键作用。因此对其开展研究有助于合理开发调配水土资源,达到提高农用水利用效率,缓解农业生产水资源短缺压力的目的。

潜在蒸散表示在一定气象条件下水分供应不受限制时,某一固定下垫面可能达到的最大蒸散量^[1-2]。气候变化背景下,全球潜在蒸散的普遍下降及其主导因素受到国内外学者们的广泛关注。Peterson^[3]和 Chattopadhyay^[4]等认为美国、前苏联和印度等地区潜在蒸散下降的主要原因是北半球相对湿度的增加及辐射的减少;Roderick^[5]等将澳大利亚和新西兰地区潜在蒸散的减少归因于南半球云量和气溶胶浓度的增加。Thomas^[6], Gao^[7], 尹云鹤^[8], Xie^[9], Zhang^[10], Xu^[11]等人对中国潜在蒸散的研究表明,无论是全国范围还是北方地区、青藏高原、长江流域等局部区域,太阳辐射和风速的减少都是潜在蒸散下降的主要原因。以上研究为探讨潜在蒸散对气候变化的响应奠定了基础,但由于影响潜在蒸散的气象因子众多,不同地区特有的气候特征将导致潜在蒸散的变化特征及其主导因子存在明显的区域差异。

我国西北地区地域广阔,资源丰富,民族众多,在我国的经济建设、社会稳定和国防安全方面都具有重要的战略地位;同时,由于其特殊的自然地理条件,深居内陆,远离海洋^[12],又是我国极其重要的生态屏障,水资源匮乏已经成为制约当地发展的“瓶颈”。西北特殊的地形使其很少有旱作农业,大部分农业区都是“无灌溉即无农业”的灌溉农业区^[13]。因此,潜在蒸散作为制定灌溉计划和水资源优化配置的重要依据和基础^[14],它在该地区近几十年来的变化特征和变化原因值得关注。本文基于西北干旱半干旱区 126 个测站 1961—2009 年逐日气象观测资料,通过非参数化 Sen 趋势分析法和 M-K 统计检验法方法对潜在蒸散的变化特征进行分析,并定量探讨了潜在蒸散变化的主要影响因素。研究有助于深入理解气候变化对于干旱半干旱地区水分循环

的影响,为科学评价西北地区气候干湿状况、合理开发调配水土资源提供科学依据。

1 研究资料

我国西北地区包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西五省区和内蒙古的西部(图1),土地总面积约 345 万 km^2 ,占全国陆地面积的 35.9%。它地域广阔,跨越了半湿润区边缘地带、干旱区和半干旱区 3 个气候区,盆地、高原、山地、平原等地形的交错分布导致该地区气候要素的分布很不均匀,降水表现得尤为突出。受地形影响,西北地区降水形成了多个闭合圈。而降水的高值区基本上都是非农业的高山区,部分农业区的降水量在 150 mm 以下^[15]。因此,西北地区很少有旱作农业,大部分农业区都是“无灌溉即无农业”的灌溉农业区^[13]。

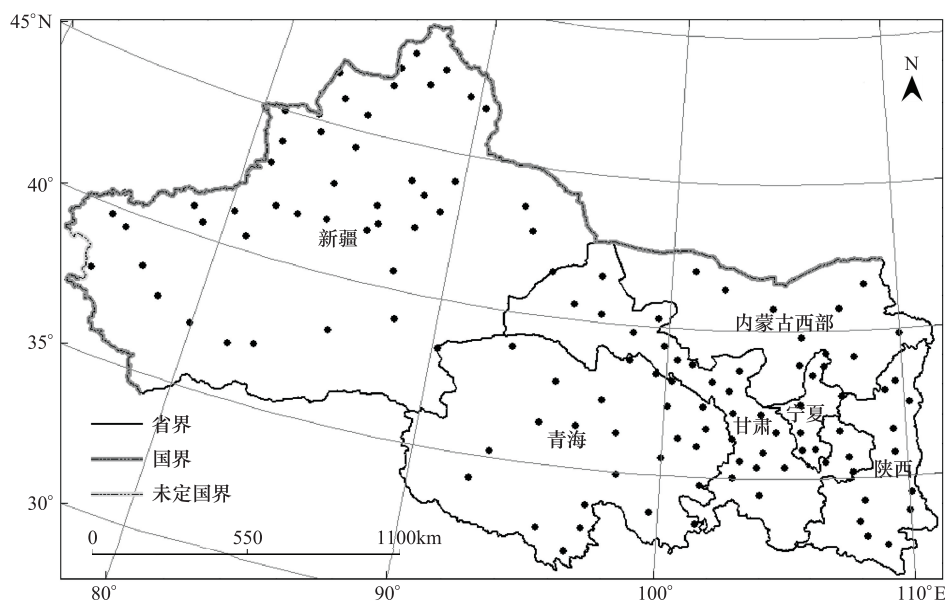


图1 西北地区站点分布图

Fig. 1 Meteorological stations in Northwest China

本文选择西北 6 省区资料较完整的 126 个站点作为研究对象(图1),地面观测站逐日气象数据来自国家气象中心气象资料室,包括:平均气温($^{\circ}\text{C}$),最高气温($^{\circ}\text{C}$),最低气温($^{\circ}\text{C}$),10 m 高度处风速(m/s),日照时数(h)和平均相对湿度(%),研究时段为 1961—2009 年。

2 研究方法

2.1 Penman-Monteith 公式

由于潜在蒸散受到多种因素的影响,对它在较大区域范围内进行实测存在一定困难,因此通常都采用模型来估算^[16]。其中 FAO 在 1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础,较全面地考虑了影响潜在蒸散的各种因素^[17],得到广泛运用。并且该模型在应用于湿润和干旱等各种气候条件地区时,都取得了较好的效果^[18-22],计算精度高于其他方法。因此本文选择 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散,表达式如下^[23]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式(1)中, ET_0 是潜在蒸散(又称为参考作物蒸散)(mm/d); Δ 是温度随饱和水汽压变化的斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); R_n 是净辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),本文采用童宏良^[24]提出的西北地区修正方案来计算; G 是土壤热通量密度($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); γ 是干湿表常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); t 是日平均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 是 2m 高处风速(m/s); e_s 是饱和水汽压(kPa); e_a 是实际水汽压(kPa)。

2.2 Sen 趋势分析法和 M-K 统计检验方法

本研究采用非参数化 Sen 方法^[25]来计算潜在蒸散及各气象要素的变化趋势,并通过 Mann-Kendall 统计检验方法^[26-27]对变化趋势及显著性水平进行检测。非参数化 Sen 方法是 Sen 在 1968 年提出的,主要用于估算线性趋势的斜率。MK 统计检验方法是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,计算也比较简便^[28]。

2.3 气象因子的贡献

FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式明确了作物类型、作物生长状况和土壤水分状况,使得计算出的潜在蒸散主要只受到气象要素的影响^[23]。同时从 Penman-Monteith 公式中可以看出,潜在蒸散是气温、风速、相对湿度和日照时数这 4 个气象因子的函数,即 $ET_0 = f(TA, WD, RH, SD)$ 。因此 ET_0 随时间 $t(a)$ 的变化可分解为:

$$\frac{dET_0}{dt} = \frac{\partial ET_0}{\partial TA} \cdot \frac{dT_A}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial WD} \cdot \frac{dWD}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial RS} \cdot \frac{dRS}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial SD} \cdot \frac{dSD}{dt} \quad (2)$$

公式(2)表明, ET_0 的变化是 4 个气象因子共同作用的结果,等号右边的 4 项分别代表气温、风速、相对湿度和日照时数对潜在蒸散(mm/a)变化的贡献,并规定引起 ET_0 上升为正贡献,引起 ET_0 下降为负贡献。通过比较各因子对 ET_0 变化贡献的绝对值,从而得出影响西北地区潜在蒸散变化的主导因子。本文中首先计算各站点的贡献值,西北全区的贡献值由 126 个站点贡献的算术平均值求得。

3 结果分析

3.1 西北地区潜在蒸散的时空特征

3.1.1 潜在蒸散的空间分布

49 a 来,西北地区潜在蒸散 ET_0 的年平均值约为 980.63 mm,高于全国的平均水平^[29]。其中夏季(6—8 月)的值最大,为 435.50 mm,约占全年的 44%;其次是春季(3—5 月)和秋季(9—11 月),分别为 301.63 mm 和 178.78 mm,约占全年的 31% 和 18%;冬季(12—2 月)的值最小,仅为 66.51 mm,约占全年的 7%。

潜在蒸散的大小与气温、风速、辐射强度和地形都有很大关系,因此它的空间分布会受到这些要素分布特征的影响(图 2)。年潜在蒸散量的大值区位于新疆的塔里木盆地、内蒙古西部沙漠地区、青海的柴达木盆地以及甘肃西北部,超过了 1000 mm。这些地区是西北日照时数的高值中心,光能资源丰富,加之相对湿度较小,因此潜在蒸散较大。新疆阿勒泰山区、青海高原和甘肃南部是西北年潜在蒸散量最小的区域,其值在

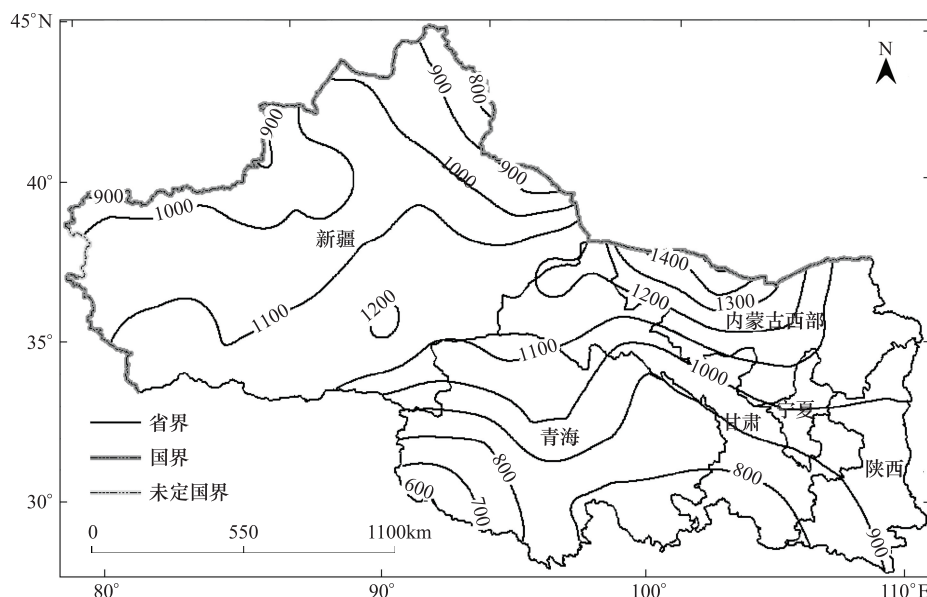


图 2 西北地区潜在蒸散的空间分布/mm

Fig. 2 Spatial distribution of potential evapotranspiration in Northwest China

800mm 以下,主要原因是这些地区海拔高,气温低,相对湿度相对较大。

春、夏和秋三季潜在蒸散量的空间分布同年潜在蒸散量比较相似,大值区主要在新疆的塔里木盆地、内蒙古西部沙漠地区、青海的柴达木盆地以及甘肃西北部,3 个季节的 ET_0 分别达到 350 mm,480 mm 和 200 mm 以上;小值区位于新疆阿勒泰山区、青海高原和甘肃南部,3 个季节的 ET_0 分别在 250 mm,340 mm 和 160 mm 以下。但冬季有所不同,主要体现在青海南部和陕南也成为潜在蒸散量的大值区,其值超过 100 mm。冬季潜在蒸散量与日照时数的相关性明显弱于其他 3 个季节,而与风速和气温的相关性比较高。因此青海南部高原地区较大的风速和陕南地区较高的气温分别是这两个地区潜在蒸散量较大的可能原因。

3.1.2 潜在蒸散的多年变化

1961—2009 年,西北地区年平均潜在蒸散 ET_0 整体上以 -0.46 mm/a 的速率下降,变化趋势通过 90% 的显著性检验(图 3)。下降最为明显的阶段是 1974—1993 年,其后由于气候变暖进程的加快及日照时数和风速下降趋势的减缓,潜在蒸散略有上升。四季中,春季和冬季的潜在蒸散分别以 0.02 mm/a 和 0.04 mm/a 的速率缓慢上升,但其变化趋势并不显著;夏季和秋季的潜在蒸散分别以 -0.42 mm/a 和 -0.09 mm/a 的速率下降,但只有夏季的变化趋势显著。

空间上,潜在蒸散变化情况的区域差异明显,各站点年平均 ET_0 的变化率在 -6.9 mm/a 到 5.3 mm/a 之间(图 4)。新疆地区的 ET_0 以下降为主,经统计,78.3% 的站表现为减少趋势,其中下降速率较大的区域主要位于塔里木盆地北部,吐鲁番盆地和准格尔盆地西部,达到 -3 mm/a ;只有乌恰、阿克苏等个别站点表现出增加的趋势,但大多并不显著。西北东中部的 ET_0 以上升为主,63.8% 的站点呈增加趋势,其中马鬃山、拐子湖、银川 3 个站点的速率最快,超过了 2 mm/a ,宁夏、青海南部和甘肃南部等地区的上升趋势较显著,而河西走廊西部、柴达木盆地和陕南有较明显的下降趋势。

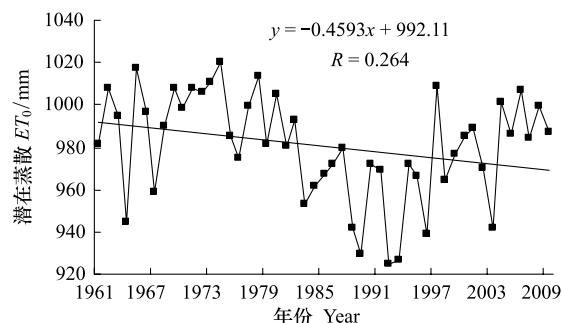


图 3 1961—2009 年西北地区潜在蒸散的变化特征

Fig. 3 Mean yearly variations of potential evapotranspiration in Northwest China during 1961 to 2009

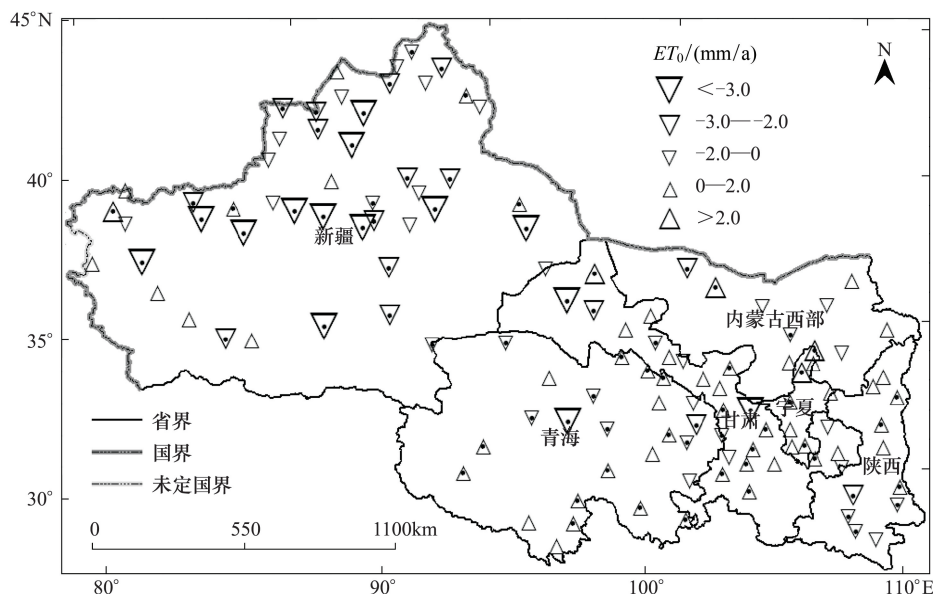


图 4 1961—2009 年西北地区潜在蒸散多年变化的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean yearly variations for potential evapotranspiration in Northwest China during 1961 to 2009

“•”表示通过 95% 显著性检验

春、夏、秋三季 ET_0 变化趋势的空间分布与年平均 ET_0 比较一致,新疆地区以下降为主,3 个季节分别有 71.7%、76.1% 和 76.1% 的站减少;东中部以上升为主,分别有 76.3%、53.8% 和 65.0% 的站增加。但冬季有所不同,整个西北地区 ET_0 呈上升趋势的站点明显增多,已占到总站点的 63.5%。尤其是在新疆, ET_0 上升的站点数已经超过了下降的站点数,而且西北东中部多数站点 ET_0 的下降趋势也没有其他 3 个季节显著。

3.2 气象要素对潜在蒸散变化的贡献

潜在蒸散 ET_0 的变化主要归因于气象因子的变化,因此具体量化分析各要素对 ET_0 变化的贡献。

西北地区平均而言,气温对 ET_0 年变化的贡献为 0.993 mm/a。全区的明显增暖使得气温对 ET_0 的变化几乎在所有站点均为正贡献(图 5)。其中正贡献最大的区域在气温上升较快的内蒙古西部,超过 1.5 mm/a;而正贡献次大区主要集中在准格尔盆地北部、河西走廊和柴达木盆地,在 1 mm/a 到 1.5 mm/a 之间;其他气温上升不显著的地区,其正贡献在 1 mm/a 以下。春、夏、秋、冬四季气温的平均贡献分别为 0.291、0.239、0.195 mm/a 和 0.154 mm/a,贡献的空间分布情况与全年基本一致。

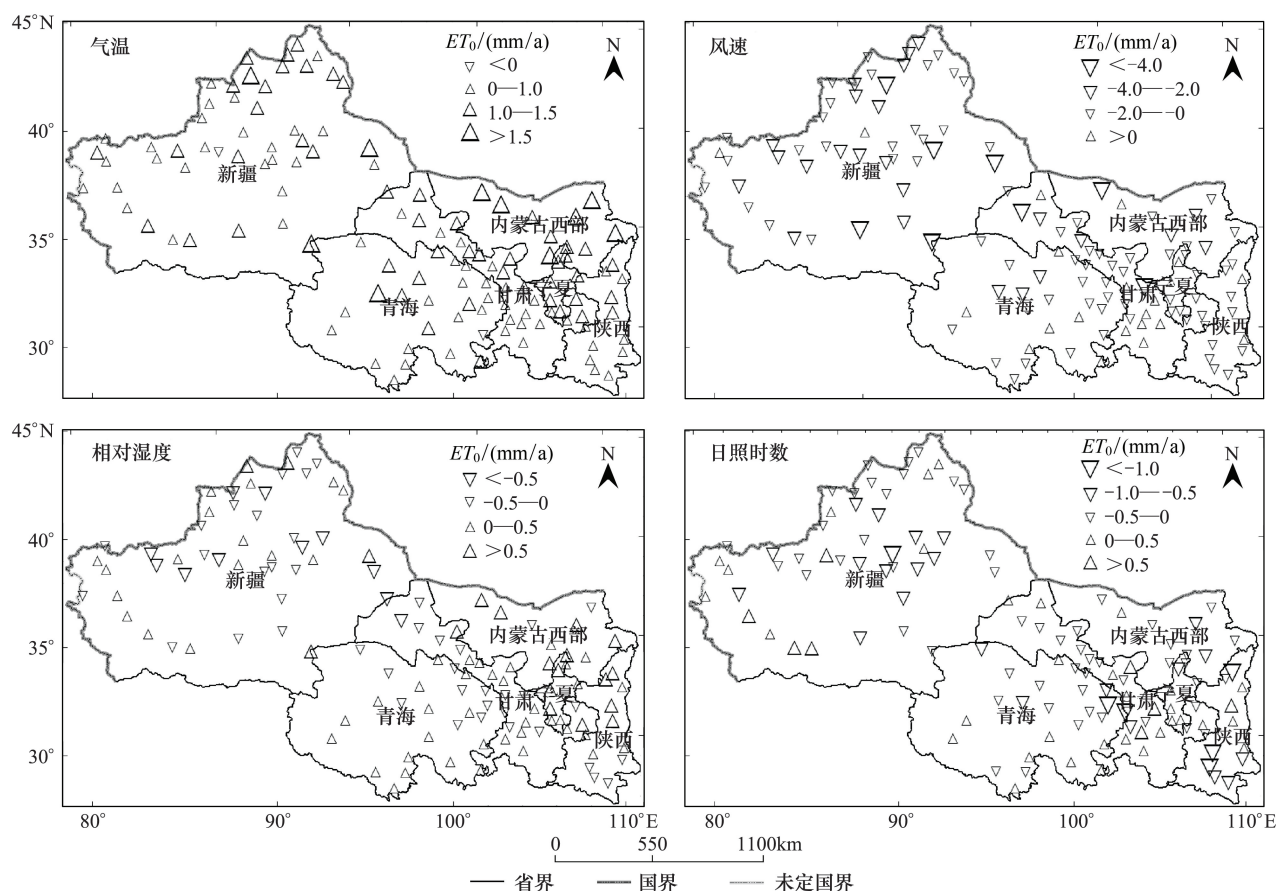


图 5 西北地区不同气象因子对潜在蒸散变化贡献的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the attribution for four climate variables to potential evapotranspiration in Northwest China

风速整体在西北地区对 ET_0 年变化的平均贡献为 -1.299 mm/a,表明风速的显著下降导致 ET_0 的减小。空间上(图 5),有 83.3% 的站点表现为负贡献,其高值区位于准格尔盆地西部、塔里木盆地、柴达木盆地东部和内蒙古西部,超过了 -2 mm/a。正贡献区域的范围较小,仅集中在青海高原、陇中高原和贺兰山区南部,且正贡献的值不大,小于 1.5 mm/a。春、夏、秋、冬四季风速的贡献分别为 -0.39、-0.531、-0.284 mm/a 和 -0.113 mm/a,贡献的空间分布情况与全年基本一致。

相对湿度在西北地区整体上的微弱下降引起 ET_0 的增加,其平均贡献为 0.064 mm/a。空间上(图 5),相对湿度的贡献值正负相间,正贡献区域范围稍大。其中内蒙古西部、宁夏、陕北地区是正贡献的高值区,超过

了 0.5 mm/a , 而塔里木盆地西南部、青海大部、河西走廊东段、陇中高原等地区正贡献较小, 在 0.5 mm/a 以下。负贡献的较大值区位于塔里木盆地西北部、准格尔盆地、河西走廊西段, 在 -1 mm/a 左右, 塔里木盆地东部、青海东北部、陕南等地的负贡献较小, 不超过 -0.5 mm/a 。春、夏、秋、冬四季相对湿度的贡献分别为 0.087 、 0.003 、 0.017 mm/a 和 -0.015 mm/a , 春、夏两季贡献的空间分布情况与全年相似, 秋、冬两季与全年相比存在差异。秋季呈正贡献的区域范围明显扩大, 除了新疆中部和甘肃西部的零星站点为正贡献外, 其它地区均为负贡献。而冬季则恰恰相反, 呈负贡献的站点显著增多, 只有北疆部分地区、青海南部及陕北等地表现为正贡献, 这与冬季相对湿度的普遍增加有关, 从而导致其在西北全区的平均贡献为负值。

日照时数在西北地区对 ET_0 年变化的平均贡献为 -0.198 mm/a , 表明日照时数的下降导致了 ET_0 的减小。空间上 (图 5), 正贡献地区的范围较小, 仅集中在塔里木盆地西南部、青海高原、陇中高原、宁夏南部及关中地区, 且其值大都不超过 1 mm/a 。负贡献较大的区域位于新疆中部、青海北部和陕南地区, 其值在 -1 mm/a 左右, 其它地区的负贡献较小。春、夏、秋、冬四季日照时数的贡献分别为 0.031 、 -0.171 、 -0.018 mm/a 和 -0.022 mm/a , 夏、秋两季贡献的空间分布情况同全年基本一致。春季虽然由于日照时数的整体上升导致其对西北 ET_0 变化的平均贡献为正值, 与全年相反, 但空间分布仍与全年相似。而在冬季, 呈负贡献的站点相较于全年明显增加, 仅在新疆西南部、青海南部等小部分地区为正贡献。

综上所述, 西北地区高山与盆地相间, 沙漠与绿洲共存的特殊地形, 导致气象因子的时空分布很不均匀。因此, 同一要素对 ET_0 变化的贡献在季节上和空间上都存在差异。

3.3 西北地区潜在蒸散变化的主导因子

通过比较气象要素对 ET_0 变化贡献绝对值的大小, 可以判断出哪个要素是 ET_0 变化的主导因子。对于西北地区年平均 ET_0 , 气温和相对湿度引起它上升, 贡献分别为 0.993 mm/a 和 0.064 mm/a , 风速和日照时数引起它下降, 贡献分别为 -1.299 mm/a 和 -0.198 mm/a 。因此可以判断, 风速是年平均 ET_0 变化的首要主导因子, 这与 Thomas^[6], Gao^[7] 和尹云鹤^[8] 等人的研究成果一致。Thomas^[6], Gao^[7] 和尹云鹤^[8] 等同时认为在中国另一影响 ET_0 变化的主导因子是日照时数。但由于本文的研究区域——西北地区的日照时数与全国整体水平相比, 变化不显著, 而该地区气温上升却很明显, 所以对 ET_0 变化所起作用仅次于风速的是气温而非日照时数。由于风速和气温的贡献值符号相反, 作用有一部分相互抵消, 所以西北地区 ET_0 整体上并未表现出较快的变化趋势, 而是以 -0.46 mm/a 的速率缓慢下降。春、夏、秋三季 ET_0 变化的首要主导因子也是风速, 气温的作用次之。冬季是西北地区气候变暖最明显的季节, 因此气温成为该季节 ET_0 变化的首要主导因子。但由于其它 3 个要素均引起冬季 ET_0 的下降, 抵消了大部分气温的正贡献, 使得冬季 ET_0 的增加也很微弱。

西北地区地形和气候的多样性导致潜在蒸散变化的主导因子存在明显空间差异 (图 6)。新疆大部、河西走廊西段、内蒙古西部和青海北部大部分地区位于西风带气候区, 其年平均 ET_0 变化的主导因子是风速, 且 ET_0 多为下降趋势; 而河西走廊东段、青海高原、宁夏、陕北高原等年平均 ET_0 上升地区的主导因子是气温; 在陕南地区、陇中高原中部部分地区, 日照时数成为年平均 ET_0 减少的主导因子。夏季 ET_0 变化主导因子的空间分布特征同全年类似, 其它三季与全年的区别主要存在于陕西地区。春季和秋季在陕西有个别站点的主导因子为相对湿度, 冬季陕南的主导因子为风速而非日照时数。

4 结论与讨论

本文基于 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和 126 个台站 1961—2009 年逐日气象观测资料估算了西北干旱半干旱区的潜在蒸散量 ET_0 , 在对 ET_0 的空间分布特征和时间演变规律进行分析的基础上, 定量探讨了西北地区影响 ET_0 变化的主导因素。主要结论如下:

(1) 49 a 来, 西北地区 ET_0 的年平均值约为 980.63 mm 。其中夏季的值最大, 冬季的值最小。空间上, 年平均 ET_0 的大值区位于西北日照时数的高值中心, 低值区主要位于海拔高, 气温低的山区。

(2) 49 a 来, 西北地区 ET_0 的变化主要归因于风速和气温, 而相对湿度和日照时数的作用较小。由于风速的负贡献超过气温的正贡献, 导致年平均 ET_0 整体上呈下降趋势, 下降最为明显的阶段是 1974—1993 年,

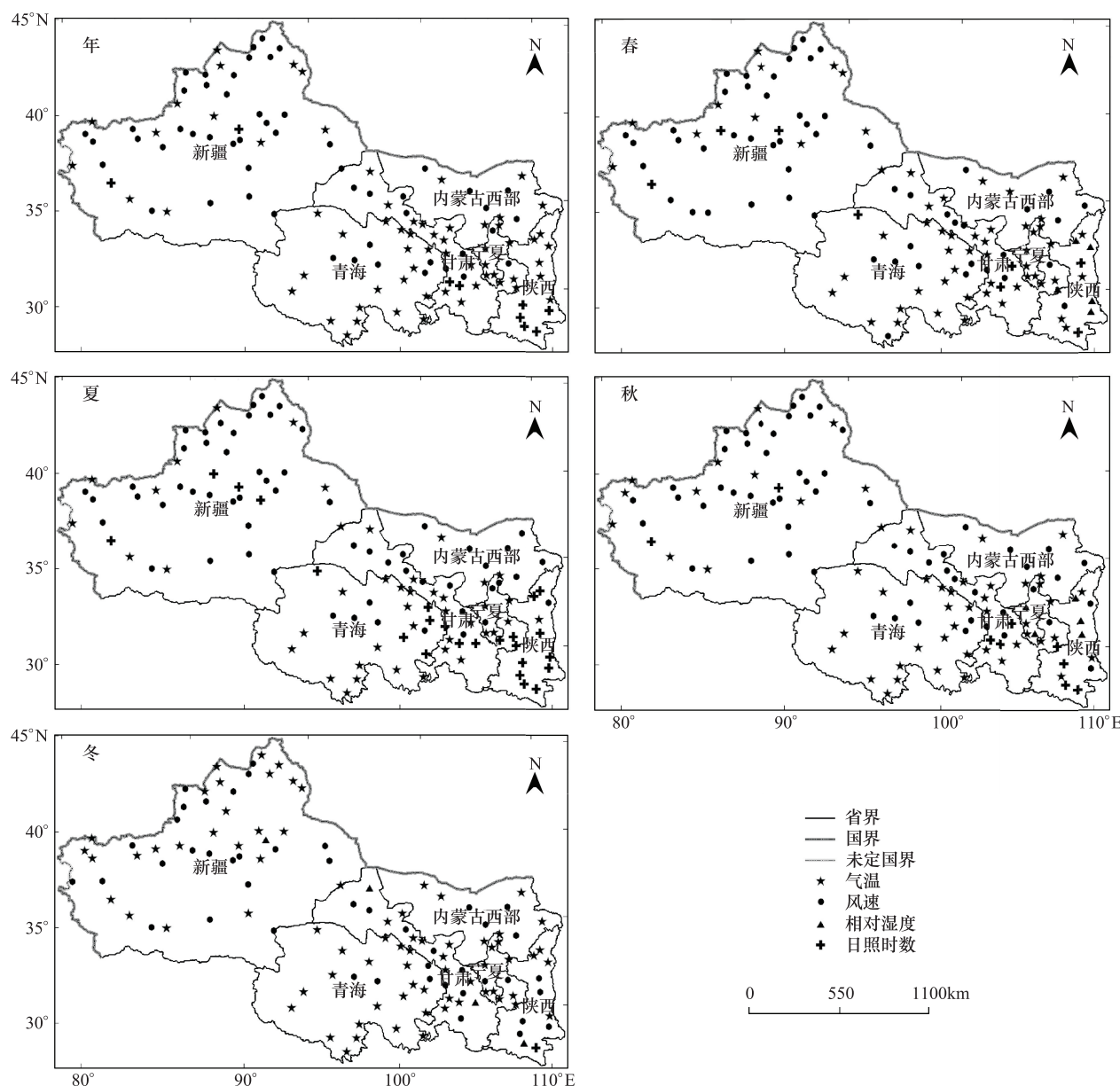


图6 1961—2009年西北地区潜在蒸散变化主导因子的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the dominant factors to potential evapotranspiration in Northwest China during 1961 to 2009

其后略有上升。

(3) 四季中, 春冬两季的 ET_0 缓慢上升, 冬季的速率是春季的两倍; 夏秋两季的 ET_0 有所下降, 但只有夏季的变化趋势显著。风速是春、夏、秋三季 ET_0 变化的首要主导因子, 冬季的首要主导因子是气温。

(4) 空间上, 西风带气候区年平均 ET_0 降低的主要原因是风速的减小, 陕南地区年平均 ET_0 下降的主要原因是日照时数的减少, 其它地区年平均 ET_0 上升的主要原因是气温的增加。夏季 ET_0 变化主导因子的空间分布特征同全年类似, 其它三季与全年的区别主要存在于陕西地区。春季和秋季在陕西有个别站点的主导因子为相对湿度, 冬季陕南的主导因子为风速而非日照时数。

本文立足于定量, 从 Penman-Monteith 公式出发, 对直接影响潜在蒸散变化的气象要素(气温、风速、相对湿度、日照时数)的贡献进行分析。然而还有很多其它因素通过这4个气象因子来间接影响潜在蒸散的变化, 如云量, 气溶胶浓度, 下垫面, 日较差等^[30-33]。有关这些因素影响的讨论目前仍停留在定性的统计关系

上,无法定量考虑。

全球气候变暖背景下,“蒸发悖论^[34]”受到关注。从本文的定量分析来看,气温对潜在蒸散的变化呈正贡献,即单方面考虑气候变暖将导致潜在蒸散的增加,这与人们的预期一致。然而以风速为代表的其它气象要素的负贡献超过了气温引起的正贡献,使得潜在蒸散表现为下降趋势,导致了实际与预期的相悖,即“蒸发悖论”。所以说,潜在蒸散变化是多方面因素共同作用的结果,仅用单个环境因子难以解释潜在蒸散的变化原因。

References:

- [1] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, Yang Q Y. The regional differences of dry-wet change in China in recent 30 years. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(15): 1636-1642.
- [2] Cheng Y F, Wang G X, Xi H Y, Wang J D. Variations of land evapotranspiration in the plain of the middle reaches of Heihe River in the recent 35 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 406-412.
- [3] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation Losing its strength. *Nature*, 1995, 377(6551): 687-688.
- [4] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(1): 55-73.
- [5] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [6] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 381-396.
- [7] Gao G, Chen D L, Ren G Y. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956—2000. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(1): 3-12.
- [8] 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(22): 2226-2234.
- [9] 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.
- [10] Zhang Y Q, Liu C M, Tang Y H, Yang Y H. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112; D12110, doi: 12110.11029/12006JD008161.
- [11] Xu C Y, Gong L B, Jiang T, Chen D L, Singh V P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1/2): 81-93.
- [12] Zhang Q, Hu Y Q, Cao X Y, Liu W M. On some problems of arid climate system of Northwest China. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 357-362.
- [13] Qian Z Y, Chen Z K. Study on Sustainable Development Strategy and Ecological Environment Construction for Water Resource in Northwest China: Analysis of the Supply and Demand Trends of Water Resource in Northwest China. Beijing: Science Press, 2004: 87.
- [14] 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.
- [15] Wang P X, Yang J H, Zhang Q, He J H, Wang D M, Lu D R. Climate change characteristic of Northwest China in recent half century. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(6): 649-656.
- [16] Shi J G, Yan C R, He W Q, Liu K L, Liu Q. Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the Yellow River Basin. *Arid Zone Research*, 2007, 24(6): 773-778.
- [17] Wu W Y, Ma X Q, Chen X Y, Yang T M, Zhang A M. Temporal-spatial variations of reference crop evapotranspiration in Anhui Province in recent 35 years supported by GIS. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 251-256.
- [18] Yang C, Yu J J, Song X F, Xia J, Liu C M. Reference crop evapotranspiration calculation in short interval of mountainous area in North China. *Progress in Geography*, 2004, 23(6): 71-80.
- [19] Huo Z L, Shi H B, Chen Y X, Wei Z M, Qu Z Y. Spatio-temporal variation and dependence analysis of ET_0 in north arid and cold region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(6): 60-63.
- [20] Duan Y H, Tao S, Li B G. Spatial and temporal variation of reference crop evapotranspiration in Beijing. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(2): 22-25.
- [21] 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.
- [22] Zhang F M, Shen S H, Jin Z Q. Evaluation on models for reference crop evapotranspiration. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2009, 29(6): 749-754.
- [23] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage*

Paper 56. Rome: FAO, 1998.

- [24] Tong H L. A climatic calculation method for the evaporation power in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1989, 12(1):19-33.
- [25] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [26] Kendall M G, Gibbons J D. *Rank Correlation Methods*. 5th ed. London: Edward Arnold, 1981.
- [27] Libiseller C. A program for the computation of multivariate and partial Mann-Kendall test. Stockholm: University of Linköping, 2002.
- [28] Zhang J Y, Zhang S L, Wang J X, Li Y. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 230-234.
- [29] Yin Y H, Wu S H, Chen G, Dai E F. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(1/2): 19-28.
- [30] Li C Q, Hong K Q, Li B G. Analysis of temporal-spatial variations of reference evapotranspiration during 1965 and 1999 in Hebei Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(4): 414-419.
- [31] Chen C, Pang Y M, Pan X B, Wang C Y. Analysis on change of reference crop evapotranspiration and climatic influence factors in Sichuan. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(1): 35-40.
- [32] Pu Z C, Zhang S Q. Study on spatial-temporal variation characteristic of summer half year ET_0 in recent 48 years in Xinjiang. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(1): 67-72.
- [33] Zhang S Q, Pu Z C, Song L L, Zhou H K, Song S H. Effect of climate change on potential evapotranspiration in Turpan Region. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(4): 532-537.
- [34] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.

参考文献:

- [1] 尹云鹤, 吴绍洪, 郑度, 杨勤业. 近 30 年我国干湿状况变化的区域差异. *科学通报*, 2005, 50(15): 1636-1642.
- [2] 程玉菲, 王根绪, 席海洋, 王军德. 近 35a 来黑河干流中游平原区陆面蒸散发的变化研究. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 406-412.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [12] 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 刘卫民. 论西北干旱气候的若干问题. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 357-362.
- [13] 钱正英, 陈志恺. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究; 西北地区水资源及其供需发展趋势分析. 北京: 科学出版社, 2004: 87-87.
- [14] 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.
- [15] 王鹏祥, 杨金虎, 张强, 何金海, 王德民, 陆登荣. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征. *地球科学进展*, 2007, 22(6): 649-656.
- [16] 史建国, 严昌荣, 何文清, 刘克礼, 刘勤. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析. *干旱区研究*, 2007, 24(6): 773-778.
- [17] 吴文玉, 马晓群, 陈晓艺, 杨太明, 张爱民. GIS 支持下安徽省近 35a 参考作物蒸散量的时空变化. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 251-256.
- [18] 杨聪, 于静洁, 宋献方, 夏军, 刘昌明. 华北山区短时段参考作物蒸散量的计算. *地理科学进展*, 2004, 23(6): 71-80.
- [19] 霍再林, 史海滨, 陈亚新, 魏占民, 屈忠义. 内蒙古地区 ET_0 时空变化与相关分析. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 60-63.
- [20] 段永红, 陶澍, 李本纲. 北京市参考作物蒸散量的时空分布特征. *中国农业气象*, 2004, 25(2): 22-25.
- [21] 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.
- [22] 张方敏, 申双和, 金之庆. 参考作物蒸散模型对比分析及评价. *气象科学*, 2009, 29(6): 749-754.
- [24] 童宏良. 我国蒸发力计算的气候学方法. *南京气象学院学报*, 1989, 12(1): 19-33.
- [28] 张建云, 章四龙, 王金星, 李岩. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究. *水科学进展*, 2007, 18(2): 230-234.
- [30] 李春强, 洪克勤, 李保国. 河北省近 35 年 (1965—1999 年) 参考作物蒸散量的时空变化. *中国农业气象*, 2008, 29(4): 414-419.
- [31] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 王春艳. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析. *中国农业气象*, 2011, 32(1): 35-40.
- [32] 普宗朝, 张山清. 近 48 年新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化. *中国农业气象*, 2011, 32(1): 67-72.
- [33] 张山清, 普宗朝, 宋良变, 周鸿奎, 宋水华. 吐鲁番地区气候变化对参考作物蒸散量的影响. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 532-537.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 11 June, 2012 (Semimonthly)
CONTENTS

Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province	CAI Wenhua, YANG Jian, LIU Zhihua, et al (3303)
The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River	YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al (3313)
Consume of soil seeds of <i>Betula albo-sinensis</i> and <i>Abies faxoniana</i> in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China	MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3323)
Habitat associations of understorey species spatial distribution in old growth broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) forest	DING Shengjian, ZHANG Chunyu, XIA Fucui, et al (3334)
Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant <i>Caragana</i> species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau	ZHANG Yuanyuan, MA Chengchang, HAN Lei, et al (3343)
Growth dynamics, biomass allocation and ecological adaptation in <i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	QUAN Dujuan, WEI Yan, ZHOU Xiaoqing, et al (3352)
A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series; a case study from Guizhou Province	SHI Hao, WANG Xiao, XUE Jianhui, et al (3359)
Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains	JIANG Lin, GENG Zengchao, LI Shanshan, et al (3368)
Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate	MA Shuqing, WANG Qi, LÜ Houquan, et al (3378)
Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (<i>narG/nosZ</i>) and N ₂ O emission in paddy soil	ZHENG Yan, HOU Haijun, QIN Hongling, et al (3386)
Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China	CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng (3394)
Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin	DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo (3404)
An assessment method of <i>Kandelia obovata</i> population biomass	JIN Chuan, WANG Jinwang, ZHENG Jian, et al (3414)
Quantitative characteristics and species composition of <i>Artemisia sphaerocephala</i> and <i>A. ordosica</i> communities in the Ulanbuh Desert ...	MA Quanlin, ZHENG Qingzhong, JIA Jujie, et al (3423)
Photosynthesis and transpiration in relation to ion accumulation in <i>Vitex trifolia</i> under varied light intensity	ZHANG Ping, LIU Linde, BAI Xinfu, et al (3432)
Diffusion of elm seed rain in Otindag Sand Land	GU Wei, YUE Yongjie, LI Gangtie, et al (3440)
Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of <i>Populus euphratica</i> Oliv.	HE Xinlin, CHEN Shufei, WANG Zhenhua, et al (3449)
Regulation of exogenous nitric oxide on photosynthetic physiological response of <i>Lolium perenne</i> seedlings under NaHCO ₃ Stress	LIU Jianxin, WANG Jincheng, WANG Xin, et al (3460)
Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir	DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al (3467)
Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security	GENG Jianmei, WANG Wenbin, WEN Cuiping, et al (3477)
Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province	CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, et al (3487)
The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitro- gen isotopes	LI Daohong, SU Xiaomei (3497)
Analysis of bacterial diversity in the Songhua River based on nested PCR and DGGE	TU Teng, LI Lei, MAO Guannan, et al (3505)

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China	
.....	HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HUANG Ling, et al (3516)
Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data	YIN Yan, ZHANG Yunlin, SHI Zhiqiang, et al (3528)
Viability and changes of physiological functions in the tiger frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) exposed to cold stress	
.....	WANG Na, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (3538)
Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields	
.....	ZHU Xiangyu, LI Zhiyi, CHANG Liang, et al (3546)
Morphological characteristics and microsatellite DNA genetic diversity of Nigeria African honey bee, Anhui <i>Apis mellifera</i> and theirs hybrid generation II	YU Linsheng, XIE Wenfei, WU Houchang, et al (3555)
Effects of social-demographic factors on the recreational service of park wetlands in Beijing	
.....	LI Fen, SUN Ranhao, CHEN Liding (3565)
Co-integration theory-based analysis on relationships between economic growth and eco-environmental changes: taking the south-east district in Chongqing city as an example	XIAO Qiang, HU Dan, XIAO Yang, et al (3577)
The cooperative environmental game model in the Tidal River Network Regions and its empirical research	
.....	LIU Honggang, CHEN Xingeng, PENG Xiaochun (3586)

Review and Monograph

Review of eco-efficiency accounting method and its applications	YIN Ke, WANG Rusong, ZHOU Chuanbin, et al (3595)
Overview on the 6th international symposium on modern ecology series of 2011	WEN Teng, XU Delin, XU Chi, et al (3606)

Discussion

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin	LIU Xingcai, XU Zongxue, ZHANG Shurong, et al (3613)
--	--

Scientific Note

Effects of different light intensities on activities of the primary defense proteins in needles of <i>Larix gmelinii</i>	
.....	LU Yifang, SHI Lei, YAN Shanchun (3621)
An analysis of photosynthetic parameters among <i>Schima superba</i> provenances	
.....	XIONG Caiyun, ZENG Wei, XIAO Fuming, et al (3628)
Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis	
.....	YANG Zhuoxiang, GAO Yang, ZHAO Zhiqiang, et al (3635)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 11 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 11 (June, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元