

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

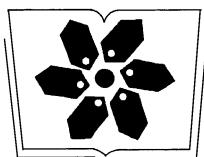
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第3期 Vol.33 No.3 2013

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 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第3期 2013年2月 (半月刊)

目 次

生态系统服务功能模拟与管理

- 保障自然资本与人类福祉:中国的创新与影响 Gretchen C. Daily, 欧阳志云, 郑 华, 等 (669)
建立我国生态补偿机制的思路与措施 欧阳志云, 郑 华, 岳 平 (686)
区域生态合作机制下的可持续农户生计研究——以“稻改旱”项目为例
..... 梁义成, 刘 纲, 马东春, 等 (693)
生态系统服务功能管理研究进展 郑 华, 李屹峰, 欧阳志云, 等 (702)
白洋淀流域生态系统服务评估及其调控 白 杨, 郑 华, 庄长伟, 等 (711)
汶川地震灾区生物多样性热点地区分析 徐 佩, 王玉宽, 杨金凤, 等 (718)
土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例 李屹峰, 罗跃初, 刘 纲, 等 (726)
森林生态效益税对陕西省产业价格水平的影响 黎 洁, 刘峰男, 韩秀华 (737)
海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素 饶恩明, 肖 燮, 欧阳志云, 等 (746)
居民对文化林生态系统服务功能的认知与态度 高 虹, 欧阳志云, 郑 华, 等 (756)
青海省三江源自然保护区生态移民补偿标准 李屹峰, 罗玉珠, 郑 华, 等 (764)
张家界武陵源风景区自然景观价值评估 成 程, 肖 燮, 欧阳志云, 等 (771)
国家生态保护重要区域植被长势遥感监测评估 侯 鹏, 王 桥, 房 志, 等 (780)
都江堰市水源涵养功能空间格局 傅 斌, 徐 佩, 王玉宽, 等 (789)
汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估 彭 怡, 王玉宽, 傅 斌, 等 (798)

前沿理论与学科综述

- “波特假说”——生态创新与环境管制的关系研究述评 董 颖, 石 磊 (809)
生态环境保护与福祉 李惠梅, 张安录 (825)
丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况 王宇涛, 辛国荣, 李韶山 (834)

个体与基础生态

- “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨 蒋 冲, 王 飞, 刘思洁, 等 (844)
内蒙古荒漠草原主要草食动物食性及其营养生态位 刘贵河, 王国杰, 汪诗平, 等 (856)
基于面向对象及光谱特征的植被信息提取与分析 崔一娇, 朱 琳, 赵力娟 (867)
桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等 (876)
枫杨幼苗对土壤水分“湿-干”交替变化光合及叶绿素荧光的响应 王振夏, 魏 虹, 吕 茜, 等 (888)
模拟淹水对杞柳生长和光合特性的影响 赵竑绯, 赵 阳, 张 驰, 等 (898)
梨枣花果期耗水规律及其与茎直径变化的相关分析 张琳琳, 汪有科, 韩立新, 等 (907)
基于上部叶片 SPAD 值估算小麦氮营养指数 赵 舜, 姚 霞, 田永超, 等 (916)

种群、群落和生态系统

- 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量 王卫霞, 史作民, 罗 达, 等 (925)

- 低效柏木纯林不同改造措施对水土保持功能的影响..... 黎燕琼, 龚固堂, 郑绍伟, 等 (934)
浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征..... 张 华, 胡鸿钧, 晁爱敏, 等 (944)
黑龙江凤凰山国家级自然保护区野猪冬季容纳量及最适种群密度 孟根同, 张明海, 周绍春 (957)
云南苍山火烧迹地不同恢复期地表蜘蛛群落多样性..... 马艳滟, 李 巧, 冯 萍, 等 (964)

景观、区域和全球生态

- 基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析 张调风, 张 勃, 王有恒, 等 (975)
基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟 冯仕超, 高小红, 顾 娟, 等 (985)

研究简报

- 三大沿海城市群滨海湿地的陆源人类活动影响模式..... 王毅杰, 俞 慎 (998)
洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素..... 王丽平, 郑丙辉 (1011)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 350 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2013-02



封面图说:卧龙自然保护区核桃坪震后——汶川大地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震, 地震的强度、烈度都超过了 1976 年的唐山大地震。在这次地震中, 震区的野外大熊猫受到不同程度的影响, 卧龙自然保护区繁育中心的赠台大熊猫团团、圆圆居住的屋舍上方巨石垮塌, 房舍全部毁坏, 只因两只熊猫在屋外玩耍逃过一劫。不过, 圆圆一度因惊恐逃走, 失踪 5 天后才被找回来。由于繁育基地两面山体滑坡, 竹子短缺等原因, 繁育基地只能将大熊猫全部转移下山。

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

DOI: 10.5846/stxb201207271069

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):0844-0855.

Jiang C, Wang F, Liu S J, Mu X M, Li R, Liu Y X. Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3):0844-0855.

“蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨

蒋冲¹,王飞^{1,2,*},刘思洁³,穆兴民^{1,2},李锐^{1,2},刘焱序⁴

(1. 西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100;

3. 北京大学遥感与地理信息系统研究所,北京 100871; 4. 陕西师范大学旅游与环境学院,西安 710062)

摘要:潜在蒸散量(ET_0)是大气蒸发的估计值,已经广泛应用于灌溉管理和无实测蒸发资料地区的估算。分析 ET_0 的时空变化是研究水资源对气候变化响应的基础工作,同时对于农业水资源的优化利用也具有重要意义。根据秦岭南北47个气象站1960—2011年逐日数据,利用FAO Penman-Monteith公式计算出各站的潜在蒸散量(ET_0),研究了气温、降水与 ET_0 之间的长期变化趋势关系,对导致 ET_0 下降的主要原因进行了讨论,着重对秦岭南北地区是否存在“蒸发悖论”进行验证。结果表明:(1)秦岭南北整体气温经历了先降后升的变化过程,1993年为突变年份,1960—1993年的降温速率和1994—2011年的升温速率均表现出由南向北递减的规律,1960—2011年整体升温速率由北向南递减。(2)1979年和1993年是 ET_0 变化的转折点,以1979和1993为界 ET_0 经历了“升—降—降”的变化阶段。1960—1979年仅汉水流域和巴巫谷地存在“蒸发悖论”现象,1980—1993、1994—2011和1960—2011年3个时段区域整体和各子区均发现了“蒸发悖论”现象。秋季后18a和52a整体以及冬季前34a和52a整体均存在“蒸发悖论”现象,冬季最为明显。(3)近52年整体降水表现出不显著的下降趋势,相较于年尺度,夏季降水与 ET_0 逆向变化趋势更为明显。(4)年尺度上,太阳辐射(日照时数)下降引起的潜热通量减少是造成 ET_0 下降即“蒸发悖论”现象的主要原因。季节尺度,春季 ET_0 下降的主导因素为风速,其它季节均为太阳辐射(日照时数)。

关键词:秦岭南北;潜在蒸散量;蒸发悖论;气温;降水

Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains

JIANG Chong¹, WANG Fei^{1,2,*}, LIU Sijie³, MU Xingmin^{1,2}, LI Rui^{1,2}, LIU Yanxu⁴

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

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China

4 College of Tourism and Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

Abstract: Potential evapotranspiration (ET_0), as an estimate of the evaporative demand of the atmosphere, it has been widely applied in irrigation management and predictions in ungauged basins. Analysis of ET_0 spatial and temporal variation is the basic research on the impact of climate change on water resources, and is also important to the optimal allocation of agricultural 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 .

基金项目:国家自然科学基金(41171420);中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10502-Z12-9);中荷联合主题研究项目渭河流域水环境问题综合治理对策研究(CJHZ1018)

收稿日期:2012-07-27; **修订日期:**2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wafe@ms. iswc. ac. cn

Northern and southern regions of the Qinling Mountains is far away from oceans, water shortage is a serious problem for agriculture in this area. So far, detailed investigation on the change trend in ET_0 over this area has been lacking. In this study, based on the daily data from 47 meteorological stations in northern and southern regions of the Qinling Mountains between 1960 and 2011, ET_0 was calculated by using FAO Penman-Monteith formula. We analyzed the change trend of ET_0 and air temperature as well as the main factors affecting the decrease of ET_0 . It also discussed the existence of the “evaporation paradox”, the results are as following. (1) Air temperature of the whole region experienced two periods which increased initially and then decreased, 1993 was abrupt change point. The decreasing rate between 1960 and 1993 as well as increasing rate between 1994 and 2011 both presented a pattern that declined from south to north, while increasing rate between 1960 and 2011 decreased from north to south. (2) 1979 and 1993 were the change point of ET_0 , which divided ET_0 into two periods, ET_0 increased from 1960 to 1979 and then decreased from 1993 to 2011. Between 1960 and 1979, “Evaporation paradox” only existed in Han River Basin (HRB) and Bawu Valley (BWV), the periods of 1980—1993, 1994—2011 and 1960—2011 all had “Evaporation paradox” phenomenon. Both the last 18 years and the whole 52 years in autumn as well as the initial 34 years and the whole 52 years in winter had “Evaporation paradox” phenomenon, which was more obvious in winter. (3) Precipitation decreased insignificantly in the past 52 years, and the precipitation and ET_0 exhibited a contrary trend, which accounted 53% in the whole year and 79% in summer, respectively. The contrary trend between precipitation and ET_0 was more obvious in summer than year scale. (4) According to the effect of meteorological elements change on ET_0 change, the order was sunshine hours, wind speed, maximum temperature, relative humidity, mean temperature, mean air pressure and minimum temperature. On the year scale, the significant decrease of solar radiation (sunshine hours) was the dominating factor leading to the decrease of ET_0 . While on the seasonal scale, the dominating factor of spring's ET_0 was wind speed, the other three seasons were all solar radiation (sunshine hours).

Key Words: the northern and southern regions of the Qinling Mountains; potential evapotranspiration; evaporation paradox; air temperature; precipitation

潜在蒸散量(ET_0)是指在一定气象条件下水分供应不受限制时,某一固定下垫面土壤蒸发量和植物蒸腾量的总和,它是实际蒸散量的理论上限,也是计算实际蒸散量的基础,又被称为参考作物蒸散量^[1-4]。由于蒸散过程本身消耗大量能量并且将大量水汽源源不断的输送到大气,因此蒸散在全球水循环和能量平衡中占有非常重要的地位,并且已经被广泛应用于水资源利用和评价、生态环境恶化、农田灌溉用水和地表旱情监测等研究中^[1]。近年来,国内外学者对于 ET_0 的估算方法^[2-4]、时空变化^[1,5-20]及其影响因素^[1,5-20]进行了广泛而深入的讨论。全球变暖已经成为不争的事实,地球表面在过去50a间的升温速率为0.13°C/10a^[21-22]。研究普遍认为温度升高会影响大气中的水汽含量和大气环流,加速近地表空气中水汽分子运动速度,因此在气候变化的研究中也通常会得出 ET_0 随温度而增加的结论。尽管近50年全球温度普遍上升,但众多研究表明不论是 ET_0 (计算值)还是蒸发皿蒸发量(实测值)都表现出下降趋势^[1,5-20]。Roderick等^[23]将全球气温上升而 ET_0 减少的水文气象现象称之为“蒸发悖论”,目前“蒸发悖论”问题已经成为 ET_0 研究中的热点问题^[1],中国的大部分地区也都发现了“蒸发悖论”现象^[5-20]。众多学者对实测蒸发皿蒸发量资料和根据Penman-Monteith公式计算得到的 ET_0 进行了分析,在全国尺度^[5-7]、干旱半干旱地区^[8]、西北地区^[9]、黑河流域^[10]、黄河流域^[11]、渭河流域^[12]、汉江流域^[13]、海河流域^[14]、黄土高原^[15]、青藏高原^[16]、松嫩平原^[17]等地均得出了蒸发皿蒸发量或 ET_0 呈下降趋势的结论。此外,部分学者注意到了与 ET_0 变化密切相关的气象要素的变化(风速减慢、太阳辐射减少等^[5-20])和人类活动(农业灌溉^[6,18]、下垫面变化^[5,9-11]等)的影响。关于“蒸发悖论”的机理目前尚无定论,McVicar^[1]等人认为美国、俄罗斯和印度等地区 ET_0 减小归因于北半球相对湿度的增加及辐射减少;Roderick^[23]等人则认为澳洲和新西兰地区 ET_0 减小是由于南半球云量和气溶胶浓度的增加。对 ET_0 下

降的原因归纳起来包括:云量和气溶胶等污染物的增加引起的太阳辐射下降^[5-20];空气湿度的增加导致的水汽压差减小^[5-6,16];夏季风变化引起的风速下降等^[5-20]。但从全球范围来看,云量或气溶胶增加引起的辐射量下降是 ET_0 下降的主要原因^[1]。

秦岭横亘于中国中部地区,植被类型和气候条件具有明显的南北过渡特点,本区还是南水北调中线工程的水源地,在地理学、生态学、水土保持和水文学等相关学科的研究中具有极其重要的地位。以往对于这一地区的研究大多局限于植被景观类型、旅游资源开发和生态环境保护等^[24],对于气候变化的研究较少^[25-26],少数关于气温、降水等单一要素的分析也局限于陕西境内的关中陕南地区,研究的代表性、覆盖面和时效性明显不足。关于秦岭南北及其周边地区水资源特别是 ET_0 的研究更多的是以流域为单位,即秦岭以北的渭河流域(黄河一级支流)^[11-12,15,20]和汉江流域(长江一级支流)^[13]。但这些研究更多的是以流域水资源为出发点,并没有关注重要地理界线南北 ET_0 的空间分布差异,也没有对不同地理单元以及不同时间尺度(年和季节尺度)是否存在“蒸发悖论”现象及其时空差异进行讨论。虽然目前对于“蒸发悖论”的研究重点已经由单纯分析现象转向了其形成原因的探讨,但是从区域尺度上揭示 ET_0 的时空变化和“蒸发悖论”是否存在及其细节特征对于秦岭南北水资源管理、水利工程设计以及气候变化研究仍具有重要意义。本文利用1960—2011年逐日气象资料,采用目前普遍使用的Penman-Monteith模型计算 ET_0 ,试图通过对比分析过去52a间 ET_0 和气温、降水量的变化趋势,探究秦岭南北是否存在“蒸发悖论”现象及其时空差异。

1 研究区概况

秦岭南北包括4个地理单元(图1^[26]),一是秦岭北坡及其以北的暖温带地区(以下简称“秦岭以北”);二是秦岭南坡,包括伏牛山及其以东平原(因大部分区域属秦岭南坡山地,下简称“秦岭南坡”);三是秦岭以南的汉水谷地、巴山、涢水谷地及淮河上游北亚热带地区(因大部分区域属汉水流域,下简称“汉水流域”);四是巴山南麓、巫山谷地及江汉平原西北部(下简称“巴巫谷地”)^[26]。该区地处暖温带与北亚热带过渡区,是中国气候上的南北分界线。年均气温12—17℃,≥10℃的年积温为3700—4900℃,年均降水量600—1200mm,降水变率大,季节分配不均匀,无霜期200—250d^[24-26]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文使用的是国家气象中心整编的秦岭南北47个气象站1960—2011年的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、日照时数和平均风速等观测资料,分别计算出各站的 ET_0 ,按照3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—次年2月为冬季的原则统计出季节 ET_0 。需要说明的是,日照时数是记录某一地区一天内接受太阳辐射强度大于或等于120 W m⁻²的时间长度,在我国由于日照时数比太阳辐射的观测历史更长,因此在研究太阳辐射的演变趋势及成因分析中被普遍用作其替代指标。

2.2 研究方法

2.2.1 Penman-Monteith公式

采用世界粮农组织(FAO)1998年修正的Penman-Monteith公式^[2-4]计算 ET_0 ,研究表明Penman-Monteith公式计算的 ET_0 在不同的气候条件下都与实测值非常接近^[2-6,9-12]。

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

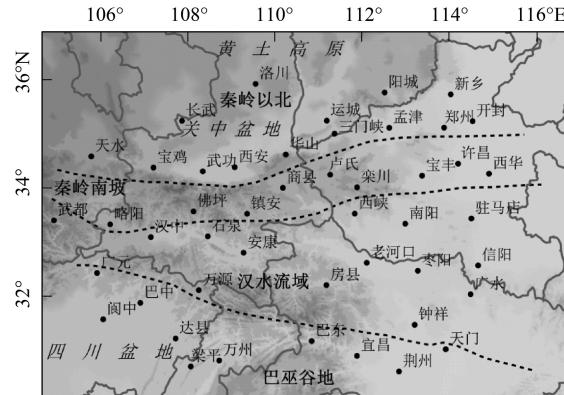


图1 研究区范围及气象观测站点分布^[26]

Fig. 1 Location of the study area and distribution of meteorological stations^[26]

式中, ET_0 为潜在蒸散量(mm/d); R_n 为地表净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为 2m 高处日平均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 为 2m 高处风速(ms^{-1}); e_s 为饱和水气压(kPa); e_a 为实际水汽(kPa); Δ 为饱和水气压曲线斜率(kPa/ $^{\circ}\text{C}$); γ 为干湿表常数(kPa/ $^{\circ}\text{C}$)。我国观测气温、湿度的气象仪器高度一般为 1.5m 左右, 风速感应器(风杯中心)距地高度 10—12m。由于 1.5m 和 2m 高处的气温、湿度相差不大, 在本研究中将 1.5m 和 2m 高处的气温、湿度差别忽略不计, 以常规 1.5m 处的气温、湿度记录近似代替 2m 处的气温、湿度值, 并利用公式(2)订正到 2m 高处的风速:

$$\mu_2 = \mu_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (2)$$

式中, μ_2 为 2 m 高处的风速(m/s); μ_z 为 Z m 高处测量的风速(m/s); Z 为风速计距地面高度(m)。

2.2.2 Pettitt 突变点检验

Pettitt 变点检测方法由 Pettitt 提出, 基于非参数检测一个序列的变点, 计算较简便, 可以明确变化的时间, 能够较好地识别序列分布的突变点, 在变点检测方法中应用较多且物理意义明确^[27], 具体算法参见文献^[27]。

3 结果与分析

3.1 气温和 ET_0 的时空变化及年际“蒸发悖论”现象

秦岭南北不同地区气温变化步调基本一致, 由累积距平曲线(图 2)可知 1993 年是气温变化的转折点, 经 Pettitt 突变检测 1993 年也是气温突变点, 1993 年以前起伏较大, 整体上表现出下降趋势, 1994 年起快速上升。1960—1993 年, 64% (30 个) 的站点气温微弱下降, 各区气温下降的站点所占比例排序为巴巫谷地(80%)>汉水流域(71%)>秦岭以北(57%)>秦岭南坡(44%), 降温速率排序为汉水流域($-0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)=巴巫谷地($-0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭南坡($-0.06^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭南北($-0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭以北($-0.01^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。秦岭以南地区气温下降的站点所占比例和速率均高于秦岭以北, 因此这一地区降温趋势更为明显。1994—2011 年 83% (39 个) 的站点气温上升, 升温的站点所占比例排序为秦岭以北(86%)=汉水流域(86%)>巴巫谷地(80%)>秦岭南坡(78%), 升温速率排序为巴巫谷地($0.13^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭南北($0.07^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>汉水流域($0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭南坡($0.02^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭以北($0.01^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。1960—2011 年秦岭南北所有站点呈升温趋势, 升温速率排序依次为秦岭以北($0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭南北($0.18^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>秦岭南坡($0.17^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>汉水流域($0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)>巴巫谷地($0.14^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 其升温趋势均通过了 0.01 水平的显著性检验。

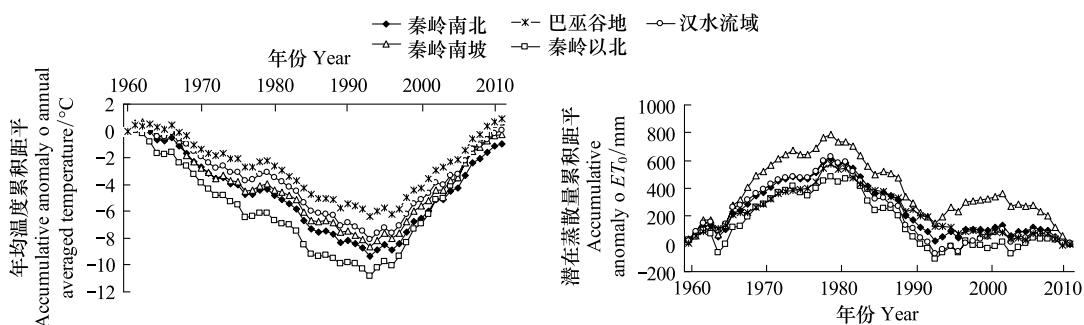


图 2 年平均气温和 ET_0 累积距平

Fig. 2 Curves of accumulative anomalies of annual average temperature and ET_0

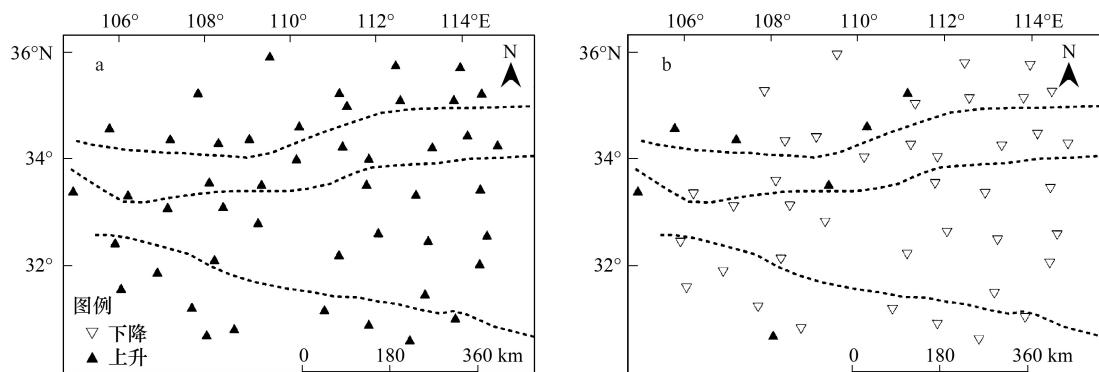
ET_0 的变化分为 3 个阶段, 由累积距平曲线(图 2)和突变检验可知 1979 年既是转折点也是突变点, 1993 年未通过 99% 的突变显著性检验, 因此只是转折点而非突变点, 并分别以 1979 年和 1993 年为分界点划分为 1960—1979、1980—1993 和 1994—2011 共 3 个不同的时段进行分析(表 1)。1979 年以前 ET_0 整体上表现出增加趋势($0.4\text{mm}/10\text{a}$), 1980—1993 年大幅减少($-18.6\text{mm}/10\text{a}$), 1994—2011 年微弱减少($-2.6\text{mm}/10\text{a}$)。1960—1979 年间各子区变化趋势不一, 巴巫谷地($7.0\text{mm}/10\text{a}$)和秦岭以北($5.2\text{mm}/10\text{a}$)增加, 而秦岭南坡($-7.1\text{mm}/10\text{a}$)和汉水流域($-3.7\text{mm}/10\text{a}$)减少, 其中秦岭以北和秦岭南坡 ET_0 与同一时期气温变化趋势相

同,而汉水流域和巴巫谷地则相反,表现出“蒸发悖论”现象;1980—1993年81%(38个)的站点 ET_0 减少,各子区减少速率排序为秦岭以北(-33.0mm/10a)>汉水流域(-20.2mm/10a)>秦岭南坡(-14.2mm/10a)>巴巫谷地(-6.8mm/10a),全部存在“蒸发悖论”现象;1994—2011年秦岭南北气温大幅上升,而 ET_0 则减少,各区下降速率排序依次为秦岭南坡(-63.1mm/10a)>秦岭南北(-26.5mm/10a)>汉水流域(-23.6mm/10a)>秦岭以北(-16.8mm/10a)>巴巫谷地(-2.4mm/10a)。另外,由于前人众多研究是将过去50年整体作为研究对象,本文为了方便与之对比,也将1980—2011和1960—2011两个时间段单独整理分析。1980—2011年研究区整体和各个子区 ET_0 与气温呈同向变化趋势,而1960—2011年则与之相反,发现了明显的“蒸发悖论”现象。除了时间变化趋势之外,研究“蒸发悖论”的空间分布特征也很有必要,限于篇幅问题本文只列举1960—2011年间气温和 ET_0 变化的空间分布(图3)。存在“蒸发悖论”现象的站点比例高达85%(40个),两者呈同向变化趋势的站点零星分布于各个子区,且升温趋势均不显著。

表1 不同时段 ET_0 和气温变化趋势Table 1 Change trend of ET_0 and temperature in different periods

时段 Periods	指标 Factors									
	$ET_0/(mm/10a)$					气温 Temperature/(°C/10a)				
	NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ	NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ
1960—1979	5.2↑	-7.1↓	-3.7↓	7.0↑	0.4↑	0.1↑	-0.01↓	0.01↑	-0.05↓	0.01↑
1980—1993	-33.0↓	-14.2↓	-20.2↓	-6.8↓	-18.6↓	0.2↑	0.01↑	0.1↑	0.2↑	0.1↑
1994—2011	-16.8↓	-63.1↓	-23.6↓	-2.4↓	-26.5↓	0.1↑	0.02↑	0.1↑	0.1↑	0.1↑
1980—2011	16.4↑	4.6↑	19.0↑	10.4↑	12.6↑	0.5↑	0.4↑	0.4↑	0.4↑	0.4↑
1960—2011	-6.6↓	-16.7↓	-9.6↓	-9.9↓	-10.7↓	0.3↑	0.2↑	0.2↑	0.1↑	0.2↑

NRQ: 秦岭以北 northern region of Qinling Mountains; SSQ: 秦岭南坡 southern slope of Qinling Mountains; HRB: 汉水流域 Han River Basin; BWV: 巴巫谷地 Bawu Valley ; SNQ: 秦岭南北 northern and southern regions of Qinling Mountains

图3 年平均气温(a)与 ET_0 (b)变化趋势的空间分布Fig.3 Spatial distribution of annual average temperature (a) and ET_0 (b) change trend

3.2 “蒸发悖论”的季节分布

为了进一步分析季节尺度上气温和 ET_0 变化的差异,以1979和1993年为分界点,分别计算各子区不同时段气温和 ET_0 的均值、气候倾向率及其显著性检验值(表2)。1960—2011年,研究区整体除夏季不显著降温(-0.02°C/10a)外,其它3个季节均呈升温趋势,按增温速率大小排序为春季(0.26°C/10a)>冬季(0.22°C/10a)>秋季(0.20°C/10a),各子区的变化规律与研究区整体基本一致。 ET_0 方面,除春季(2.3mm/10a)呈增加趋势外,其余3个季节均减少,按递减速率大小排序为夏季(-11.1mm/10a)>冬季(-1.1mm/10a)>秋季(-0.6mm/10a),以上分析表明各季节“蒸发悖论”现象的规律存在差异。

分别对比1960—1979、1980—1993和1994—2011年3个时间段内温度和 ET_0 的变化趋势(表2)。春季,研究区整体和各子区在不同时段的气温和 ET_0 的气候倾向率均表现出同向变化趋势,前20年(1960—1979)

表2 不同时段季节平均气温和 ET_0 变化趋势Table 2 Change trend of seasonal average temperature and ET_0 in different periods

季节 Season	时间段 Periods	指标 Factors	气温 Temperature/℃					ET_0/mm				
			NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ	NRQ	SSQ	HRB	BWV	SNQ
春季 Spring	1960—1979	平均	12.7	13.4	15.1	16.6	14.5	308.6	292.2	278.3	260.5	284.9
		倾向率	0.1	0.03	0.1	0.1	0.03	2.0	1.1	0.9	0.1	1.0
	1980—1993	平均	12.6	13.2	15.0	16.4	14.3	294.4	274.3	268.8	256.3	273.5
		倾向率	-0.5	-0.6*	-0.5*	-0.3*	-0.5*	-33.5**	-29.2**	-27.7**	-19.1**	-27.4**
	1994—2011	平均	14.0	14.4	16.1	17.3	15.4	324.2	297.0	293.0	264.5	294.7
		倾向率	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	18.3	0.5	11.2	8.6	9.4
	1980—2011	平均	13.4	13.9	15.6	16.9	14.9	311.2	287.1	282.4	260.9	285.4
		倾向率	0.7**	0.5**	0.6**	0.5**	0.6**	14.2*	8.0*	10.9*	3.7*	9.2*
	1960—2011	平均	13.1	13.7	15.4	16.8	14.8	310.2	289.0	280.9	260.8	285.2
		倾向率	0.3**↑	0.2*↑	0.3**↑	0.2*↑	0.3*↑	4.1↑	0.5↑	3.7↑	1.0↑	2.3↑
夏季 Summer	1960—1979	平均	24.2	24.3	26.1	26.8	25.3	437.6	411.8	422.6	407.4	419.9
		倾向率	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.8	-9.0	-6.8	-3.1	-3.0
	1980—1993	平均	23.5	23.5	25.2	26.1	24.6	391.7	362.1	368.6	367.3	372.4
		倾向率	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	7.9	11.3	4.3	3.8	6.8
	1994—2011	平均	24.4	24.3	26.0	26.8	25.4	402.8	373.1	384.5	373.0	383.4
		倾向率	-0.2	-0.3	-0.2	0.0	-0.2	-26.8**	-35.5**	-22.2*	-10.9*	-23.8**
	1980—2011	平均	24.0	24.0	25.6	26.5	25.0	397.9	368.3	377.6	370.5	378.6
		倾向率	0.4**	0.3*	0.3*	0.3*	0.3**	1.0	0.3	3.7	1.1	1.4
	1960—2011	平均	24.0	24.1	25.8	26.6	25.1	413.2	385.0	394.9	384.7	394.5
		倾向率	-0.03↓	-0.04↓	-0.06↓	-0.01↓	-0.02↓	-10.6**↓	-12.5**↓	-11.8**↓	-9.7**↓	-11.1**↓
秋季 Autumn	1960—1979	平均	12.1	13.2	15.5	17.2	14.5	191.0	187.1	194.6	191.9	191.1
		倾向率	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	10.4	6.6	6.3	6.0	7.3
	1980—1993	平均	12.4	13.3	15.6	17.3	14.6	190.6	180.5	185.1	182.4	184.7
		倾向率	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	5.3	13.2*	11.7*	11.0*	10.3*
	1994—2011	平均	13.0	13.9	16.2	17.9	15.2	191.9	180.3	192.7	189.9	188.7
		倾向率	0.1↑	0.2↑	0.1↑	0.3↑	0.2↑	-9.6↓	-19.1*↓	-12.3*↓	-2.7↓	-10.9*↓
	1980—2011	平均	12.7	13.7	15.9	17.6	15.0	191.3	180.4	189.4	186.6	186.9
		倾向率	0.3↑	0.3↑	0.3↑	0.4*↑	0.3*↑	0.7↑	-2.4↑	2.3↑	3.9↑	0.8↑
	1960—2011	平均	12.5	13.5	15.8	17.5	14.8	191.2	183.0	191.4	188.6	188.6
		倾向率	0.2*↑	0.2*↑	0.2*↑	0.2*↑	0.2*↑	-0.5↓	-2.0↓	-0.5↓	-0.2↓	-0.6↓
冬季 Winter	1960—1979	平均	-0.7	1.6	3.9	6.2	2.7	109.6	113.6	107.7	98.2	107.3
		倾向率	0.3↑	0.2↑	0.1↑	0.1↑	0.2↑	-5.0↓	-3.1↓	-3.0↓	-0.9↓	-3.0↓
	1980—1993	平均	-0.1	1.8	4.0	6.3	3.0	103.7	106.1	101.0	93.6	101.1
		倾向率	0.8*↑	0.7*↑	0.6*↑	0.6*↑	0.7*↑	-9.7↓	-5.1↓	-6.2↓	-2.5↓	-5.9↓
	1994—2011	平均	0.7	2.5	4.8	6.9	3.7	107.0	108.9	107.4	96.3	104.9
		倾向率	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-1.9	-7.1	-0.5	-0.5	-2.2
	1980—2011	平均	0.3	2.2	4.4	6.6	3.4	105.5	107.6	104.5	95.1	103.2
1960—2011		倾向率	0.4	0.4*	0.4*	0.3*	0.4*	0.4	0.3	2.4	1.2	0.9
	平均	-0.1	2.0	4.2	6.5	3.1	107.1	109.9	105.8	96.3	104.8	
		倾向率	0.4*↑	0.3*↑	0.3*↑	0.2*↑	0.3*↑	-1.4↓	-1.9↓	-0.5↓	-0.7↓	-1.1↓

** 0.01 显著水平 0.01 significant level; * 0.05 显著水平 0.05 significant level

呈微弱升温趋势,中间 14a(1980—1993)显著降温,而后 17a(1994—2011)增加幅度明显大于前 20a,两个时段平均值相差 0.4℃。 ET_0 也经历了“升—降—升”的变化过程,后 17a(1994—2011)增加幅度明显大于前 20a,两个时段平均值相差 9.8mm。由图 4(a,b)可知,1960—2011 年研究区 47 个站点中只有 32% (15 个) 的

站点气温和 ET_0 存在相反的变化趋势,即存在“蒸发悖论”现象,各个子区表现出的变化规律与研究区整体基本一致;夏季,研究区整体在前20a呈现出不显著的降温趋势,中间14a微弱升温,而后32a又微弱降温。 ET_0 与气温基本呈同向变化趋势,经历了“降—升—降”的变化过程,区域整体未发现“蒸发悖论”现象。但研究区有36%(17个)站点存在“蒸发悖论”现象,空间分布无明显规律[如图4(c,d)];秋季,前20a和中间14a气温和 ET_0 均表现出上升趋势,但均未达到0.05以上的显著水平,后17a气温继续上升,但增温速率明显快于前34a,与气温形成对比的是 ET_0 在后17a呈现出下降趋势。52a整体气温表现出0.05显著水平上升趋势,而 ET_0 不显著下降,也呈现出“蒸发悖论”现象。空间分布上[图4(e,f)],57%(27个)的站点存在“蒸发悖论”现象,均匀分布于整个区域;冬季,研究区整体和各子区气温经历了“升—升—降”的变化过程,中间14a的增温速率要明显快于前20a,两时段平均值相差0.3°C,而这2个时段的 ET_0 则保持下降趋势,近52a整体以亦是如此,即表现出“蒸发悖论”现象。由图4(g,h)可知,64%(30个)的站点存在“蒸发悖论”现象。

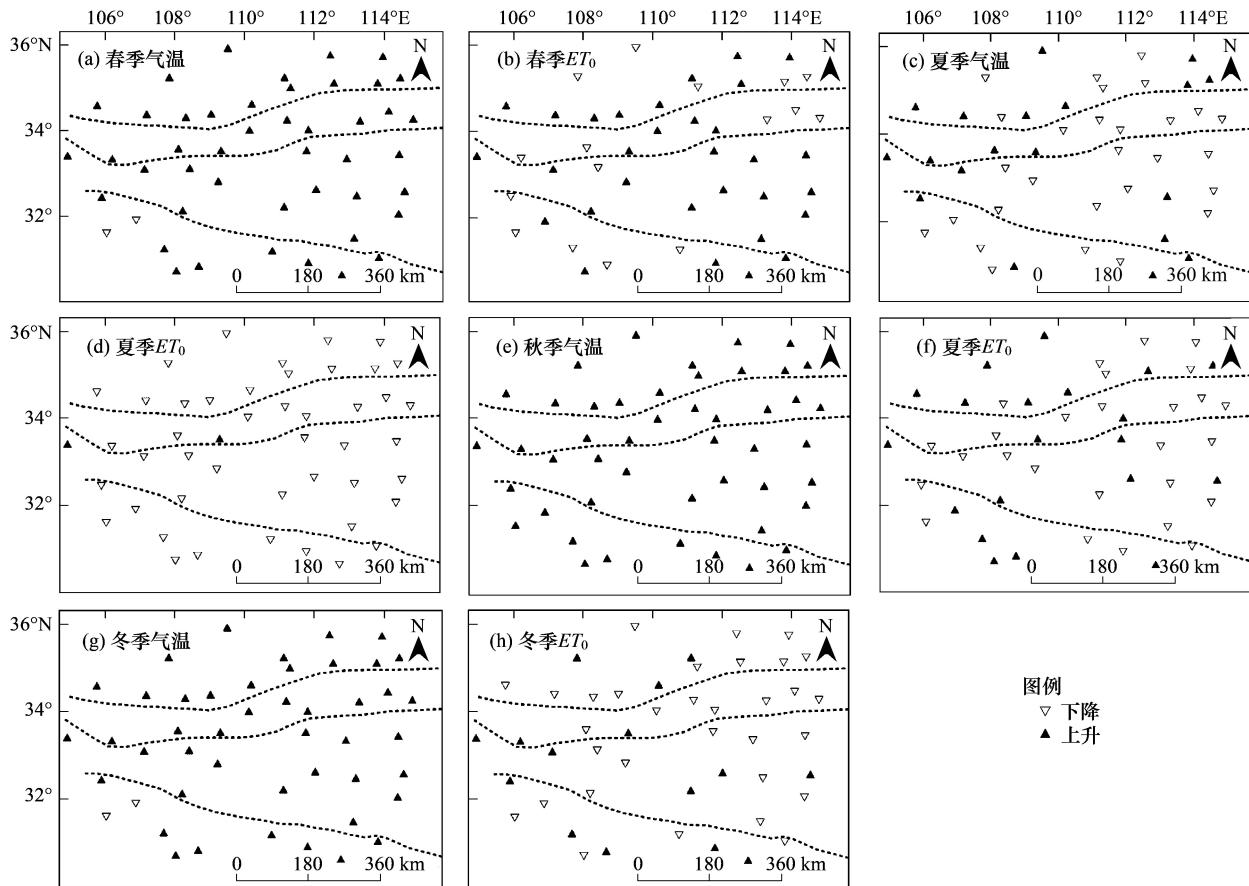


图4 季节平均气温和 ET_0 变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of seasonal average temperature and ET_0 change trend

3.3 ET_0 与降水的关系

降水与蒸发是水文循环中的两个重要环节,根据Budyko假设,在能量条件不变时,随降水的增加, ET_0 将有所下降。秦岭南部分地区雨热同期,高温与降水集中于夏秋季节,降水的多寡影响 ET_0 ,因此有必要就降水与 ET_0 之间的关系进行分析。由于研究区域地形较为复杂,高大山脉阻隔作用明显,大气环流和季风环流影响复杂,降水的季节分配极不均匀,表现出冬春少,夏秋多的特征。因此,本文主要分析降水年际和夏秋两季变化,最后对降水和 ET_0 之间的变化趋势进行分析。1993年是降水变化的突变点,1960—1993年间70%以上的站点降水减少,1994—2011年70%以上站点的降水增多。近52年来,部分地区降水表现出不显著的下降趋势,且区域特征明显(图5)。年尺度上,降水与 ET_0 变化呈相反变化趋势的站点占53%(25个),

夏季为 79% (37 个), 秋季则达到 45% (21 个), 相较于年尺度, 夏季降水与 ET_0 逆向变化趋势更为明显。

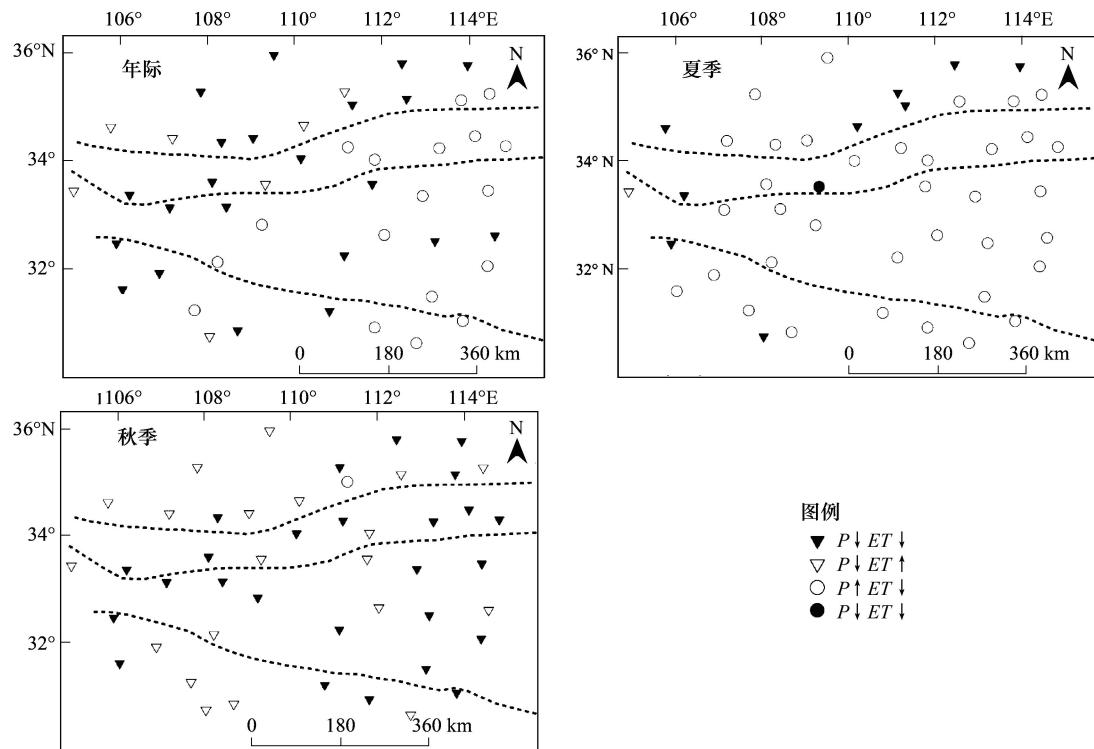


图 5 年度和夏秋两季降水和 ET_0 变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of precipitation and ET_0 change trend in summer and autumn

3.4 “蒸发悖论”原因分析

如前文所述, 秦岭南北地区存在“蒸发悖论”现象, 这与国内外同类研究^[1-20]的结论基本一致。但影响 ET_0 变化的气象因子有很多, 包括动力学因素(风速)、热力学因素(平均气温、最高气温和最低气温)和水汽条件(相对湿度)等, 上述各因子之间相互影响, 其间互作机理复杂, 单一因子的变化以及多因素的综合作用都可能导致 ET_0 发生变化, 因此很有必要对这一地区 ET_0 下降的内在原因进行研究。选取平均气压(P)、最高温度(T_{\max})、最低温度(T_{\min})、日照时数(H)、相对湿度(RH)和平均风速(V)6 个气象要素, 通过相关分析和回归分析来研究各气象要素对 ET_0 的影响, 分析结果见表 3。

从各站 ET_0 和气象要素的相关系数来看, ET_0 与日照时数、平均气温、最高气温、最低气温和平均风速呈正相关关系, 而与平均气压和相对湿度负相关。日照延长、温度升高和风速增加都会导致 ET_0 增加, 而气压和湿度的上升则会对 ET_0 的上升起到负向作用。在各个要素中, 除最低气温以外其它要素与 ET_0 的相关关系均达到了 0.05 以上的显著水平, 秦岭南北整体按各要素影响大小排序依次为日照时数>平均风速>最高气温>相对湿度>平均气温>平均气压>最低气温。其中, ET_0 与日照时数的相关关系最好, 变化范围介于 0.507—0.914, 均通过了 0.01 水平的显著性检验。年尺度上, 通过 ET_0 与各气象因子的相关分析和多元回归分析比对发现, 日照时数的变化是影响秦岭南北地区 ET_0 变化的主导因素, 其贡献率普遍高于 60%, 因此太阳辐射(日照时数)的减少是造成 ET_0 下降即“蒸发悖论”现象的主要原因。但是从季节尺度上看, 导致 ET_0 下降的主导因子并不相同。春季, 风速为主导因子, 其次为相对湿度; 夏季, 日照时数为主导因子, 其次为风速和相对湿度; 秋季, 日照时数仍然为主导因子, 风速为次要因子; 冬季, 日照时数起主要作用, 其次为气温。总体上看, 各个气象要素对 ET_0 的影响程度不同, 日照、风速、湿度和气温是主要因素, 而气压和最低气温起到的作用相对较小。

表3 典型站点 ET_0 与气象要素的相关系数及主次排序
Table 3 Correlation coefficient and sequence of the main influencing factors between annual ET_0 and each climate factor at the typical stations

站点 Stations	日照时数 Sunshine hours (H)	平均气压 Air pressure (P)		平均气温 Mean temperature (T)		最低气温 Minimum temperature (T_{\min})		相对湿度 Relative humidity (RH)		平均风速 Wind speed (V)		影响因子排序 Impact factors (V)
		最高气温 Maximum temperature (T_{\max})	最低气温 Minimum temperature (T_{\min})	相对湿度 Relative humidity (RH)	平均风速 Wind speed (V)							
安康	0.860 ***	-0.456 **	0.678 **	0.732 **	0.338 *	-0.746 **	-0.746 **	0.703 ***	0.703 ***	0.703 ***	$H, RH, T_{\max}, V, T, P, T_{\min}$	
宝丰	0.834 ***	-0.450 **	0.341 *	0.544 **	-0.086	-0.775 **	-0.775 **	0.807 ***	0.807 ***	0.807 ***	$H, V, RH, T_{\max}, P, T, T_{\min}$	
房县	0.853 ***	-0.212	0.569 ***	0.685 ***	0.192	-0.559 **	-0.559 **	0.546 ***	0.546 ***	0.546 ***	$H, T_{\max}, V, T, RH, P, T_{\min}$	
佛坪	0.802 ***	-0.559 ***	-0.071	0.280 *	-0.321 *	-0.838 **	-0.838 **	0.610 ***	0.610 ***	0.610 ***	$RH, H, V, P, T_{\min}, T_{\max}, T$	
汉中	0.721 **	-0.403 **	0.448 **	0.682 **	0.034	-0.578 **	-0.578 **	0.569 ***	0.569 ***	0.569 ***	$H, T_{\max}, RH, V, T, P, T_{\min}$	
华山	0.810 ***	0.479 **	0.729 **	0.741 **	0.635 **	-0.786 **	-0.786 **	0.388 ***	0.388 ***	0.388 ***	$H, RH, T_{\max}, T, T_{\min}, P, V$	
老河口	0.507 ***	-0.495 **	0.555 **	0.793 ***	0.229	-0.661 **	-0.661 **	0.556 ***	0.556 ***	0.556 ***	$T_{\max}, RH, V, T, H, P, T_{\min}$	
卢氏	0.827 **	-0.408 **	0.522 **	0.475 **	0.007	-0.417 **	-0.417 **	0.518 ***	0.518 ***	0.518 ***	$H, T, V, T_{\max}, RH, P, T_{\min}$	
栾川	0.699 ***	-0.254	0.661 **	0.677 **	0.421 **	-0.619 **	-0.619 **	0.671 ***	0.671 ***	0.671 ***	$H, T_{\max}, V, T, RH, T_{\min}, P$	
略阳	0.863 ***	-0.426 **	0.511 **	0.645 **	0.177	-0.738 **	-0.738 **	0.580 ***	0.580 ***	0.580 ***	$H, RH, T_{\max}, V, T, P, T_{\min}$	
孟津	0.656 **	-0.027	0.480 **	0.678 **	0.089	-0.617 **	-0.617 **	0.351 *	0.351 *	0.351 *	$T_{\max}, H, RH, T, V, T_{\min}, P$	
南阳	0.850 ***	-0.563 **	0.347 *	0.685 **	-0.095	-0.561 **	-0.561 **	0.705 ***	0.705 ***	0.705 ***	$H, T_{\max}, P, RH, T, T_{\min}$	
三门峡	0.867 ***	0.483 **	0.278 *	0.336 *	-0.073	-0.662 **	-0.662 **	0.671 ***	0.671 ***	0.671 ***	$H, V, RH, P, T_{\max}, T, T_{\min}$	
商县	0.806 **	-0.273	0.623 **	0.582 **	0.162	-0.827 **	-0.827 **	0.673 ***	0.673 ***	0.673 ***	$RH, H, V, T, T_{\max}, P, T_{\min}$	
石泉	0.914 ***	-0.369 **	0.642 **	0.662 **	0.125	-0.726 **	-0.726 **	0.602 **	0.602 **	0.602 **	$H, RH, T_{\max}, T, V, P, T_{\min}$	
天水	0.815 ***	-0.417 **	0.399 **	0.589 **	0.173	-0.566 **	-0.566 **	0.579 ***	0.579 ***	0.579 ***	$H, T_{\max}, V, RH, P, T_{\min}, T, T_{\min}$	
万源	0.846 **	-0.434 **	0.572 **	0.494 **	0.462 **	-0.745 **	-0.745 **	0.554 ***	0.554 ***	0.554 ***	$H, RH, T, V, T_{\max}, T_{\min}, P$	
武都	0.766 **	-0.402 **	0.700 **	0.723 **	0.626 **	-0.694 **	-0.694 **	0.800 ***	0.800 ***	0.800 ***	$V, H, T_{\max}, T, RH, T_{\min}, P$	
西峡	0.805 ***	-0.448 **	0.668 **	0.800 **	0.231	-0.713 **	-0.713 **	0.566 ***	0.566 ***	0.566 ***	$H, T_{\max}, RH, T, V, P, T_{\min}$	
枣阳	0.876 **	-0.433 **	0.066	0.435 **	-0.307 *	-0.462 **	-0.462 **	0.657 ***	0.657 ***	0.657 ***	$H, V, RH, T_{\max}, P, T_{\min}, T$	
镇安	0.873 **	-0.019	0.397 **	0.454 **	0.150	-0.531 **	-0.531 **	0.453 ***	0.453 ***	0.453 ***	$H, RH, T_{\max}, V, T, T_{\min}, P$	
郑州	0.576 ***	-0.386 **	0.001	0.330 *	-0.257	-0.331 *	-0.331 *	0.542 ***	0.542 ***	0.542 ***	$H, V, P, RH, T_{\max}, T_{\min}, T$	
钟祥	0.731 ***	-0.445 **	0.237	0.539 **	-0.075	-0.515 **	-0.515 **	0.523 ***	0.523 ***	0.523 ***	$H, T_{\max}, V, RH, P, T, T_{\min}$	

* * 0.01 显著水平0.01 significant level, * 0.05 显著水平0.05 significant level

由有上述分析可知,年和季节 ET_0 的主要影响因素为日照时数和风速,因此这一部分对这两个要素进行详细分析。据计算,近 52 年秦岭南北 89% 的站点日照时数呈下降趋势,且部分站点达到 0.05 及以上的显著水平。下降站点所占比例排序为巴巫谷地(100%)>汉水流域(93%)>秦岭以北(84%)>秦岭南坡(78%),秦岭以南的广大地区相对于秦岭以北而言下降更明显。季节尺度,按下降站点所占比例排序依次为夏季(98%)>冬季(94%)>秋季(77%)>春季(53%)。另外,研究区整体和各子区日照时数的突变年份均位于 1979 年前后,与 3.1 部分分析得出的 ET_0 的突变时间基本一致,也从侧面印证了日照时数为 ET_0 主导因素的结论。太阳辐射作为地球上所有生命过程的初级能量来源,深刻影响着大气、水循环以及生态系统。自 20 世纪 50 年代以来,世界大部分地区太阳辐射出现下降趋势,即全球变化研究热点之一的“全球变暗”现象,到达地表的太阳辐射减少会削减蒸发所需的潜热通量,减缓地表水循环过程,目前这一效应也被广泛用来解释在“全球变暖”的背景下出现的蒸发皿蒸发量和 ET_0 的下降趋势。风速方面,各区风速减小速率排序为秦岭南坡($-0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$)>秦岭以北($-0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$)>秦岭南北($-0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$)>巴巫谷地($-0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$)>汉水流域($-0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$),减小趋势均达到了 0.001 以上的显著水平,下降的站点所占比例排序为秦岭南坡(100%)>秦岭以北(86%)>汉水流域(69%)>巴巫谷地(64%)。季节尺度上,风速减小速率排序为冬季($-0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$)>春季($-0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$)>秋季($-0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$)>夏季($-0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$),下降的站点所占比例排序为冬季(83%)>春季(77%)>秋季(76%)>夏季(70%)。年和季节尺度风速的突变集中出现在 1969—1974、1978—1981 和 1990—1994 年间,秦岭南北整体于 1981 年突变,这一时间点与 ET_0 的突变时间也较为接近。由上述分析可知,秦岭南北 ET_0 的变化趋势和“蒸发悖论”的空间分布规律与风速和日照时数并不完全一致,这主要是因为 ET_0 变化是包括风速、日照辐射和气温在内的多种气象要素综合作用的结果,而其中某一主导因素的变化又起到了关键性的作用,其它因子则因其与 ET_0 关系的紧密程度和其本身变化趋势起到增加或抵消趋势的作用。另外,研究区整体和各子区气温和降水的突变时间也都位于 1993 年,与 ET_0 发生转折(非突变)的时间相一致,二者的共同作用也导致 ET_0 于 1993 年前后发生转变。

4 结论

(1) 秦岭南北地区年均气温呈两段式变化特点,1993 年是突变点,此前缓慢下降,1994 年起快速升温。1960—1993 年的降温速率和 1994—2011 年的升温速率均表现出由南向北递减的规律,1960—2011 年整体升温速率由北向南递减。

(2) 1979 年和 1993 年是秦岭南北 ET_0 变化的转折点,以 1979 和 1993 为分界点 ET_0 经历了“升—降—降”的变化阶段。1960—1979 年仅汉水流域和巴巫谷地存在“蒸发悖论”现象,1980—1993、1994—2011 和 1960—2011 年 3 个时段区域整体和各子区均发现了“蒸发悖论”现象,而其他时段则不存在。

(3) 春季和夏季秦岭南北和各子区整体在不同时段均未发现“蒸发悖论”现象,秋季在后 18a 和 52a 整体都存在“蒸发悖论”,冬季在前 34a 和 52a 整体也存在,冬季的悖论现象最为明显。

(4) 1993 年是降水变化的突变点,呈现由减少到增多的转变,近 52a 整体降水表现出不显著的下降趋势。年尺度上,降水与 ET_0 变化呈相反趋势的站点占 53%,夏季和秋季分别为 79% 和 45%。

(5) 各要素对 ET_0 的影响大小排序为日照时数>平均风速>最高气温>相对湿度>平均气温>平均气压>最低气温。年尺度上,太阳辐射(日照时数)下降引起的潜热通量减少是造成 ET_0 下降即“蒸发悖论”现象的主要原因。季节尺度上,除春季 ET_0 的主导因素为风速外,其它季节均为太阳辐射(日照时数)。

References:

- [1] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Li L T, Van Niel T G, Thomas A, Grieser J, Jhajharia D, Himri Y, Mahowald N M, Mescherskaya A V, Kruger A C, Rehman S, Dinpashoh Y. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 2012, 416: 182–205.
- [2] Liu Y, Liu H J, Luo Y. Comparison of potential evapotranspiration methods in Beijing area of China, *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29

- (5) : 27-32.
- [3] Wang S P, Song L C, Han Y X. Estimation of the potential evapotranspiration in paramos. *Arid Zone Research*, 2009, 26(1) : 126-129.
- [4] Zuo D P, Xue Z X, Cheng L, Zhao F F. Assessment on radiation-based methods to estimate potential evapotranspiration. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4) : 565-574.
- [5] 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) : 19-28
- [6] Han S J, Xu D, Wang, S L. Decreasing potential evaporation trends in China from 1956 to 2005: Accelerated in regions with significant agricultural influence? *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154 : 44-56.
- [7] Yang H B; Yang D W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001. *Journal of Hydrology*, 2012, 414 (2) : 184-193.
- [8] Li P F, Sun X M, Zhao X Y. Analysis of precipitation and potential evapotranspiration in arid and semi arid area of China in recent 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(7) : 57-63.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wang W G, Shao Q X, Peng S Z, Xing W Q, Yang T, Luo Y F, Yong B, Xu J Z. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences. *Water Resources Research*, 2012, 48 : 27-35.
- [12] Zuo D P, Xu, Z X, Yang, H. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China. *Hydrological Processes*, 2011, 26(8) : 1149-1160.
- [13] Zhang D, Zhang W C, Xu Q Z. Comparison and modification of evapotranspiration estimation method in upper Hanjiang Basin. *Resources Science*, 2005, 27(1) : 97-103.
- [14] Gao G, Xu, C Y, Chen, D L, Singh V P. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(5) : 655-669.
- [15] Li Z, Zheng F L, Liu W Z. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961—2009 and its projected changes during 2011—2099 on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154 : 147-155.
- [16] Liu X M, Zheng H X, Zhang M H, Liu C M. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(4) : 594-608.
- [17] Liang L Q, Li, L J, Liu Q. Spatio-temporal variations of reference crop evapotranspiration and pan evaporation in the West Songnen Plain of China. *Hydrological Sciences*, 2011, 56(7) : 1300-1313.
- [18] Han S J, Wang S L, Yang D W. Agricultural influences on evaporation paradox in China. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10) : 1-8.
- [19] Cong Z T, Ni G H, Yang D W, Lei Z D. Evaporation paradox in China. *Advances in Water Science*, 2008, 19(2) : 147-152.
- [20] Ma X N, Zhang M J, Wang S J, Ma Qian, Pan S K. Evaporation paradox in the Yellow River Basin. *Acta Geographic Sinica*, 2012, 67(5) : 645-656.
- [21] Wang S W, Luo Y, Zhao Z C. On debates concerning the global warming. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(8) : 917-922.
- [22] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. New York: Cambridge University Press, 2007 : 10.
- [23] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298(15) : 1410-1411.
- [24] Li Jing, Sun G N, Ren Z Y. Study on mass survey and value evaluation of land-vegetation's primary productivity in Qinba Mountains in Shaanxi Province. *Acta Ecological Sinica*, 2002, 22(12) : 2254-2259.
- [25] Jiang C, Wang F, Mu X M, Li R. Effects of climate change on net primary productivity of vegetation in the northern and southern regions of the Qinling Mountains(I) : Temporal and spatial characteristics of climate change in recent 52 a. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10 (5) : 56-63.
- [26] Zhou Q, Bian J J, Zheng J Y. Variation of air temperature and thermal resources in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1951 to 2009, *Acta Geographic Sinica*, 2011, 66(9) : 1211-1218.
- [27] Fu C B, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4) : 482-493.

参考文献：

- [2] 李艳, 刘海军, 罗雨. 北京地区潜在蒸散量计算方法的比较研究. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 27-32.
- [3] 王素萍, 宋连春, 韩永翔. 高寒区潜在蒸散量的计算方法探讨. 干旱区研究, 2009, 26(1): 126-129.
- [4] 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 赵芳芳. 基于辐射的潜在蒸散量估算方法适用性分析. 干旱区地理, 2011, 34(4): 565-574.
- [8] 李鹏飞, 孙小明, 赵昕奕. 近50年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 57-63.
- [9] 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.
- [10] 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. 自然资源学报, 2012, 27(6): 975-989.
- [13] 张东, 张万昌, 徐全芝. 汉江上游流域蒸散量计算方法的比较及改进. 资源科学, 2005, 27(1): 97-103.
- [18] 韩松俊, 王少丽, 杨大文. 农业活动对中国区域“蒸发悖论”规律的影响. 农业工程学报, 2010, 26(10): 1-8.
- [19] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 雷志栋. “蒸发悖论”在中国的规律分析. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152.
- [20] 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.
- [24] 李晶, 孙根年, 任志远. 陕西秦巴山区植被第一性生产物质量与价值量测评研究. 生态学报, 2002, 22(12): 2254-2259.
- [25] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响(I)——近52年秦岭南北气候时空变化特征分析. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 56-63.
- [26] 周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北1951—2009年的气温与热量资源变化. 地理学报, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [27] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 3 February, 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Ecosystem Service Simulation and Management

Securing Natural Capital and Human Well-Being: Innovation and Impact in China	Gretchen C. Daily, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al (677)
Establishment of ecological compensation mechanisms in China: perspectives and strategies	OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, YUE Ping (686)
Regional cooperation mechanism and sustainable livelihoods: a case study on paddy land conversion program (PLCP)	LIANG Yicheng, LIU Gang, MA Dongchun, et al (693)
Progress and perspectives of ecosystem services management	ZHENG Hua, LI Yifeng, OUYANG Zhiyun, et al (702)
Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model	BAI Yang, ZHENG Hua, ZHUANG Changwei, et al (711)
Identification of hotspots for biodiversity conservation in the Wenchuan earthquake-hit area	XU Pei, WANG Yukuan, YANG Jinfeng, et al (718)
Effects of land use change on ecosystem services: a case study in Miyun reservoir watershed	LI Yifeng, LUO Yuechu, LIU Gang, et al (726)
Impacts of forest eco-benefit tax on industry price levels in Shaanxi Province, China	LI Jie, LIU Zhengnan, HAN Xiuhua (737)
Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island	RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (746)
Perception and attitudes of local people concerning ecosystem services of culturally protected forests	GAO Hong, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (756)
Standard of payments for ecosystem services in Sanjiangyuan Natural Reserve	LI Yifeng, LUO Yuzhu, ZHENG Hua, et al (764)
Natural landscape valuation of Wulingyuan Scenic Area in Zhangjiajie City	CHENG Cheng, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (771)
Satellite-based monitoring and appraising vegetation growth in national key regions of ecological protection	HOU Peng, WANG Qiao, FANG Zhi, et al (780)
Spatial Pattern of Water Retention in Dujiangyan County	FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al (789)
Spatial distribution of carbon storage function and seismic damage in wenchuan earthquake stricken areas	PENG Yi, WANG Yukuan, FU Bin, et al (798)

Frontiers and Comprehensive Review

The Porter Hypothesis: a literature review on the relationship between eco-innovation and environmental regulation	DONG Ying, SHI Lei (809)
Ecological protection and well-being	LI Huimei, ZHANG Anlu (825)
An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi	WANG Yutao, XIN Guorong, LI Shaoshan (834)

Autecology & Fundamentals

Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains	JIANG Chong, WANG Fei, LIU Sijie, et al (844)
The diet composition and trophic niche of main herbivores in the Inner Mongolia Desert steppe	LIU Guihe, WANG Guojie, WANG Shiping, et al (856)
Abstraction and analysis of vegetation information based on object-oriented and spectra features	CUI Yijiao, ZHU Lin, ZHAO Lijuan (867)
Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of <i>Eucalyptus</i>	ZHANG Yonghe, CHEN Wenhui, GUO Qiaoying, et al (876)
Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of <i>Pterocarya stenoptera</i> seedlings to submergence and drought alternation	WANG Zhenxia, WEI Hong, LÜ Qian, et al (888)

Effect of flooding stress on growth and photosynthesis characteristics of *Salix integra* ZHAO Hongfei, ZHAO Yang, ZHANG Chi, et al (898)

Water consumption of pear jujube trees (*Ziziphus jujuba* Mill.) and its correlation with trunk diameter during flowering and fruit development periods ZHANG Linlin, WANG Youke, HAN Lixin, et al (907)

Estimation of nitrogen nutrient index on SPAD value of top leaves in wheat ZHAO Ben, YAO Xia, TIAN Yongchao, et al (916)

Population, Community and Ecosystem

Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China WANG Weixia, SHI Zuomin, LUO Da, et al (925)

Impact on water and soil conservation of different bandwidths in low-efficiency cypress forest transformation LI Yanqiong, GONG Gutang, ZHENG Shaowei, et al (934)

Seasonal changes of phytoplankton community structure in Jinsuitian Reservoir, Zhejiang, China ZHANG Hua, HU Hongjun , CHAO Aimin, et al (944)

Winter carrying capacity and the optimum population density of wild boar in fenghuang Mountains National Nature Reserve of Heilongjiang Province MENG Gentong, ZHANG Minghai,ZHOU Shaochun (957)

Diversity of ground-dwelling spider community in different restoring times of post-fire forest, Cangshan Mountain, Yunnan Province MA Yanyan,LI Qiao,FENG Ping,et al (964)

Landscape, Regional and Global Ecology

Drought characteristics in the shiyang river basin during the recent 50 years based on a composite index ZHANG Tiaofeng, ZHANG Bo, WANG Youheng, et al (975)

Land use spatial distribution modeling based on CLUE-S model in the Huangshui River Basin FENG Shichao,GAO Xiaohong,GU Juan,et al (985)

Research Notes

Patterns of terrestrial anthropogenic impacts on coastal wetlands in three city clusters in China WANG Yijie, YU Shen (998)

Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir WANG Liping, ZHENG Binghui (1011)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 3 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 3 (February, 2013)

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 王如松
主 管 中国科学技术协会
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

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
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:100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印 刷 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

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

订 购 国 外 发 行
全国各 地邮局
中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail:journal@cspg.net

广 告 经 营 许 可 证
京海工商广字第 8013 号

ISSN 1000-0933
9 771000093132

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 90.00 元