

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

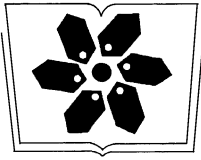
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第13期 Vol.32 No.13 **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



# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 13 期 2012 年 7 月 (半月刊)

中国科学院科学出版基金资助出版

## 目 次

砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究.....	华尔, 李佳, 董洁, 等 (3975)
植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系.....	黎磊, 周道玮, 盛连喜 (3987)
基于景观感知敏感度的生态旅游地观光线路自动选址.....	李继峰, 李仁杰 (3998)
基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例.....	杨谨, 陈彬, 刘耕源 (4007)
内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析.....	颜亮, 周广胜, 张峰, 等 (4017)
典型草地的土壤保持价值流量过程比较.....	裴厦, 谢高地, 李士美, 等 (4025)
长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布.....	巫涛, 彭重华, 田大伦, 等 (4034)
厦门市七种药用植物根围 AM 真菌的侵染率和多样性.....	姜攀, 王明元 (4043)
Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系.....	贾夏, 董岁明, 周春娟 (4052)
凉水保护区土壤产类漆酶-多铜氧化酶细菌群落结构.....	赵丹, 谷惠琦, 崔岱宗, 等 (4062)
盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响.....	卢鑫萍, 杜茜, 闫永利, 等 (4071)
菌丝室接种解磷细菌 <i>Bacillus megaterium</i> C4 对土壤有机磷矿化和植物吸收的影响.....	张林, 丁效东, 王菲, 等 (4079)
闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.....	王维奇, 王纯, 曾从盛, 等 (4087)
高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态.....	武志超, 吴福忠, 杨万勤, 等 (4094)
模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表面土壤碳通量的影响.....	吴林, 苏延桂, 张元明 (4103)
铁皮石斛组培苗移栽驯化过程中叶片光合特性、超微结构及根系活力的变化.....	濮晓珍, 尹春英, 周晓波, 等 (4114)
不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析.....	周玲, 王朝辉, 李富翠, 等 (4123)
基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估.....	张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等 (4132)
黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异.....	李志 (4139)
莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应.....	邓春暖, 章光新, 李红艳, 等 (4146)
不同蚯蚓采样方法对比研究.....	范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等 (4154)
亚洲玉米螟成虫寿命与繁殖力的地理差异.....	涂小云, 陈元生, 夏勤雯, 等 (4160)
黑河上游天然草地蝗虫空间异质性与分布格局.....	赵成章, 李丽丽, 王大为, 等 (4166)
苦瓜叶乙酸乙酯提取物对斜纹夜蛾实验种群的抑制作用.....	骆颖, 凌冰, 谢杰锋, 等 (4173)
长江口中国花鲈食性分析.....	洪巧巧, 庄平, 杨刚, 等 (4181)
基于线粒体控制区序列的黄河上游厚唇裸重唇鱼种群遗传结构.....	苏军虎, 张艳萍, 娄忠玉, 等 (4191)
镉暴露对黑斑蛙精巢 ROS 的诱导及其蛋白质氧化损伤作用机理.....	曹慧, 施蔡雷, 贾秀英 (4199)
北方草地牛粪中金龟子的多样性.....	樊三龙, 方红, 高传部, 等 (4207)
合肥秋冬季茶园天敌对假眼小绿叶蝉和茶蚜的空间跟随关系.....	杨林, 郭骅, 毕守东, 等 (4215)
植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例.....	张跃, 雷开明, 张语克, 等 (4228)
基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究.....	杨丽花, 佟连军 (4236)
基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例.....	齐静, 陈彬, 戴婧, 等 (4246)
<b>专论与综述</b>	
水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述.....	章光新 (4254)
松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展.....	马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 等 (4261)
一种新的景观扩张指数的定义与实现.....	武鹏飞, 周德民, 官辉力 (4270)
<b>研究简报</b>	
华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应.....	李倩, 王明, 王雯雯, 等 (4278)
美丽海绵提取物防污损作用.....	曹文浩, 严涛, 刘永宏, 等 (4285)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 306 \* zh \* P \* ¥70.00 \* 1510 \* 37 \* 2012-07



封面图说: 涵养水源——在长白山南坡的峭壁上, 生长在坡面上的森林所涵养的水源还在汨汨地往下流个不停, 深红色的落叶掉在了苔藓上, 这里已经是长白山的深秋了。虽然雨季已经过去了很久, 但是林下厚厚的枯枝落叶层、腐殖质层、苔藓草本层所涵养的水分还在不间断地流淌, 细细的水线在壁下汇成了溪、汇成了河。涵养水源是森林的主要生态功能之一。

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

DOI: 10.5846/stxb201105280714

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.

Li Z. Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4139-4145.

## 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异

李 志\*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:**基于 48 个站点的气象数据,对黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的空间分布特征和时间变化趋势进行了分析。结果表明,黄土高原年均参考作物蒸散量为 1060.3 mm,西北部高于东南部,最低值出现在西南区。1961—2009 年整体呈上升趋势,年均增幅 1.3 mm;春季变化最显著,冬季变化最小。 $ET_0$  在 1994 年发生上升趋势的突变,之后上升趋势一直非常显著。湿度和温度是最重要的影响因子。 $ET_0$  不断增长而降水呈降低趋势,这将恶化该区水资源短缺的问题,需要采取一定的措施来减缓气候变化带来的负面影响。

**关键词:**参考作物蒸散量;时空变异;黄土高原;Mann-Kendall

### Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009

Li Zhi\*

College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China

**Abstract:** Reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) is a very important variable for hydrology and agriculture and has been widely applied to actual evapotranspiration and crop water requirement calculation as well as hydrological simulation. Under the background of global changes, analyzing the spatiotemporal characteristics of  $ET_0$  can provide useful information for impact assessment of climate change on hydrology. After calculating  $ET_0$  with Penman-Monteith equation using meteorological data from 48 stations, inverse distance weighted interpolation and Mann-Kendall test are used to analyze the spatial distribution and temporal changes in  $ET_0$  on the Loess Plateau during 1961—2009. Results show that the annual mean value of  $ET_0$  is 1060.3 mm; the values in the northwest region are greater than those in the southeast region and the smallest values occur in the southwest region, which is possibly caused by the regional combinations of different meteorological variables. Upward and downward trends are detected for 36 and 12 stations; however, only 30 and nine stations have increased and decreased significantly, respectively. Averaged over the Loess Plateau,  $ET_0$  has increased significantly by 1.3 mm/a; the greatest and smallest changes are in spring and winter, respectively.  $ET_0$  occurs abrupt change in 1994 and increases more significantly since then. The temporal trend in  $ET_0$  is possibly caused by the evolutions of meteorological factors, especially by the downward trend in humidity and upward trend in temperature as  $ET_0$  is most sensitive to changes in humidity and temperature on the Loess Plateau. The detected monotonic trend in  $ET_0$  on the Loess Plateau is different from other regions and the upward trend in  $ET_0$  is confirmed by this study. The continuous increase in  $ET_0$  and decrease in precipitation will worsen the water shortage on the Loess Plateau; therefore, some countermeasures are necessary to mitigate the adverse impacts of climate changes.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41101022);“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD29B09);中央高校基本科研业务费专项资金(QN2009038)

收稿日期:2011-05-28; 修订日期:2011-11-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhibox@126.com

**Key Words:** reference crop evapotranspiration; spatiotemporal variations; the Loess Plateau; Mann-Kendall

参考作物蒸散量( $ET_0$ )是非常重要的一个农业和水文变量,被广泛应用在实际蒸散和作物需水计算以及其他水文模拟中。 $ET_0$ 仅受气象因子的影响,可以通过气象数据计算,因此, $ET_0$ 对某些气象因子的变化非常敏感<sup>[1]</sup>。全球变暖的大背景下,分析 $ET_0$ 的时空变异对于研究气候变化的水文效应等具有重要的意义。

黄土高原地处半湿润半干旱过渡区,水资源短缺是农业生产的关键限制因素。近50a来该区一些水文变量发生了变化,如径流减少、土壤干层趋向严重和地下水位下降等<sup>[2-3]</sup>。为此,较多研究从气温、降水等<sup>[4-8]</sup>方面分析了黄土高原的气候变化来探讨变化原因,取得了重要的结果。较气温降水等变量而言,对区域蒸散量的研究较少,而径流等可用水资源量取决于降水和蒸散量之间的差异,单独分析降水变化难以说明气候变化的水文效应。

部分研究基于蒸发皿数据或计算的蒸散量对黄土高原或其所在大区域的蒸散量进行了分析。如徐宗学等和邱新法等分析了黄河流域1961—2000年20cm蒸发皿的数据,发现黄土高原东部年蒸发量增长而其他区域下降,整体持平并略有上升<sup>[9-10]</sup>;谢贤群和王菱基于气象数据和20cm蒸发皿数据,发现黄土高原1955—2000年 $ET_0$ 和蒸发皿蒸发呈波动上升趋势<sup>[11]</sup>;王国庆基于6站点数据分析了黄河中游1951—2000年蒸发的变化,发现蒸发随温度升高而显著增长<sup>[12]</sup>;王幼奇等利用5站点气象数据分析了黄土高原1954—2000年 $ET_0$ 的变化趋势,发现除西安和西宁 $ET_0$ 年值显著降低外,其余3站点的变化趋势不显著<sup>[13]</sup>;Liu等分析了黄河流域1961—2006年 $ET_0$ 的变化趋势,发现中游呈显著的上升趋势<sup>[14]</sup>。可见,当前研究多针对2000年以前蒸散量的变化趋势;结果存在一定差异,但多数研究表明2000年以前呈波动上升趋势,而Liu等的结果表明 $ET_0$ 的增长可能更加显著了。相关研究表明,近年来全球气候变化更加显著<sup>[15]</sup>,因此,以最新数据分析 $ET_0$ 对于全面了解 $ET_0$ 的变化趋势非常必要。

本研究基于黄土高原1961—2009年气象数据,计算 $ET_0$ 后分析其时空变异规律,以期能为该区的农业生产和水资源管理等提供参考依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源与处理

基于散布在黄土高原的48个站点(图1)的实测气象数据计算 $ET_0$ 。站点介于34.25—40.82°N, 101.43—113.55°E,跨青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、河南和山西等省份。实测数据为1961—2009年日序列的平均、最高和最低温度(°C),2m高度的相对湿度(%),10m高度的风速(m/s),日照时数(h),气压(hPa)和降水(mm)。根据联合国粮农组织推荐的风廓线关系<sup>[1]</sup>,10m高度的风速被转化为2m高度的相应数值。少数缺失数据使用同站点其他年份的均值代替。

### 1.2 $ET_0$ 计算

使用联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式<sup>[1]</sup>计算 $ET_0$ ,公式如下:

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

式中, $ET_0$ 为参考作物蒸散量(mm/d); $\Delta$ 为饱和水气压曲线斜率(kPa/°C); $R_n$ 为地表净辐射量( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $G$ 为土壤热通量( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $\gamma$ 为干湿表常数(kPa/°C); $T$ 为平均气温, $(T_{\max} + T_{\min})/2$ (°C); $u_2$ 为2m

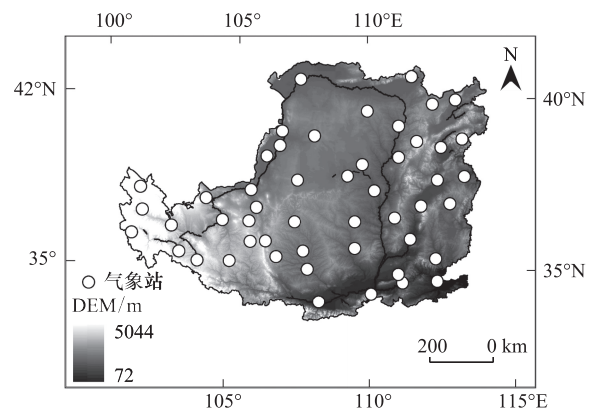


图1 黄土高原气象站点分布图

Fig. 1 Location of the meteorological stations on the Loess Plateau

高度处风速(m/s); $e_s$ 和 $e_a$ 分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa)。

数据处理均按照 FAO 的操作规程进行,基于上述气象站点实测的日数据计算日序列的 $ET_0$ ,然后合并计算得到月值和年值。

### 1.3 $ET_0$ 时空分析

基于反距离加权插值法来分析 $ET_0$ 的空间分布。该插值法通过创建栅格表面来利用有限样点估计未知样点的值,其前提假设是样点间存在局部影响,且这种影响与距离成反比;一般适用于变量影响随距离增大而减小的情况,而站点间的气象变量存在空间相关性,其变化符合此规律,因此,该方法可以研究气象变量的空间分布情况<sup>[16]</sup>。通过 Mann-Kendall 方法检验 $ET_0$ 及相关气象变量的单调变化趋势,并量化各气象要素的变化速度,趋势显著性检验的置信水平为 95%。上面两种操作,均使用站点的数据。使用 MK 突变检验法判断 $ET_0$ 的突变年份和年代际变化,此操作使用区域平均值进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 空间分布

1961—2009 年,黄土高原年均 $ET_0$ 为 1060.3 mm(图 2),介于 865.1 mm(甘肃临夏)—1274.0 mm(宁夏同心),变异系数为 0.10,属弱变异。整体而言,西北部高于东南部,最低值出现在西南区,小于 950 mm/a;但大部分区域的 $ET_0$ 高于 1000 mm/a,在沿东南-西北的条带上高于 1050 mm;最高值出现西北区,大于 1150 mm/a。 $ET_0$ 各季节平均值的空间分布,春夏秋 3 个季节与年值相似,而冬季均值与年均值相反。

黄土高原 $ET_0$ 的空间分布可能是由于气象因子的组合效应导致的(图 3)。如年均温度和相对湿度自东南向西北递减,而年均风速和日照时数从东南向西北递增。一般而言,高温低湿、长日照时数和高风速导致更高的蒸散量<sup>[1]</sup>。因此,温度低、风速小、高湿度和短日照时数可能是西南区 $ET_0$ 最小的原因;而西北区 $ET_0$ 最大可能是因为低湿度、高风速和长日照时数导致的。

### 2.2 单调变化趋势

1961—2009 年,黄土高原 $ET_0$ 年值的单调变化趋势呈混合模式(图 4),具上升和下降趋势的站点分别为 36 和 12 个,呈下降趋势的站点主要分布在黄土高原边缘;但仅有 30 和 9 个站点的上升和下降趋势显著,其平均变化速度分别为 2.7 和 -2.1 mm/a。整体而言,黄土高原的 $ET_0$ 呈显著上升的趋势,年均增幅 1.3 mm。

黄土高原 $ET_0$ 在 4 个季节的变化趋势也呈混合模式,但仍以上升趋势为主(表 1)。站点数方面,春季和秋季具有显著上升趋势的站点数均大于 30 个,夏季和冬季具有显著上升趋势的站点约 20 个左右;变化幅度方面,春季和夏季的增幅最大,与年均变化相似,为 1.3 mm 左右。可见,冬季是 $ET_0$ 变化较小的季节,站点数和幅度都相对少于其他季节;而春季是 $ET_0$ 变化较显著的季节。

黄土高原 $ET_0$ 的上升趋势很可能是气象因子的变化导致的。以 $ET_0$ 年值及其相关气象因子为例进行分析,1961—2009 年,平均温度显著上升,而相对湿度、风速和日照时数显著下降(表 2)。一般而言,高温和低湿将导致更高的 $ET_0$ 值,低风速和短日照时数会降低 $ET_0$ 值<sup>[1, 17]</sup>;然而,这些因子的组合效应最终导致了黄土高原 $ET_0$ 的显著上升。为了解释这种情况,分析了 $ET_0$ 与气象因子之间的相关性,结果发现 $ET_0$ 与相对湿度、平均温度和日照时数之间的相关关系都很显著,但与风速的相关性不强。按照相关系数进行排序,可以发现影响 $ET_0$ 最显著的气象因子为相对湿度( $R^2=0.66$ ),其次为平均温度( $R^2=0.38$ )和日照时数( $R^2=0.18$ ),

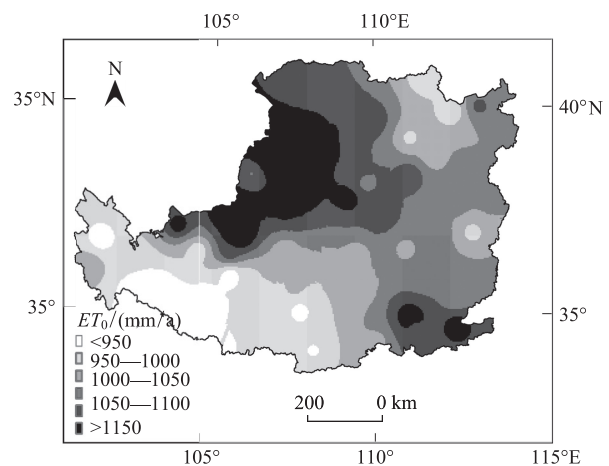


图 2 1961—2009 年黄土高原 $ET_0$ 的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of annual average  $ET_0$  on the Loess Plateau during 1961—2009

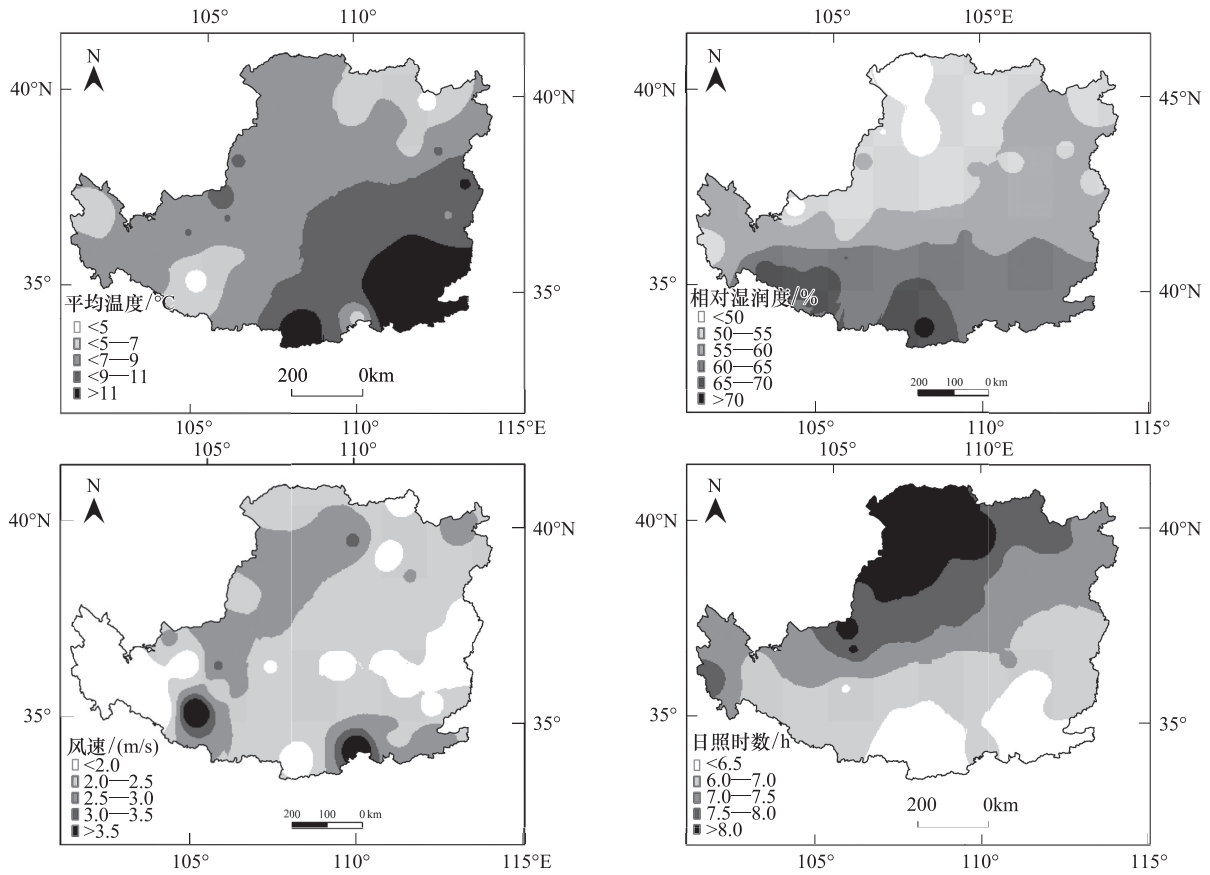


图3 1961—2009年黄土高原影响  $ET_0$  的气象因子的空间分布

Fig. 3 The spatial distributions of meteorological factors influencing  $ET_0$  on the Loess Plateau during 1961—2009

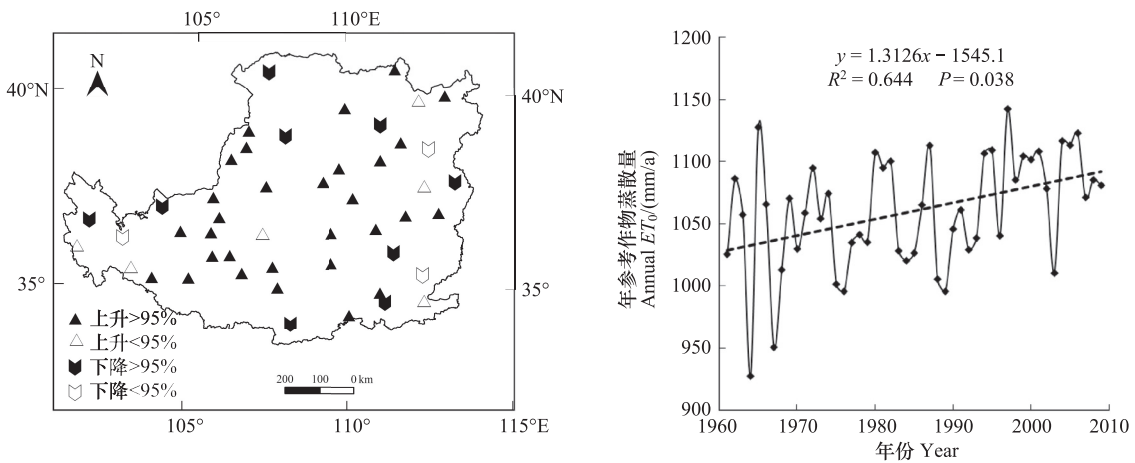


图4 1961—2009年黄土高原  $ET_0$  的变化趋势

Fig. 4 The temporal trend of  $ET_0$  on the Loess Plateau during 1961—2009

这与相关研究在黄河流域和全国<sup>[14, 18-19]</sup>的结论一致。因此,风速和日照时数的下降趋势会降低  $ET_0$ ,但其影响能力相对较弱,最终对  $ET_0$  有决定性影响的是湿度的下降和温度的升高趋势。

表 1 1961—2009 年黄土高原  $ET_0$  各季节的单调变化趋势

Table 1 The temporal trend of seasonal  $ET_0$  on the Loess Plateau during 1961—2009

趋势 Trend	$ET_0$											
	冬季 Winter			春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn		
	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$
下降 Downward	18	2	-0.56	8	3	-0.99	14	7	-1.39	13	3	-0.7
上升 Upward	32	22	0.49	42	33	1.34	35	19	1.28	37	30	0.98
无趋势 No trend	0			0			1			0		

*n*: 各趋势的站点数 Numbers of stations for each trend; *n*<sub>sig</sub>: 各趋势具有显著性的站点数 Numbers of stations with significant trend ( $P < 0.05$ );  $\beta$ : 趋势显著站点的平均变幅 Mean change magnitude of stations with significant trend

表 2 1961—2009 年黄土高原气象因子的单调趋势

Table 2 The monotonic trends of meteorological factors on the Loess Plateau during 1961—2009

趋势 Trend	气象因子 Meteorological factors											
	平均温度 Mean temperature			相对湿度 Relative humidity			风速 Wind speed			日照时数 Sun hours		
	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$	<i>n</i>	<i>n</i> <sub>sig</sub>	$\beta$
下降 Downward	1	0	0	34	20	-0.1	38	30	-0.02	38	29	-0.02
上升 Upward	47	47	0.03	13	2	0.14	9	3	0.01	10	4	0.01
无趋势 No trend	0			1			1			0		

*n*: 各趋势的站点数 Numbers of stations for each trend; *n*<sub>sig</sub>: 各趋势具有显著性的站点数 Numbers of stations with significant trend ( $P < 0.05$ );  $\beta$ : 趋势显著站点的平均变幅 Mean change magnitude of stations with significant trend

### 2.3 年代际变化

图 5 给出了黄土高原  $ET_0$  的突变检验结果,该图可同时分析各变量的突变年份和年代际变化。可以看出,  $ET_0$  在 20 世纪 90 年代以前波动变化,但之后处于显著的上升趋势,上升的突变发生在 1994 年。这肯定了其他研究  $ET_0$  在 2000 年以前波动上升,之后显著上升的结论<sup>[9-10, 14]</sup>。

为了进一步量化黄土高原  $ET_0$  的年代际变化,计算了不同年代下  $ET_0$  的均值(表 3)。可以看出,  $ET_0$  从 20 世纪 60 年代以来一直处于上升趋势,这可能跟温度的上升趋势和湿度的下降趋势有显著关系。2001—2009 年较 1961—1970 年升高了 32.1 mm,而同期的降水量减少了 53.0 mm,这必然导致更加严重的干旱事件,如频率升高和干旱时段延长等。

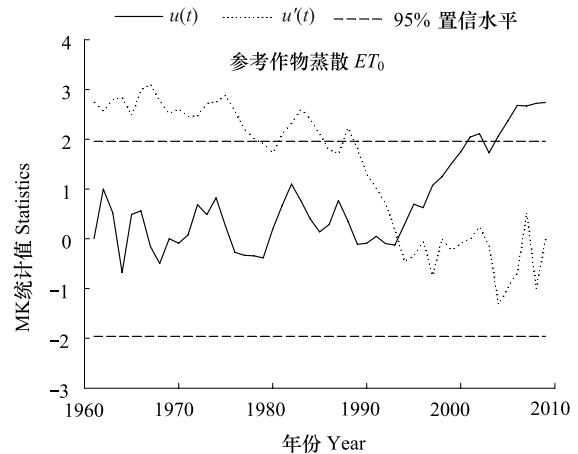


图 5 1961—2009 年黄土高原气象要素的突变检验  
Fig. 5 Abrupt changes in meteorological elements on the Loess Plateau during 1961—2009

表 3 1961—2009 年黄土高原  $ET_0$  和降水不同年代的均值

Table 3 The mean value of  $ET_0$  and precipitation for different decades on the Loess Plateau

时段 Periods	1961—1970 年	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2009 年	1961—2009 年
参考作物蒸散量 $ET_0$ /mm	1035.5	1049.9	1049.6	1082.0	1087.6	1060.4
降水量 precipitation/mm	460.5	422.9	425.2	390.2	407.5	421.6

中国大部分区域的蒸发量 1956—2000 年呈下降趋势<sup>[11,17,20-21]</sup>,而此研究表明黄土高原 1961—2009 年大部分区域的蒸发量呈上升趋势,说明该区蒸发量的变化趋势不同于其他区域,这与部分较新研究的结论一致<sup>[14, 19]</sup>。同时,较前人的结果<sup>[9-10]</sup>,本文更加肯定了  $ET_0$  的上升趋势,说明  $ET_0$  的变化趋势也已经发生了变化。 $ET_0$  的变化可能主要受 1994 年以来相对湿度显著下降和温度显著上升的影响,因为这是影响中国  $ET_0$

的两个关键因子<sup>[14, 18]</sup>;而通过形状对比,发现  $ET_0$  与相对湿度的变化非常相似,结合上面相关性的分析,黄土高原的  $ET_0$  可能受到相对湿度的决定性影响。同时,尽管黄土高原太阳总辐射总体呈下降趋势,但 20 世纪 90 年代以来已呈回升趋势,这可能是 1994 年以来参考作物蒸散量上升的直接原因<sup>[22]</sup>(图 6)。

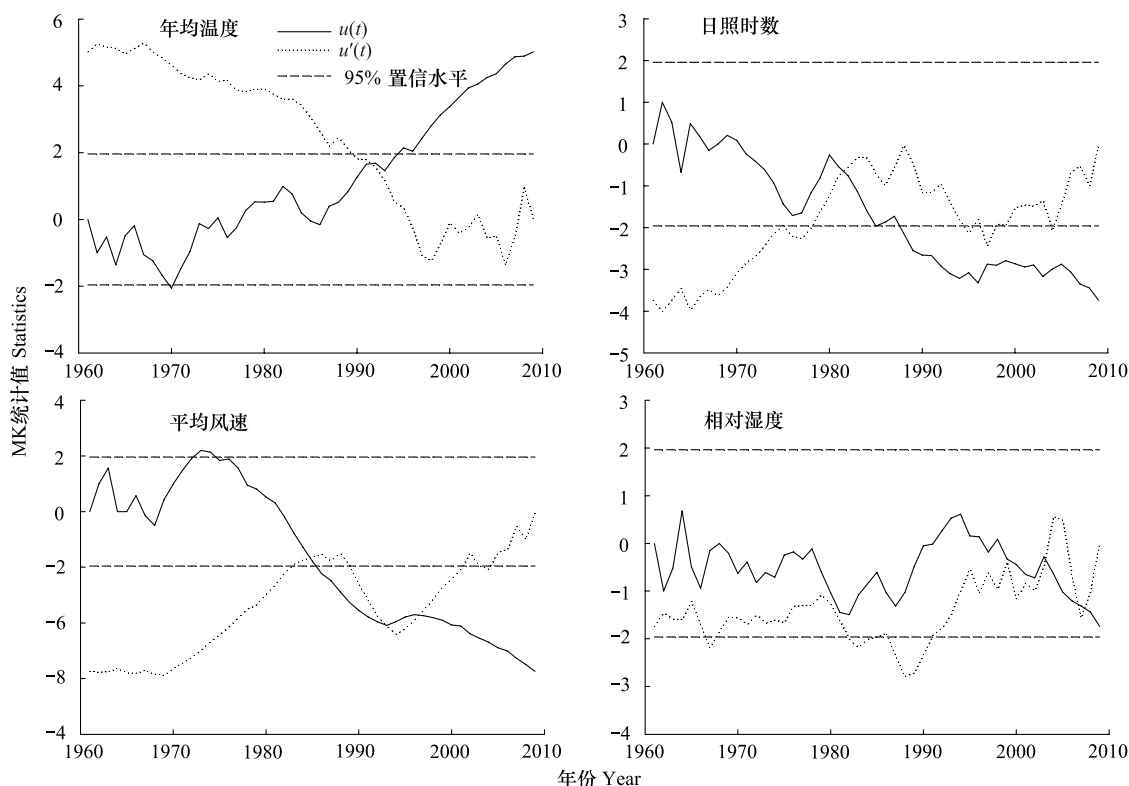


图 6 1961—2010 年黄土高原  $ET_0$  相关气象要素的突变

Fig. 6 Abrupt changes in meteorological elements related to  $ET_0$  on the Loess Plateau during 1961—2009

### 3 结论

基于 48 个站点的气象数据,对黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的空间分布特征和时间变化趋势进行了分析。结果表明,黄土高原年均参考作物蒸散量为 1060.3 mm;受气象因子的组合效应影响, $ET_0$  在西北部高于东南部,最低值出现在西南区。48 个站点中  $ET_0$  上升和下降的趋势均有,但整体呈上升趋势,年均增幅 1.3 mm;春季变化最显著,冬季变化最小。 $ET_0$  在 1994 年发生上升趋势的突变,之后上升趋势一直非常显著。湿度和温度是影响黄土高原  $ET_0$  变化最重要的气象因子。当前气候下, $ET_0$  不断增长而降水呈降低趋势,这恶化了该区水资源短缺的问题,因此,需要采取一定的措施来减缓和适应气候变化带来的负面影响。

### References:

- [ 1 ] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration; Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, Rome, 1998.
- [ 2 ] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, Zheng F L. Assessing and regulating the impacts of climate change on water resources in the Heihe watershed on the Loess Plateau of China. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53(5): 710-720.
- [ 3 ] Li Z, Liu W Z, Zheng F L, Hu H C. The impacts of climate change and human activities on river flow in the Loess Tableland of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2379-2386.
- [ 4 ] Lin S, Wang Y R. Spatial-temporal Evolution of Precipitation in China Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(3): 502-508.
- [ 5 ] Wang W T, Zhang T F, Yao Y B, Wang R Y, Guo J Y, Huang B. Climate change character of precipitation during the half year of summer and its impact on crop yield in the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(1): 154-159.
- [ 6 ] Wang Y R, Lü S H. Sensitivity Analysis of the response of precipitation to climate change over China Loess Plateau. *Journal of Geocryology and Geocryology*, 2008, 30(1): 43-51.



- [ 7 ] Xu Z X, Sui C H. Long-term trend of temperature in the Yellow River Basin. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(11): 7-10.
- [ 8 ] Li Z, Zheng F L, Liu W Z. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 291-299.
- [ 9 ] Xu Z X, He W L. Analysis on the long-term trend of pan evaporation in the Yellow River Basin over the past 40 years. *Hydrology*, 2005, 25(6): 6-11.
- [ 10 ] Qiu X F, Liu C M, Zeng Y. Changes of pan evaporation in the past 40 years over the Yellow River Basin. *Journal of Natural Sciences*, 2008, 18(4): 437-442.
- [ 11 ] Xie X Q, Wang L. Changes of potential evaporation in Northern China over the past 50 years. *Journal of Natural Sciences*, 2007, 22(5): 683-691.
- [ 12 ] Wang G Q, Zhang J Y, He R M, Jing X A. Trends of temperature change in middle of Yellow River and its impact to the evaporation potential. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2007, 18(4): 32-36.
- [ 13 ] Wang Y Q, Fan J, Shao M A, Bai Y R. Analysis of effects of climate change on reference evapotranspiration on the Loess Plateau in recent 50 years. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(9): 6-10.
- [ 14 ] Liu Q, Yang Z F, Cui B S, Sun T. The temporal trends of reference evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Yellow River Basin, China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(15): 2171-2181.
- [ 15 ] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* // S. Solomon, et al, eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [ 16 ] Su B D, Xiao B, Zhu D M, Jiang T. Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River basin, China; 1960—2003. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(3): 479-492.
- [ 17 ] Xu C Y, Gong L, Jiang T, Chen D, 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.
- [ 18 ] Zuo H, Li D, Hu Y, Bao Y, Lü S. Characteristics of climatic trends and correlation between pan-evaporation and environmental factors in the last 40 years over China. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(12): 1235-1241.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] Ding Y, Ren G, Shi G, Guan P, Zheng X H, Zhai P M, Zhang D E, Zhao Z C, Wang S W, Wang H J, Luo Y, Chen D L, Gao X J, Dai X S. National assessment report on climate change ( I ): Climate change in China and the future trend ( in Chinese ). *Adv Climate Change Res*, 2006, 2: 3-8.
- [ 22 ] Wen X H, Shang K Z, Wang S G, Yang D B, Fan W Y. Regional Characteristics of Solar Radiation in China during 1961—2000. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(3): 554-561.
- [ 23 ] Zhang G H, Fu S H, Fang W H, Imura H, Zhang X C. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River basin of China. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 911-918.

#### 参考文献:

- [ 3 ] 李志, 刘文兆, 郑粉莉, 胡宏昌. 黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响. *生态学报*, 2010, 30(9): 2379-2386.
- [ 4 ] 林纾, 王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 502-508.
- [ 5 ] 王位泰, 张天锋, 姚玉璧, 王润元, 郭江勇, 黄斌. 黄土高原夏半年降水气候变化特征及对作物产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(1): 154-159.
- [ 6 ] 王毅荣, 吕世华. 黄土高原降水对气候变暖响应的敏感性研究. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 43-51.
- [ 7 ] 徐宗学, 隋彩虹. 黄河流域平均气温变化趋势分析. *气象*, 2005, 31(11): 7-10.
- [ 8 ] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 291-299.
- [ 9 ] 徐宗学, 和宛琳. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量变化趋势分析. *水文*, 2005, 25(6): 6-11.
- [ 10 ] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征. *自然资源学报*, 2008, 18(4): 437-442.
- [ 11 ] 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 ] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 荆新爱. 黄河中游气温变化趋势及其对蒸发能力的影响. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(4): 32-36.
- [ 13 ] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 白一茹. 黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 6-10.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 官鹏, 郑循华, 翟盘茂, 张德二, 赵宗慈, 王绍武, 王会军, 罗勇, 陈德亮, 高学杰, 戴晓苏. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3-8.
- [ 22 ] 文小航, 尚可政, 王式功, 杨德保, 樊文雁. 1961—2000 年中国太阳辐射区域特征的初步研究. *中国沙漠*, 2008, 28(3): 554-561.

CONTENTS

Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments ..... HUA Er, LI Jia, DONG Jie, et al (3975)

Allometric relationship between mean component biomass and density during the course of self-thinning for *Fagopyrum esculentum* populations ..... LI Lei, ZHOU Daowei, SHENG Lianxi (3987)

Automatic site selection of sight-seeing route in ecotourism destinations based on landscape perception sensitivity ..... LI Jifeng, LI Renjie (3998)

Emergy evaluation for sustainability of Biogas-linked agriculture ecosystem; a case study of Gongcheng county ..... YANG Jin, CHEN Bin, LIU Gengyuan (4007)

Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia ..... YAN Liang, ZHOU Guangsheng, ZHANG Feng, et al (4017)

Soil conservation value flow processes of two typical grasslands ..... PEI Sha, XIE Gaodi, LI Shimei, et al (4025)

Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old *Pinus massoniana* forest ecosystem in Changsha City, China ..... WU Tao, PENG Chonghua, TIAN Dalun, et al (4034)

Colonization rate and diversity of AM fungi in the rhizosphere of seven medicinal plants in Xiamen ..... JIANG Pan, WANG Mingyuan (4043)

Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity ..... JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan (4052)

The community structure of laccase-like multicopper oxidase-producing bacteria in soil of Liangshui Nature Reserve ..... ZHAO Dan, GU Huiqi, CUI Daizong, et al (4062)

Effects of soil rhizosphere microbial community and soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in different salinized soils ..... LU Xinping, DU Qian, YAN Yongli, et al (4071)

The effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria *Bacillus megaterium* C4 in the AM fungal hyphosphere on soil organic phosphorus mineralization and plant uptake ..... ZHANG Lin, DING Xiaodong, WANG Fei, et al (4079)

Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary ..... WANG Weiqi, WANG Chun, ZENG Congsheng, et al (4087)

Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region ..... WU Zhichao, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4094)

Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China ..... WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming (4103)

Changes in photosynthetic properties, ultrastructure and root vigor of *Dendrobium candidum* tissue culture seedlings during transplantation ..... PU Xiaozhen, YIN Chunying, ZHOU Xiaobo, et al (4114)

Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland ..... ZHOU Ling, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al (4123)

Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model ..... ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al (4132)

Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009 ..... LI Zhi (4139)

Eco-physiological responses of *Phragmites australis* to different water-salt conditions in Momoge Wetland ..... DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, LI Hongyan, et al (4146)

Comparative study of different earthworm sampling methods ..... FAN Ruqin, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al (4154)

Geographic variation in longevity and fecundity of the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* Guenée (Lepidoptera: Crambidae) ..... TU Xiaoyun, CHEN Yuansheng, XIA Qinwen, et al (4160)

Analysis on grasshopper spatial heterogeneity and pattern of natural grass in upper reaches of Heihe ..... ZHAO Chengzhang, LI Lili, WANG Dawei, et al (4166)

Inhibition effects of ethyl acetate extracts of *Momordica charantia* leaves on the experimental population of *Spodoptera litura* ..... LOU Ying, LING Bing, XIE Jiefeng, et al (4173)

Feeding habits of *Lateolabrax maculatus* in Yangtze River estuary ..... HONG Qiaoqiao, ZHUANG Ping, YANG Gang, et al (4181)

Genetic structure of *Gymnodiptychus pachycheilus* from the upper reaches of the Yellow River as inferred from mtDNA control region ..... SU Junhu, ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, et al (4191)

Toxicity mechanism of Cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog *Rana nigromaculata* ..... CAO Hui, SHI Cailei, JIA Xiuying (4199)

The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China ..... FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, et al (4207)

Spatial relationships among *Empoasca vitis* (Gothe) and *Toxoptera aurantii* (Boyer) and natural enemies in tea gardens of autumn-winter season in Hefei suburban ..... YANG Lin, GUO Hua, BI Shoudong, et al (4215)

Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve ..... ZHANG Yue, LEI Kaiming, ZHANG Yuke, et al (4228)

Research of typical EIPs based on the social network analysis ..... YANG Lihua, TONG Lianjun (4236)

Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi ..... QI Jing, CHEN Bin, DAI Jing, et al (4246)

**Review and Monograph**

The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review ..... ZHANG Guangxin (4254)

Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain ..... MA Hongyuan, LIANG Zhengwei, LÜ Bingsheng, et al (4261)

A new landscape expansion index: definition and quantification ..... WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili (4270)

**Scientific Note**

Response of photosynthetic characteristics of *Psathyrostachys huashanica* Keng to drought stress ..... LI Qian, WANG Ming, WANG Wenwen, et al (4278)

The antifouling activities of *Callyspongia* sponge extracts ..... CAO Wenhao, YAN Tao, LIU Yonghong, et al (4285)

# 《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 13 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 13 (July, 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 100071, 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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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