

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第9期 Vol.34 No.9 2014

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 34 卷 第 9 期      2014 年 5 月    (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 基于土壤食物网的生态系统复杂性-稳定性关系研究进展 ..... 陈云峰,唐 政,李 慧,等 (2173)
- 滇西北高原入湖河口退化湿地生态修复效益分析..... 符文超,田 昆,肖德荣,等 (2187)
- 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究 .....  
..... 李阳兵,罗光杰,白晓永,等 (2195)
- 青藏高原东缘高寒草原有毒植物分布与高原鼠兔、高原麝鼠的相关性 ... 金 樑,孙 莉,崔慧君,等 (2208)
- 周边不同生境条件对茶园蜘蛛群落及叶蝉种群时空结构的影响..... 黎健龙,唐劲驰,黎秀娣,等 (2216)

### 个体与基础生态

- 三峡库区马尾松林土壤-凋落物层酶活性对凋落物分解的影响 ..... 葛晓改,肖文发,曾立雄,等 (2228)
- 芦苇、香蒲和蘆草 3 种挺水植物的养分吸收动力学 ..... 张熙灵,王立新,刘华民,等 (2238)
- 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响 ... 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等 (2246)
- 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响 ..... 彭海英,李小雁,童绍玉 (2256)
- 遮阴对米槠和杉木原位排放甲烷的影响..... 陈细香,杨燕华,江 军,等 (2266)
- 桔小实蝇和番石榴实蝇对 6 种寄主果实的产卵选择适应性..... 刘 慧,侯柏华,张 灿,等 (2274)
- 鼠尾草属东亚分支的传粉模式..... 黄艳波,魏宇昆,葛斌杰,等 (2282)

### 种群、群落和生态系统

- 养分资源脉冲供给对几种微藻种间竞争的影响 ..... 李 伟 (2290)
- 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价..... 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等 (2297)
- 黄土丘陵区植物功能性状的尺度变化与依赖 ..... 丁 曼,温仲明,郑 颖 (2308)
- 湘潭锰矿栎树叶片和土壤 N、P 化学计量特征 ..... 徐露燕,田大伦,王光军,等 (2316)
- 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素..... 阳伏林,张 强,王文玉,等 (2323)
- 尾矿区不同植被恢复模式下高效固氮菌的筛选及 Biolog 鉴定..... 李 雯,阎爱华,黄秋娟,等 (2329)
- 四川理县杂谷脑干旱河谷岷江柏造林恢复效果评价..... 李东胜,罗 达,史作民,等 (2338)

### 景观、区域和全球生态

- 闽南-台湾浅滩渔场二长棘鲷群体景观多样性 ..... 蔡建堤,苏国强,马 超,等 (2347)
- 面向土系调查制图的小尺度区域景观分类——以宁镇丘陵区中一小区域为例.....  
..... 卢浩东,潘剑君,付传城,等 (2356)

气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响…………… 胡 玮,严昌荣,李迎春,等 (2367)

### 资源与产业生态

基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析…………… 刘 源,李向阳,林剑艺,等 (2378)

可持续生计目标下的生态旅游发展模式——以河北白洋淀湿地自然保护区王家寨社区为例……………

…………… 王 瑾,张玉钧,石 玲 (2388)

荔枝树干液流速率与气象因子的关系…………… 凡 超,邱燕萍,李志强,等 (2401)

肿腿蜂类寄生蜂室内控害效能评价——以松脊吉丁肿腿蜂为例…………… 展茂魁,杨忠岐,王小艺,等 (2411)

### 城乡与社会生态

内蒙古草原人类福祉与生态系统服务及其动态变化——以锡林郭勒草原为例……………

…………… 代光烁,娜日苏,董孝斌,等 (2422)

基于农业面源污染分区的三峡库区生态农业园建设研究…………… 刘 涓,谢 谦,倪九派,等 (2431)

“交通廊道蔓延”视角下山地城市典型样带空间格局梯度分析…………… 吕志强,代富强,周启刚 (2442)

### 学术信息与动态

美国地理学家协会 2014 年会述评…………… 孙然好,肖荣波 (2450)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 280 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-05



**封面图说:** 峰丛洼地石漠化——峰丛主要分布在云贵高原的边缘部分及桂西、桂西北地区,相对高度一般为 200—300m,高的可达 600m 以上。在峰丛之间,岩溶洼地、漏斗、落水洞很发育,常形成峰丛洼地或峰丛漏斗的组合形态。峰丛洼地中的土地相当贫瘠,由于当地人们依靠这些土地种植庄稼为生,石漠化的发展趋势已经越来越明显。尤其在土地承载力低、人口压力大的区域石漠化相当严重,研究峰丛洼地耕地资源分布、土地利用强度和石漠化发育状况之间的机理,有助于从本质上认识石漠化的发生,对石漠化治理实施科学指导。

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

DOI: 10.5846/stxb201306101609

阳伏林,张强,王文玉,张凯,杨启国,杨泽粟,雷俊.黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素.生态学报,2014,34(9):2323-2328.

Yang F L, Zhang Q, Wang W Y, Zhang K, Yang Q G, Yang Z S, Lei J. Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2323-2328.

## 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素

阳伏林<sup>1,2</sup>, 张强<sup>1,\*</sup>, 王文玉<sup>1,2</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 杨启国<sup>1</sup>, 杨泽粟<sup>1,2</sup>, 雷俊<sup>3</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/

中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020;

2. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730020; 3. 甘肃省定西市气象局, 定西 743000)

**摘要:**蒸散与水循环、能量平衡密切相关,是黄土高原雨养农田生态系统最重要的水通量之一。准确测定半干旱区农田生态系统蒸散,对增强陆气相互作用的理解以及科学应对气候变化有重要意义。采用涡度相关技术对黄土高原春小麦农田生态系统蒸散进行了观测,利用气象梯度系统进行环境因子观测;分析了春小麦农田生态系统蒸散日、季动态及其环境影响因子。结果表明,黄土高原半干旱区春小麦农田生态系统蒸散呈早晚低、中午高的“单峰型”日变化特征;最大日峰值出现在 8 月(0.22 mm/h)。生长季蒸散日峰值高于非生长季。春小麦农田最大日蒸散率值相对较低,这可能与该地区干旱少雨的气候特征有关。农田蒸散且具有明显的季节动态,与降水季节分布密切相关。7、8 月份降水较多,月蒸散量较高。全年蒸散量(318.0 mm)略低于年降水量(332.3 mm);蒸散量与降水量比值为 95.7%。非生长季蒸散量显著低于生长季(4—9 月);二者之比为 0.26。农田蒸散随土壤含水量和空气温度(低于 26 °C)增大呈指数增长趋势;随空气相对湿度、太阳辐射、风速增大呈先增大后降低的二次曲线变化趋势。净辐射是黄土高原半干旱区农田生态系统蒸散主要环境控制因子,土壤含水量次之。

**关键词:**黄土高原;半干旱区;蒸散;净辐射;环境控制

## Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau

YANG Fulin<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,\*</sup>, WANG Wenyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, YANG Qiguo<sup>1</sup>, YANG Zesu<sup>1,2</sup>, LEI Jun<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Arid Meteorology, China, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3 Meteorological Bureau of Dingxi, Dingxi 743000, China

**Abstract:** Evapotranspiration (*ET*) links water and energy cycles, and is one of the most important water fluxes in the rain-fed agroecosystem of the Loess Plateau, China. Accurate measurements of *ET* in this semi-arid agroecosystem are critical to gaining a better understanding the interactions between terrestrial ecosystems and atmosphere, and tackling climate change scientifically. This study was conducted at the Dingxi Arid Meteorology and Ecological Environment Experimental Station (DAMES) in 2010. The eddy covariance system and microclimate gradient system were used to observe *ET* and environmental conditions, respectively. We analyzed the diurnal and seasonal dynamics of *ET* and environmental factors influencing *ET* throughout the spring wheat agroecosystem in the semi-arid Loess Plateau. The results showed that the diurnal variation of *ET* in this agroecosystem can be graphed as a line with a single-peak which occurs around noon with lower *ET* rates observed in the morning and evening; also, seasonal *ET* peaked in August (0.22 mm/h). Daily peak *ET*

**基金项目:**国家重大科学研究计划(2012CB955304);国家自然科学基金项目(31300376, 41275118);中国博士后科学基金项目(2012M512044);甘肃省自然科学基金项目(1208RJYA025)

收稿日期:2013-06-10; 修订日期:2013-10-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

values in the growing season were larger than those in non-growing season. During the observation period, the maximum daily *ET* rate of spring wheat farmland was relatively low, which may be related to the dry climatic conditions with low levels of precipitation typical of the semi-arid area of the Loess Plateau. *ET* varied significantly from season to season in the spring wheat agroecosystem and *ET* dynamics were closely related to the seasonal distribution of precipitation. Monthly *ET* peaked during July and August because relatively more rain was received during these two months. Annual *ET* (318.0 mm) in 2010 was slightly lower than annual precipitation (332.3 mm); the ratio of *ET* to precipitation was 95.7%. *ET* during the non-growing season was significantly lower than that during the growing season (April to September), with a ratio of non-growing season to growing season *ET* of 0.26. Total *ET* in the spring wheat agroecosystem increased exponentially with increases in either soil water content and/or air temperature (lower than 26 °C). *ET* responded to changes in relative humidity, solar radiation, and wind speed in a quadratic curve manner with a pattern of first increasing and then decreasing. Net radiation was the major environmental factor controlling *ET* in the semi-arid agroecosystem of the Loess Plateau, followed by soil water content.

**Key Words:** the Loess Plateau; semi-arid region; evapotranspiration; net radiation; environmental controls

水分短缺是半干旱区农作物生长常见的限制因子,成为制约地区农业可持续发展的重要因素<sup>[1]</sup>。半干旱区农田干湿状况与降水、蒸散等生态系统水循环过程密切相关<sup>[2]</sup>。蒸散是土壤-植物-大气系统中水分传输和转化的主要途径,是农田生态系统水循环的重要环节<sup>[3]</sup>,农业用水中绝大部分(甚至99%)通过蒸散过程返还到大气<sup>[4]</sup>。黄土高原是我国北方典型旱地农业分布区;大部分地区年降水量较少,雨量变率较大。黄土高原半干旱雨养农业区对降水量变化依赖性极强,是生态和农业脆弱地区<sup>[5]</sup>。有研究表明,黄土高原地区是响应气候变化的敏感区域,气候变暖将通过加快蒸散过程进而加剧黄土高原地区土壤干旱化程度<sup>[6]</sup>。掌握黄土高原地区农田蒸散变化特征及其影响因素,对于合理利用有限水资源,以及科学应对气候变化具有重要意义。

有研究表明,黄土高原近40年来蒸散整体呈上升趋势,湿度和温度是蒸散最重要的影响因子<sup>[7-8]</sup>。然而,这些研究成果主要基于蒸发皿资料或者由台站气象数据估计参考蒸散资料<sup>[9]</sup>,并非生态系统的实际蒸散,不能较好地反映黄土高原地区水分耗散的真实情况。近年来,涡度相关技术以其测量精度较高、理论假设条件较少,被认为是目前测定生态系统实际蒸散量最为有效的方法之一。本研究基于2010年黄土高原半干旱区野外生态系统观测站的涡度相关系统和气象梯度观测系统资料,分析了农田生态系统蒸散变化特征及其环境主导因子。

## 1 研究地点与方法

### 1.1 研究区自然概况

研究地点(35°33'N, 104°35'E, 海拔1896.7 m)位于黄土高原地区甘肃省定西市境内的中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象与生态环境试验基地。该地区属于温带大陆性半干旱气候,年均气温7.1 °C,年均降水量382.3 mm(来源于1979—2008年定西市气象站数据),其中87%集中于5—10月。研究区域下垫面平坦均匀;地带性土壤为黄土状亚粘土;主要农作物为春小麦。本研究将4—9月份分为生长季,其他6个月份为非生长季。2010年定西市气象站年降水量为399.5 mm,距平差异低于5%。本研究选取2010年观测资料来分析该地区平均降水条件下春小麦农田蒸散特征及其与环境因子的关系。

### 1.2 研究内容与方法

试验基地配备有涡度相关观测系统和气象梯度观测系统进行长期野外观测。涡度相关系统主要用于测定地表与大气间潜热通量(*LE*)交换,观测高度2.5 m。系统主要由三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell Scientific, USA)和CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O快速响应红外分析仪(Li7500, LI-COR, USA)组成,仪器采样频率10 Hz,实时观测数据记录于数据采集器(CR5000, Campbell Scientific, USA)。为了研究方便,*LE*数据均处理成半小时平均值。*LE*正值表示能量从地表向大气中传输,负值则相反。在*LE*计算之前,将原

始观测数据进行二次坐标旋转、Webb-Pearman-Leuning(WPL)校正<sup>[10]</sup>以及异常值剔除<sup>[11]</sup>等必要处理。同时,采用Falge等<sup>[12]</sup>提出的方法对由降水、断电等造成的缺失数据进行插补<sup>[13]</sup>。蒸散( $ET$ , mm)与潜热通量( $LE$ , MJ/m<sup>2</sup>)换算关系为 $LE = \lambda ET$ ,其中蒸发潜热 $\lambda$ 为2.45 MJ/kg。

气象梯度观测系统由1个自动雨量计(52203, RM Young, USA, 高度1.5 m)、1个空气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Finland, 观测高度1.5 m)、1个太阳短波辐射传感器(PIR, Eppley, USA, 高度1.5 m)、1个净辐射传感器(CN-40, EKO, Japan, 高度1.5 m)、1个风速风向传感器(5103V, RM Young, USA, 高度2.0 m)等组成,观测量分别为降雨量( $P$ )、空气温度( $T$ )、空气相对湿度( $RH$ )、太阳辐射( $DR$ )、净辐射( $R_n$ )、风速( $W_s$ )和风向( $W_d$ )等。利用水分时域反射仪(CS616, Campbell Scientific, USA)测定地下0.10, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 m土壤含水量( $\theta$ )。数据采集频率均为0.1 Hz, 存储于数据采集器

(CR1000, Campbell Scientific, USA)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄土高原春小麦农田降水量与土壤含水量的季节动态

农田生态系统蒸散与降水、土壤水分状况密切相关。2010年黄土高原半干旱区农田生态系统全年降水量为332.3 mm。降水主要集中在生长季(285.9 mm), 占全年降水量86%, 其中5月和8月降水量较大, 均超过60 mm。降水过程显著地影响0.10 m和0.20 m土壤含水量, 其中0.10 m土壤含水量对降水过程响应极为敏感, 随降水事件发生而波动; 而0.20 m土壤含水量响应相对滞后。0.10 m土壤含水量生长季期间波动较大; 在7.2%—19.9%之间变化, 平均值为12.0%。降水过程对0.40、0.60和0.80 m土壤含水量影响较少, 这3层土壤含水量季节变化相对较少。从图1可以看出, 生长季内土壤含水量0.40 m层明显大于其他各层, 而0.10 m层最低。

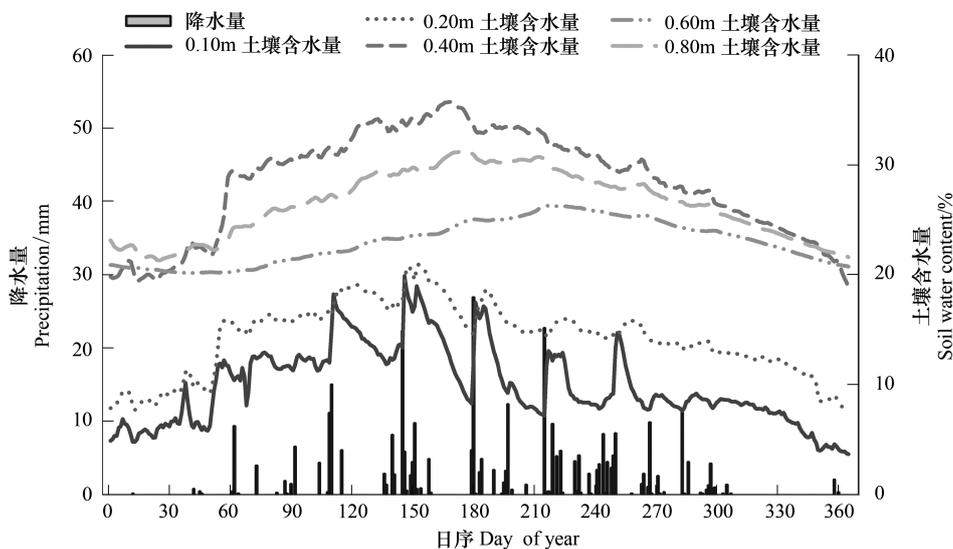


图1 降水量与不同深度土壤含水量的季节动态

Fig.1 Seasonal variations of precipitation and soil water content under different soil depth

### 2.2 黄土高原春小麦农田蒸散日、季动态

将每日相同时刻半小时尺度蒸散值按月份进行平均, 分析生态系统蒸散的月均日动态。黄土高原半干旱区农田生态系统生长季蒸散的日变化表现为早晚低、中午高的“单峰型”曲线特征(图2)。夜间蒸散较低, 接近于0, 整体变化平稳; 日间蒸散变化明显, 8:00左右, 蒸散速率迅速增大, 在正午前后(12:00—14:00间)达到最大值。随后蒸散速率下

降, 直至20:00左右, 蒸散速率下降至0附近。各月蒸散日峰值高度存在明显差异。最大日峰值出现在8月, 最低日峰值出现在5月。4—9月各月 $ET$ 峰值分别为0.18, 0.14, 0.15, 0.20, 0.22, 0.16 mm/h。非生长季各月蒸散也呈现出与生长季类似的“单峰型”曲线日变化特征, 且日变化曲线更为平滑。从图2可以看出, 非生长季各月蒸散日峰值显著低于生长季各月。在非生长季中, 3月和10月蒸散日峰值相对

较高,分别为 0.10 和 0.09 mm/h,其它 4 个月蒸散日峰值均低于 0.05 mm/h。

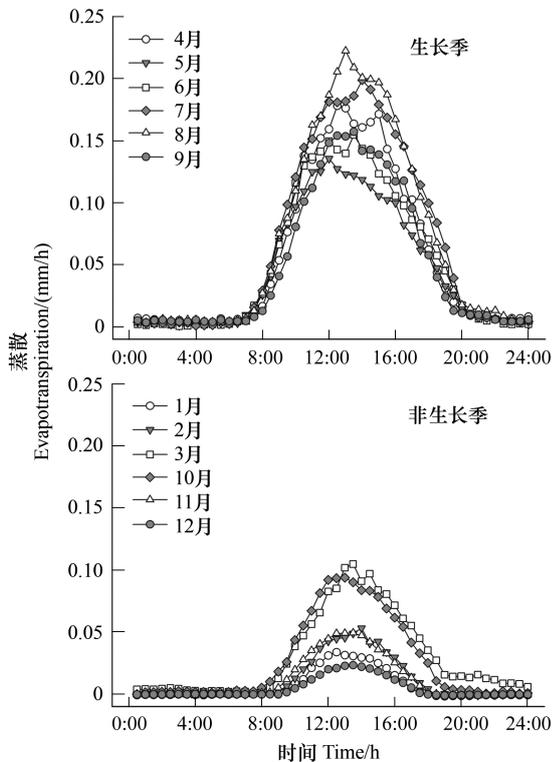


图2 黄土高原春小麦农田生态系统蒸散日动态

Fig.2 Diurnal variation of the spring wheat agroecosystem in the Loess Plateau

黄土高原半干旱区农田生态系统蒸散存在明显季节变化(图3),与降水季节分布密切相关(图1)。最大日蒸散率为 4.69 mm/d(4月25日);最少日蒸散率为 0.02 mm/d(12月23日)。与其他农田生态系统蒸散研究结果相比,本研究中最大日蒸散率值与王欣<sup>[14]</sup>关于黄土高原冬小麦日蒸散率值(4.60 mm/d)接近,然而明显低于 Burba<sup>[15]</sup>对小麦生态系统 7.0 mm/d 的报道,这可能与本研究区干旱少雨的气候条件有关。整个生长季平均日蒸散率为  $(1.38 \pm 0.75)$  mm/d(平均值 $\pm$ 标准差),明显低于黄土高原关于冬小麦(1.84 mm/d)和玉米(1.62 mm/d)的短期平均日蒸散率结果<sup>[14]</sup>。将每日蒸散值按月份进行累加,分析生态系统蒸散月累加值的季节动态。从月蒸散值来看,由于7、8月份降水较多(图1),蒸散量相对较高;1、2月份降水少,气温低,蒸散量相对较低。非生长季蒸散量显著低于生长季;二者之比为 0.26。全年累积蒸散量为 318.0 mm,其中生长季蒸散量为 252.4 mm,占全年蒸散量 79.4%。2010 年

的年蒸散量略低于年降水量(332.3 mm);全年蒸散量与降水量的比值为 95.7%。

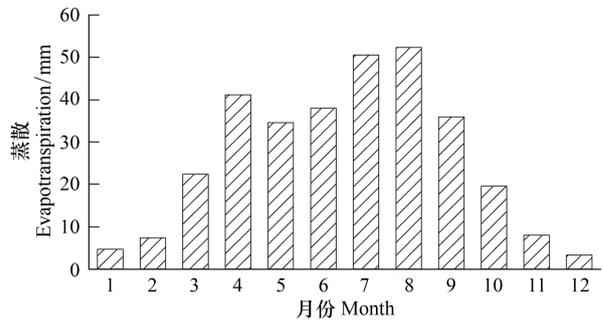


图3 黄土高原春小麦农田生态系统蒸散季节动态

Fig.3 Seasonal variations of the spring wheat agroecosystem in the Loess Plateau to environmental factors

### 2.3 环境因子对黄土高原春小麦农田蒸散的影响

环境因子显著地影响了黄土高原农田生态系统蒸散变化。从图4可以看出,黄土高原农田蒸散随土壤含水量增大呈指数增长趋势。当温度低于 26 °C,农田蒸散随温度增大呈指数增长趋势;当温度高于 26 °C,随空气温度增大呈降低趋势。农田蒸散随空气相对湿度、太阳辐射、风速增大呈先增大后降低的二次曲线变化趋势。当空气相对湿度大于 40%、或太阳辐射大于 1000 W/m<sup>2</sup>,或风速大于 3 m/s 情况下,蒸散随之降低。

黄土高原春小麦农田生态系统蒸散与环境因子的相关分析结果表明,在生长季,蒸散与净辐射、土壤含水量显著相关,与空气温度、空气相对湿度、饱和水汽压差相关性不明显;在非生长季,蒸散与净辐射、空气温度、土壤含水量显著相关、饱和水汽压差均显著相关,与空气相对湿度相关性不明显(表1)。在生长季和非生长季净辐射与蒸散相关性最好,说明净辐射是黄土高原农田生态系统蒸散最主要的环境驱动因子。水分蒸发需要能量,蒸散变化依赖于有效能量的多少,因此蒸散和净辐射之间存在显著正相关关系(表1)。另一个重要环境因子是土壤含水量,黄土高原农田蒸散与之相关性仅次于净辐射。由于大部分蒸散来自于土壤蒸发,因此土壤水分对蒸散影响显著<sup>[16]</sup>。在干旱半干旱区陆地生态系统,许多研究表明土壤含水量是调节蒸散的重要环境因子<sup>[15,17]</sup>。苗海霞<sup>[18]</sup>认为在土壤水分充足条件下,净辐射是蒸散的主要控制因子;而当土壤水分缺乏时,土壤湿度条件对蒸散影响显著<sup>[19]</sup>。

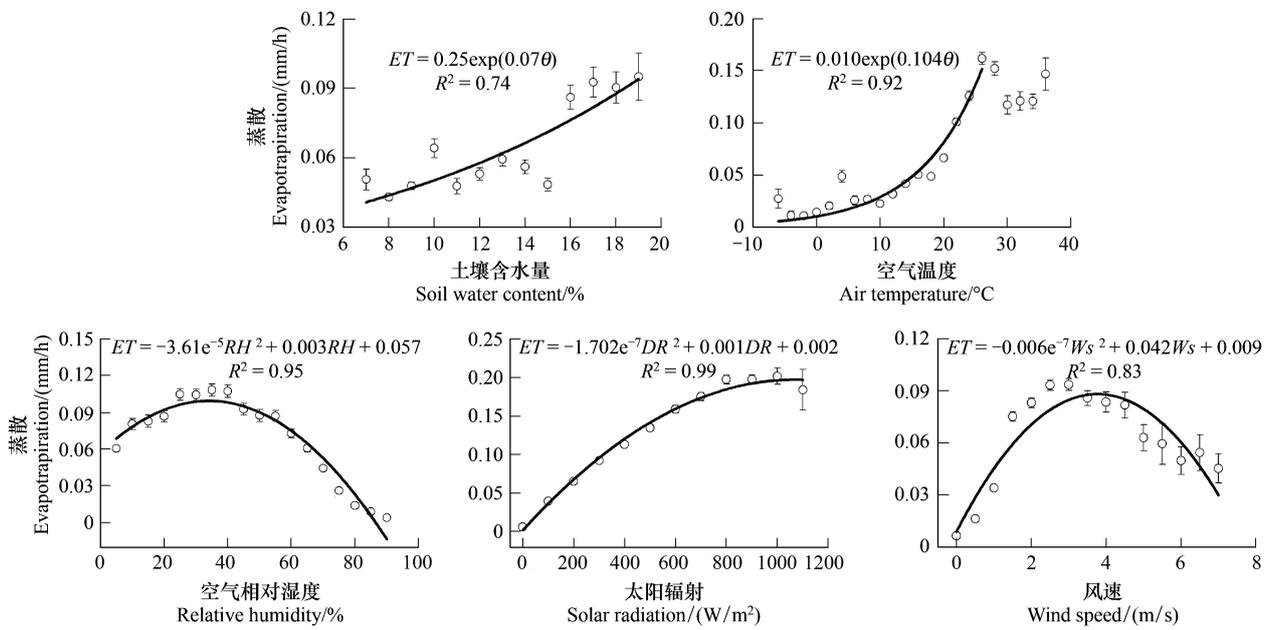


图 4 黄土高原春小麦农田生态系统生长季蒸散对环境因子的响应

Fig.4 Response of the spring wheat agroecosystem in the Loess Plateau to environmental factors in the growing season

表 1 农田生态系统蒸散与环境因子的相关分析

Table 1 Correlative analysis between evapotranspiration and environmental factors

环境因子 Environmental factors	相关系数 (生长季) Correlation coefficient (growing season)	相关系数 (非生长季) Correlation coefficient (non-growing season)
净辐射 Net radiation	0.540 **	0.716 **
空气温度 Air temperature	0.153	0.589 **
土壤含水量 Soil water content	0.296 **	0.596 **
空气相对湿度 Air relative temperature	0.161	0.138
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	0.084	0.436 **

\*\* P<0.01

蒸散作为重要的生态系统过程受多种环境因子和生物因子共同作用影响,除太阳辐射、土壤含水量、空气相对湿度、气温等非生物环境因子<sup>[20]</sup>,还包括叶面积指数<sup>[13]</sup>、气孔导度<sup>[19]</sup>等生物因子<sup>[21-22]</sup>。黄土高原农田生态蒸散变化特征是各种环境因子相互作用的结果。当空气温度在一定的范围内,随着温度升高,水分子获得的能量增大,运动加快<sup>[23]</sup>,分子间间隔增大,水易于由液态变成气态;同时,空气温度升高通常伴随饱和水汽差增大<sup>[24]</sup>,进而导致蒸散增加。然而,当温度升高到一定程度以后,由于黄

土高于地区土壤干旱缺水,即使温度再升高,有限的土壤水分已不能完全满足蒸散需要,蒸散停止升高趋势(图 4)。蒸散对太阳辐射的响应也存在类似情况(图 4)。风速则通过改变空气动力学阻力来影响蒸散过程<sup>[24]</sup>。然而,当风速大于一定值,在黄土高原地区通常伴随着空气温度下降,从而蒸散减少(图 4)。空气中水汽在一定范围内是有利于蒸散过程的发生。然当空气相对湿度持续增加,蒸发表面与其临近空气的水汽压差将降低,导致蒸散过程的驱动力下降<sup>[25]</sup>,蒸散呈降低趋势。由于本研究缺少叶面积指数等生物因子观测资料,不能很好地探讨生物因子对蒸散的影响,这是本研究的不足。

### 3 结论

(1)黄土高原半干旱区农田生态系统蒸散呈早晚低、中午高的“单峰型”日变化特征,最大日峰值出现在 8 月。农田蒸散且具有明显季节动态,与降水季节分布密切相关。

(2)全年(2010 年)蒸散量略低于年降水量;蒸散量与降水量的比值为 95.7%。

(3)黄土高原农田生态系统蒸散随土壤含水量和空气温度(低于 26 °C)增大呈指数增长趋势;随空气相对湿度、太阳辐射、风速增大呈先增大后降低的二次曲线变化趋势。

(4)净辐射是黄土高原半干旱区农田生态系统蒸散主要环境控制因子,土壤含水量次之。

#### References:

- [ 1 ] Li F M, Zhao S L, Duan X S, Gao S M, Feng B. Preliminary study on limited irrigation for spring wheat field in semi-arid region of loess plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6 ( 3 ): 259-264.
- [ 2 ] Liu S, Li S G, Yu G R, Asanuma J, Sugita M, Zhang L M, Hu Z M, Wei Y F. Seasonal and interannual variations in water vapor exchange and surface water balance over a grazed steppe in central Mongolia. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 ( 6 ): 857-864.
- [ 3 ] Xie X Q. Connotation and some advances of the research on the water movement and its regional change regular in agro-ecosystem of north China. *Advance in Earth Science*, 2003, 18 ( 3 ): 440-446.
- [ 4 ] Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13 ( 2/3 ): 125-153.
- [ 5 ] Zhang Q, Wang S. On land surface processes and its experimental study in Chinese Loess Plateau. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(2): 167-173.
- [ 6 ] Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau ( 1981—2006 ): Impacts of climate changes and human activities. *Science in China ( Series D )*, 2008, 51(1): 67-78.
- [ 7 ] Li Z. Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 4139-4145.
- [ 8 ] Qiu X F, Liu C M, Zen Y. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 437-442.
- [ 9 ] Fan J, Shao M A, Wang Q J. Comparison of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 98-102.
- [ 10 ] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [ 11 ] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, 3(4): 571-583.
- [ 12 ] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71-77.
- [ 13 ] Yang F L, Zhou G S. Characteristics and driving factors of energy budget over a temperate desert steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5769-5780.
- [ 14 ] Wang X, Wen J, Wei Z G, Tian H, Wang L, Li Z C, Shi X K, Zhang T T, Liu R, Zhang J H. Study on water deficit of the topsoil over the Chinese Loess Plateau mesa region. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3): 530-538.
- [ 15 ] Burba G G, Verma S B. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(1/4): 190-201.
- [ 16 ] Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, De Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [ 17 ] Yang F L, Zhou G S. Characteristics and modeling of evapotranspiration over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China. *Journal of Hydrology*, 2011, 396(1/2): 139-147.
- [ 18 ] Miao H X. Effects of Cultivation and Grazing on Evapotranspiration of Steppe Ecosystems in Inner Mongolia, China [ D ]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [ 19 ] Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112(1): 31-49.
- [ 20 ] Monteith J L, Unsworth M H. *Principles of Environmental Physics*. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press of Elsevier, 2008: 250-257.
- [ 21 ] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): RG2005.
- [ 22 ] Farahani H J, Howell T A, Shuttleworth W J, Bausch W C. Evapotranspiration: progress in measurement and modeling in agriculture. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, 50(5): 1627-1638.
- [ 23 ] Singer K D, Kuzyk M G, Sohn J E. Second-order nonlinear-optical processes in orientationally ordered materials: relationship between molecular and macroscopic properties. *Journal of the Optical Society of America B*, 1987, 4(6): 968-976.
- [ 24 ] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: FAO, 1998: 21-21.
- [ 25 ] Chapin I F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer-Verlag, 2002: 62-62.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李凤民, 赵松岭, 段舜山, 高世铭, 冯波. 黄土高原半干旱区春小麦农田有限灌溉对策初探. *应用生态学报*, 1995, 6(3): 259-264.
- [ 3 ] 谢贤群. 我国北方地区农业生态系统水分运行及区域分异规律研究的内涵和研究进展. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 440-446.
- [ 5 ] 张强, 王胜. 关于黄土高原陆面过程及其观测试验研究. *地球科学进展*, 2008, 23(2): 167-173.
- [ 7 ] 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(12): 4139-4145.
- [ 8 ] 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*, 2003, 18(4): 437-442.
- [ 9 ] 樊军, 邵明安, 王全九. 黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 98-102.
- [ 13 ] 阳伏林, 周广胜. 内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子. *生态学报*, 2010, 30(21): 5769-5780.
- [ 14 ] 王欣, 文军, 韦志刚, 田辉, 王磊, 李振朝, 史小康, 张堂堂, 刘蓉, 张静辉. 中国黄土高原塬区表层土壤水分盈亏状况的研究. *高原气象*, 2009, 28(3): 530-538.
- [ 18 ] 苗海霞. 开垦和放牧对内蒙古半干旱草原蒸散的影响 [ D ]. 北京: 中科院植物研究所, 2008.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.9 May ,2014( Semimonthly )**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Research progress on ecosystem complexity-stability relationships based on soil food web .....  
..... CHEN Yunfeng, TANG Zheng, LI Hui, et al (2173)
- The ecological restoration effort of degraded estuarine wetland in Northwest Yunnan Plateau, China .....  
..... FU Wenchao, TIAN Kun, XIAO Derong, et al (2187)
- The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression ...  
..... LI Yangbing, LUO Guangjie, BAI Xiaoyong, et al (2195)
- Correlation between the distribution characteristics of poisonous plants and *Ochotona curzoniae*, *Myospalax baileyi* in the East of  
Tibetan Plateau Alpine meadow ecosystem ..... JIN Liang, SUN Li, CUI Huijun, et al (2208)
- Effects of the surrounding habitat on the spider community and leafhopper population in tea plantations .....  
..... LI Jianlong, TANG Jingchi, LI Xiudi, et al (2216)

**Autecology & Fundamentals**

- Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir Area .....  
..... GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (2228)
- Kinetics of nutrient uptake by three emergent plants, *Phragmites australis*, *Typha orientalis* and *Scirpus triquetra* .....  
..... ZHANG Xiling, WANG Lixin, LIU Huamin, et al (2238)
- Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii*  
plantation ..... HU Qiwu, NIE Lanqin, ZHENG Yanming, et al (2246)
- Effects of shrub (*Caragana microphalla* Lam.) encroachment on water redistribution and utilization in the typical steppe of Inner  
Mongolia ..... PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (2256)
- Effects of shadowing on methane Emissions from *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* .....  
..... CHEN Xixiang, YANG Yanhua, JIANG Jun, et al (2266)
- Oviposition preference and offspring performance of the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* and guava fruit fly *B. correcta*  
(Diptera: Tephritidae) on six host fruits ..... LIU Hui, HOU Bohua, ZHANG Can, et al (2274)
- Pollination Mechanisms of genus *Salvia* (Lamiaceae) in East Asia (China) .....  
..... HUANG Yanbo, WEI Yukun, GE Binjie, et al (2282)

**Population, Community and Ecosystem**

- The effect of resource pulse supply on interspecific competition of a few algal species ..... LI Wei (2290)
- Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns .....  
..... LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, et al (2297)
- Scale change and dependence of plant functional traits in hilly areas of the loess region, Shaanxi Province, China .....  
..... DING Man, WEN Zhongming, ZHENG Ying (2308)
- N and P stoichiometry of *Koeleria paniculata* leaf and soil in Xiangtan Manganese Mine wasteland .....  
..... XU Luyan, TIAN Dalun, WANG Guangjun, et al (2316)
- Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau .....  
..... YANG Fulin, ZHANG Qiang, WANG Wenyu, et al (2323)
- Isolation and Biolog identification of the high-efficiency azotobacter from iron tailing under different vegetation restoration modes .....  
..... LI Wen, YAN Aihua, HUANG Qiuxian, et al (2329)
- Assessing effects of *Cupressus chengiana* plantations in the dry valley of Zagunao River, Li county of Sichuan Province .....  
..... LI Dongsheng, LUO Da, SHI Zuomin, et al (2338)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- Landscape diversity of *Paerargyrops edita* Tanaka stock in Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground ..... CAI Jiandi, SU Guoqiang, MA Chao, et al (2347)
- Landscape classification in a small area for soil series survey and mapping: a case study in the Ningzhen hills, China ..... LU Haodong, PAN Jianjun, FU Chuancheng, et al (2356)
- Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the north china plain ..... HU Wei, YAN Changrong, LI Yingchun, et al (2367)

**Resource and Industrial Ecology**

- Factor decomposition of carbon intensity in Xiamen City based on LMDI method ..... LIU Yuan, LI Xiangyang, LIN Jianyi, et al (2378)
- Evaluation index system of sustainable livelihoods ecotourism strategy: a case study of wangjiazhai community in baiyangdian wetland nature reserve, Hebei ..... WANG Jin, ZHANG Yujun, SHI Ling (2388)
- Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters ..... FAN Chao, QIU Yanping, LI Zhiqiang, et al (2401)
- Evaluation on control efficiency of bethylid parasitoids on pest insects indoor: a case of *Sclerodermus* sp. (Hymenoptera: Bethylidae) ..... ZHAN Maokui, YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, et al (2411)

**Urban, Rural and Social Ecology**

- The dynamic change of herdsman well-being and ecosystem services in grassland of Inner Mongolia: take Xilinguole League as example ..... DAI Guangshuo, NA Risu, DONG Xiaobin, et al (2422)
- The construction of the eco-agricultural yards in three gorges reservoir area based on agricultural non-point source pollution zones ..... LIU Juan, XIE Qian, Ni Jiupai, et al (2431)
- Spatial pattern gradient analysis of a transect in a hilly urban area in China from the perspective of transportation corridor sprawl ..... LÜ Zhiqiang, DAI Fuqiang, ZHOU Qigang (2442)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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 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

本期责任副主编 于贵瑞 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 34 卷 第 9 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 9 (May, 2014)

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

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

出 版 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂  
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

订 购 全国各地邮局  
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

广告经营 京海工商广字第 8013 号  
许 可 证

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

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

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

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

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

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



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