

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

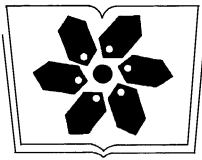
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第9期 Vol.31 No.9 **2011**

中国生态学会
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 31 卷 第 9 期

2011 年 5 月 (半月刊)

目 次

EAM 会议专刊述评——气候变化下旱区农业生态系统的可持续性	李凤民, Kadambot H. M Siddique, Neil C Turner, 等 (I)
第二届生态系统评估与管理(EAM)国际会议综述	李朴芳, 赵旭喆, 程正国, 等 (2349)
应对全球气候变化的干旱农业生态系统研究——第二届 EAM 国际会议青年学者论坛综述	赵旭喆, 李朴芳, Kadambot H. M Siddique, 等 (2356)
微集雨模式与降雨变律对燕麦大田水生态过程的影响	强生才, 张恒嘉, 莫非, 等 (2365)
黑河中游春小麦需水量空间分布	王 瑶, 赵传燕, 田风霞, 等 (2374)
祁连山区青海云杉林蒸腾耗水估算	田风霞, 赵传燕, 冯兆东 (2383)
甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性	常雅军, 陈 琦, 曹 靖, 等 (2392)
灌水频率对河西走廊绿洲菊芋生活史对策及产量形成的影响	张恒嘉, 黄高宝, 杨 斌 (2401)
玛纳斯河流域水资源可持续利用评价方法	杨 广, 何新林, 李俊峰, 等 (2407)
西北旱寒区地理、地形因素与降雨量及平均温度的相关性——以甘肃省为例	杨 森, 孙国钧, 何文莹, 等 (2414)
黑河河岸植被与环境因子间的相互作用	许莎莎, 孙国钧, 刘慧明, 等 (2421)
干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响	蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤 (2430)
树锦鸡儿、柠条锦鸡儿、小叶锦鸡儿和鹰嘴豆干旱适应能力比较	方向文, 李凤民, 张海娜, 等 (2437)
胡杨异形叶绿素荧光特性对高温的响应	王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等 (2444)
柠条平茬处理后不同组织游离氨基酸含量	张海娜, 方向文, 蒋志荣, 等 (2454)
玛河流域扇缘带盐穗木土壤速效养分的“肥岛”特征	涂锦娜, 熊友才, 张 霞, 等 (2461)
摩西球囊霉对三叶鬼针草保护酶活性的影响	宋会兴, 钟章成, 杨万勤, 等 (2471)
燕麦属不同倍性种质资源抗旱性状评价及筛选	彭远英, 颜红海, 郭来春, 等 (2478)
光周期对燕麦生育时期和穗分化的影响	赵宝平, 张 娜, 任长忠, 等 (2492)
水肥条件对新老两个春小麦品种竞争能力和产量关系的影响	杜京旗, 魏盼盼, 袁自强, 等 (2501)
猪场沼液对蔬菜病原菌的抑制作用	尚 斌, 陈永杏, 陶秀萍, 等 (2509)
不同夏季填闲作物种植对设施菜地土壤无机氮残留和淋洗的影响	王芝义, 郭瑞英, 李凤民 (2516)
不同群体结构夏玉米灌浆期光合特征和产量变化	卫 丽, 熊友才, Baoluo Ma, 等 (2524)
脱硫废弃物对碱胁迫下油菜幼叶细胞钙分布及 Ca^{2+} -ATPase 活性的影响	毛桂莲, 许 兴, 郑国琦, 等 (2532)
过去 30a 玛纳斯河流域生态安全格局与农业生产力演变	王月健, 徐海量, 王 成, 等 (2539)
基于 RS 和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价	岳东霞, 杜 军, 刘俊艳, 等 (2550)
毛乌素沙地农牧生态系统能值分析与耦合关系	胡兵辉, 廖允成 (2559)
民勤绿洲农田生态系统服务价值变化及其影响因子的回归分析	岳东霞, 杜 军, 巩 杰, 等 (2567)
青岛市城市绿地生态系统的环境净化服务价值	张绪良, 徐宗军, 张朝晖, 等 (2576)
基于 3S 技术的祖厉河流域农村人均纯收入空间相关性分析	许宝泉, 施为群 (2585)
专论与综述	
全球变化下植物物候研究的关键问题	莫非, 赵 鸿, 王建永, 等 (2593)
区域气候变化统计降尺度研究进展	朱宏伟, 杨 森, 赵旭喆, 等 (2602)
干旱胁迫下植物根源化学信号研究进展	李冀南, 李朴芳, 孔海燕, 等 (2610)
山黧豆毒素 ODAP 的生物合成及与抗逆性关系研究进展	张大伟, 邢更妹, 熊友才, 等 (2621)
旱地小麦理想株型研究进展	李朴芳, 程正国, 赵 鸿, 等 (2631)
小麦干旱诱导蛋白及相关基因研究进展	张小丰, 孔海燕, 李朴芳, 等 (2641)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-05



封面图说: 覆膜-垄作燕麦种植——反映了雨水高效利用和农田水生态过程的优化(详见强生才 P2365)。

彩图提供: 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室莫非 E-mail: mofei371@163.com

黑河中游春小麦需水量空间分布

王 瑶¹, 赵传燕^{1,*}, 田风霞², 王 超²

(1. 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要:合理估计春小麦的需水量(ET_c)是进行干旱区水资源配置的有效方法,利用黑河中游 14 个气象站 1970—2009 年的逐日气象资料,应用 Penman-Monteith 公式估算各站点的参考作物蒸散量,并根据春小麦生长期的作物系数,在地理信息系统(GIS)技术支持下得出黑河中游春小麦需水量的空间分布及变化趋势。结果表明:1970—2009 年黑河中游春小麦作物需水量整体分布具有从南向北递增的趋势,全生长期需水量在 573—781 mm 之间;高台、张掖、临泽、民乐、山丹、酒泉的春小麦需水量分别为 731.26、686.88、598.24、728.89、719.77、713.59 mm,其中生长中期需水量最大,分别占全生长期的 51.67%、51.11%、50.96%、51.24%、50.83% 和 50.77%;日平均气温、日照时数、风速、降水量、最小相对湿度和各因子的影响力由大到小分别占总影响力的 57.29%、26.92%、15.15%、1.41% 和 0.78%。

关键词:春小麦需水量;空间分布;气候因子;黑河中游

Spatial variation of water requirement for spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin

WANG Yao¹, ZHAO Chuanyan^{1,*}, TIAN Fengxia², WANG Chao²

1 Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 Key Laboratory of Western China's Environmental Systems with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Sustainability of irrigated agriculture depends primarily on the efficient management of irrigation water. Understanding crop evapotranspiration (ET_c) is essential in planning the most effective use of water resources in the arid northwest China. ET_c is not only the important component of water balance, but also an important requirement for proper constitution of irrigation strategy. In this study, the middle reach of Heihe River was selected as the study area which has the largest agricultural oases in China. Agricultural development has over 2000 years history own to its flat land. Irrigated spring wheat is the main crop in this region. With the increase in population growth and farmland area is 2452.1 km² agricultural water requirement in the middle Heihe River basin is rapidly increasing. This results in the conflict between the agricultural water demand and ecological water demand. Ecological environment deteriorates due to vegetation disappearing at a rapid rate in large areas in the region. In the field, when the crop is small, water is predominately lost by soil evaporation, but once the crop is well developed and the canopy completely covers the soil, transpiration becomes the main process of water loss. The objective of this study was to map the spatial distribution of water requirements and analyze the relationship between the spatial variation of water requirement and main meteorological parameter during 1970—2009 in the Heihe River basin. First, reference crop evapotranspiration (ET_0) was calculated using Penman-Monteith equation with daily data obtained from 14 meteorological stations in and around the study area. Secondly, the crop coefficients (K_c) of spring wheat in different growing stages were adjusted according to the data obtained from the field studies. Finally, we estimated the spatial distribution and variation trend of the water requirement of spring wheat in the middle reaches of Heihe river basin with the use of Geographical information system (GIS). The results showed that the trend of crop evapotranspiration (ET_c) gradually increased from south to north, the ET_c varies from 573 mm to 781 mm during the entire

基金项目:国家自然科学基金项目(91025015, 30770387); 国家环境保护公益性基金资助项目(NEPCP 200809098)

收稿日期:2010-05-12; **修订日期:**2010-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn

growing season. The ET_c in Gaotai, Zhangye, Linze, Minle, Shandan, and Jiuquan is 731.26, 686.88, 598.24, 728.89, 719.77 and 713.59 mm, respectively. The ET_c of mid-season stage is the largest percentage during the entire growing season, accounting for 51.67%, 51.11%, 50.96%, 51.24%, 50.83% and 50.77% of total ET_c at six meteorological stations, respectively. Temperature, precipitation, wind speed, min relative humidity and sunshine duration were the dominant meteorological parameters influencing ET_c , and the relative influences of temperature, sunshine duration, wind speed, precipitation and min relative humidity are 57.29%, 26.92%, 15.15%, 1.41% and 0.78% respectively.

Key Words: crop water requirement; spatial distribution; meteorological factors; the middle reaches of Heihe River basin

黑河中游位于河西走廊中部,属于典型的温带大陆性气候。农业发展在很大程度上依赖于灌溉,该区灌溉农业已有 2000 多年的历史。春小麦是这一地区的主要农作物,消耗了大量的灌溉水。随着人口的增加,耕地面积不断扩大,截至 2000 年黑河中游的灌溉农田面积已达到 2452.1 km^2 ^[1],2000 年黑河流域中游区农业用水量占流域实际用水量的 84.9%^[2]。农业用水的持续增加,导致农业用水和生态用水、中游用水和下游用水矛盾的日益尖锐,如何规划和管理灌溉用水、有效利用水资源已显得十分重要^[3]。精确量化作物蒸散量是水资源分配方案、灌溉计划的基础,对于优化作物产量、评价管理措施有着重要的作用。量化作物蒸散量的常用方法是作物系数法,即作物系数与参考作物蒸散(ET_0)的乘积。由此,参考作物蒸散(ET_0)研究成为作物蒸散发研究关注的焦点。由于直接观测 ET_0 存在困难,模型模拟则成为有效的工具,普遍应用的模型包括基于温度、辐射、蒸发皿和综合型的蒸散发模型^[4]。但不同的方法在不同的气候区域所产生的估算误差不同,有的方法在干旱区或干旱季节产生的误差相当大^[5]。因此模型的比较研究在众多地区开展,大量的模型评估研究得出,Penman-Monteith 模型在不同的气候条件下适用性最好^[6-7]。由于该模型综合考虑了影响蒸散的大气物理特性和植物生理机制,具有很好的物理基础,能比较清楚地反映蒸散的变化过程及其影响机制,目前被联合国粮农组织(FAO)推荐为作物需水量估算的唯一模型^[8]。本文选择 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量,根据春小麦不同生育期的作物系数,对黑河中游地区春小麦的需水量空间变化差异性进行探索,以期为该节水农业的实施提供较为科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑河中游位于河西走廊中部,介于东经 $96^{\circ}42'$ — $102^{\circ}00'$,北纬 $37^{\circ}41'$ — $42^{\circ}42'$ 之间,海拔为 1131—2891 m,河道长 185 km,面积 $2.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占黑河流域总面积的 15.9%^[9],行政上包括:张掖市、酒泉市、高台县、临泽县、山丹县、民乐县等(图 1),是由冲洪积砾石戈壁平原,冲洪积细土平原及风积平原组成的走廊平原。本研究区属于典型的温带大陆性气候。气候干燥,降水量小而蒸发量很大,区内多年平均降水量由西南部的 250 mm 向东北减少至不足 100 mm,多年平均蒸发量由西南部的 1200 mm 向东北增至 2200 mm,年平均气温 7°C ,年相对湿度 52%,年日照时数 3085 h。典型土壤为灰棕荒漠土与灰漠土,除这些地带性土壤以外,还有灌淤土(绿洲灌溉耕作土)、盐土、潮土(草甸土)、潜育土(沼泽土)和风沙土等非地带性土壤。植被为温带小灌木、半灌木荒漠植被。主要种植的粮食作物有小麦、玉米等,经济作物以油菜、甜菜为主。

1.2 数据来源

本研究收集有黑河流域中游地区及其周边 14 个气象台站 1970—2009 年的实测数据,主要包括日最高气温、日最低气温、日降水量、日平均相对湿度、日气压、日照时数和日平均风速。春小麦的物候信息来源于高台、民乐、张掖、临泽、山丹和酒泉各个市(县)农技站的实测数据,其中包括播种、出苗、分蘖、拔节、抽穗、乳熟和成熟的时间。另外,还收集到研究区 30 m 分辨率的数字高程模型(DEM,图 1)和 2000 年的 TM 影像,用于提取研究区的地形信息和解译春小麦的地理分布。

1.3 研究方法

在不受水分限制的情况下,作物的蒸散量(ET_c)仅与作物本身的生理特性和外界蒸发条件如气象因子等

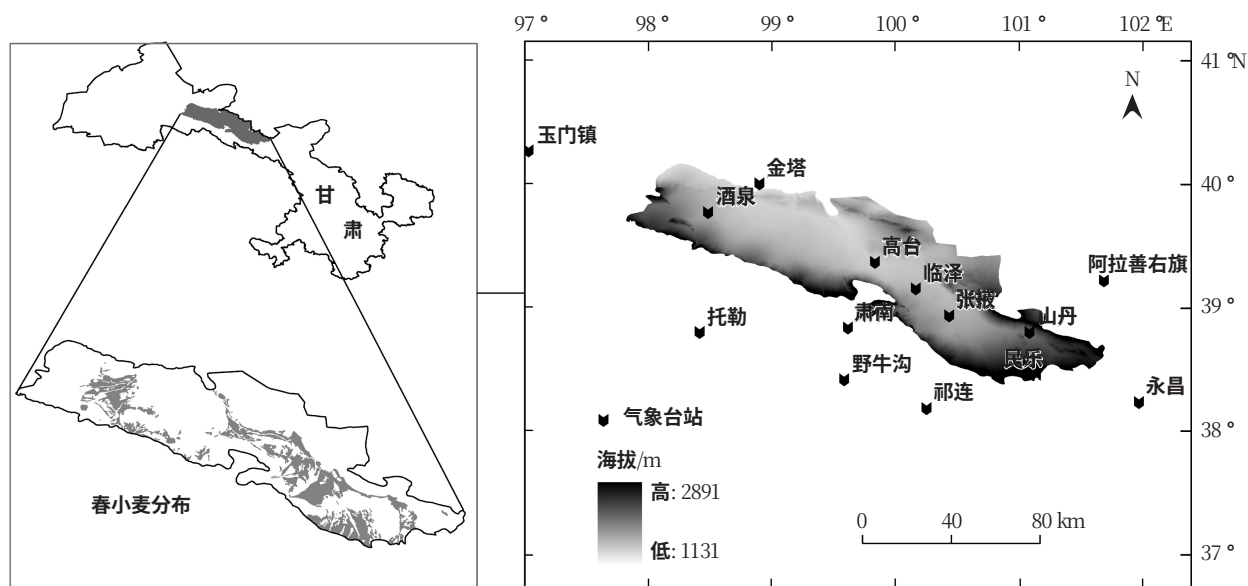


图1 黑河中游相对位置、数字高程模型及气象台站分布

Fig. 1 The location, DEM of the middle reaches of Heihe river basin and distribution of meteorological stations

因素有关,作物蒸散量表达式为:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物需水量; K_c 为作物系数。

1.3.1 参考作物蒸散量的计算

计算参考作物蒸散量的方法很多,据统计目前有 20 种参考作物蒸散量估算模式^[10-12]。大致可分为基于温度的估算模型(如 Hargreaves, FAO-24 Blaney-Criddle)、基于能量的估算模型(如 FAO-24 radiation, Priestley-Taylor, Turc)、基于蒸发皿的估算模型(如 FAO-56 Pan evaporation)和基于结合型的估算模型(如 FAO-24 Penman)。美国灌溉与水文技术委员会(ASCE)采用分布在 11 种不同气候条件下实测的蒸渗仪数据资料作为参照,分析比较了 20 种参考作物蒸散量计算公式的精度,结果表明,FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算的参考作物蒸散量,在不同的气候条件下都与实测值非常接近^[8]。

$$ET_0 = \frac{0.409\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中, Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/K); R_n 为净辐射(MJ/m²); G 为土壤热通量(MJ/m²); γ 为干湿计常数(kPa/°C); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); T 为平均气温(°C), u_2 为 2 m 处的风速(m/s)。

1.3.2 作物系数计算方法

FAO-56 对作物生育期划分为初始生长期、生长发育期、生长中期和生长末期。初始生长期是由播种至覆盖率接近 10%,生长发育期是从覆盖率 10% 到完全覆盖,生长中期从完全覆盖到成熟期开始,生长末期从成熟到收获。利用本研究区内各个站点的实测资料,确定各个站点春小麦的作物生育期。黑河中游地区由于所处的海拔不同,气候要素有一定的差异,所以各个地区春小麦的物候期不尽相同,春小麦生育期与 FAO-56 所列出的标准条件有一定的差异,黑河中游春小麦作物系数 K_c 是根据 FAO-56 的推荐值^[8] 并进行调整,调整公式如下:

$$K'_{mid} = K_{mid} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3} \quad (3)$$

$$K'_{end} = K_{end} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3} \quad (4)$$

$$K_{ci} = K_{cprev} + \left[\frac{i - \sum (L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cnext} - K_{cprev}) \quad (5)$$

式中, K'_{emid} 和 K'_{eend} 为作物生长中期和生长末期的调整作物系数, K_{emid} 和 K_{eend} 为作物生长中期和生长末期 FAO-56 推荐的作物系数; RH_{min} 为计算时段内日最小相对湿度的平均值(%) ; u_2 为计算时段内 2 m 高处的日平均风速(m/s) ; h 为计算时段内的平均株高(m) , $0.1m \leq h < 10m$; K_{ci} 为第 i 天的作物系数; i 为生长季的天数(d) , L_{stage} 为计算日在生长季内所处的天数(d) , L_{prev} 为计算日前生长季的总天数(d) 。 K_{cprev} 和 K_{cnext} 分别为上一生长阶段和下一生长阶段的作物系数。

1.3.3 影响春小麦蒸散量的气候因子分析

由公式(2)可以看出,影响参考作物蒸散发的因素很多,且彼此之间存在着一定的相关性,因而在分析变量的重要性时会有信息的重叠。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)法是一种将多个指标化为少数相互无关的综合指标的统计方法^[13-15],它通过将原来指标重新组合成新的相互无关的几个综合指标,尽可能多地反映原来指标的信息。通过主成分分析能够客观地确定各指标的权重,对多变量进行科学评价。主成分分析的基本过程分为以下几个步骤:①变量标准化处理,因为影响 ET_0 的变量量纲不一致,数据之间差异较大,因此需要对其进行标准化处理,使各种不同指标化为同度量的指标,各指标之间具有可比性;②计算各变量的相关系数矩阵,求出特征值和对应的特征向量;③计算主成分贡献率,确定主成分个数。以上步骤在 SPSS 软件中完成。

1.3.4 参考作物蒸散量的空间化

根据公式(2)计算各气象台站参考作物蒸散量,通过 ArcGis 软件中的 Kriging 地统计插值方法得出全流域参考作物蒸散量的空间分布,利用中游灌区的边界提取农业灌区参考作物蒸散发的空间分布,然后根据各地区的作物系数,得出春小麦各个生长阶段及全生长期需水量的空间分布。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散量的估算

参考作物蒸散量主要受气候条件的影响。根据公式(2)计算研究区典型站点的蒸散发量(表1)。在生长初期, ET_0 在各个地区都较低,介于 60.71—72.62 mm 之间,平均值为 68.90 mm,因生长初期,地表覆盖度较低,土壤蒸发对蒸散量的贡献较大。生长发育期是作物迅速生长的阶段, ET_0 介于 226.83—275.39 mm 之间,平均值为 262.71 mm,土壤蒸发对蒸散量的贡献减小,作物蒸腾的贡献增大。生长中期作物覆盖度最大,作物蒸腾对蒸散量的贡献较大, ET_0 介于 255.94—315.85 mm 之间,平均值为 296.11 mm。生长末期, ET_0 介于 109.04—135.85 mm 之间,平均值为 125.36 mm。根据报道,1960—2003 年高台、张掖、民乐、临泽、山丹地区多年平均 ET_0 分别为:1146.40、1121.09、1015.92、1053.10、1228.16 mm^[16],本研究估算高台、张掖、民乐、临泽、山丹地区多年平均 ET_0 分别为:989.23、954.66、898.65、1001.01、1023.41 mm,本研究结果与前人研究结果相吻合。

表1 不同台站春小麦不同生长阶段的参考作物蒸散发量

Table 1 The evapotranspiration of spring wheat at different growing stage in different station

台站 Stations	ET_0 /mm				
	初始阶段 Initial stage	生长发育期 Development stage	生长中期 Mid-season stage	生长末期 Late-season stage	全生长期 Growing season
高台	70.28	274.76	315.85	128.88	789.76
张掖	69.64	261.01	292.64	123.08	746.38
民乐	60.71	226.83	255.94	109.04	652.52
临泽	72.62	275.39	308.87	127.60	784.48
山丹	69.49	263.83	301.82	135.85	770.98
酒泉	70.70	274.44	301.57	127.70	774.40

Allen 等建议可以用蒸发皿观测的蒸发量与 PM 模型模拟值进行比较,因为蒸发皿与 PM 过程不同,需要对观测值进行校正^[8]。在 6 个站点用两种方法比较的结果显示,决定系数(R^2)在 0.84 以上,均方根误差(RMSE)在 2.04 mm 以下。

2.2 春小麦作物系数

通过式(3)—(5)可计算得出春小麦 4 个生长阶段的作物系数 K_c ,以 2008 年高台县为例,得出 2008 年春小麦不同生长阶段需水量与作物系数的曲线(图 2)。生长初期作物系数稳定,在生长发育期(播种 54—81d 后),作物系数由 0.38 增至 1.24,在生长中期作物系数保持稳定,在生长末期(播种 81—106d 后),作物系数由 1.24 降至 0.5。

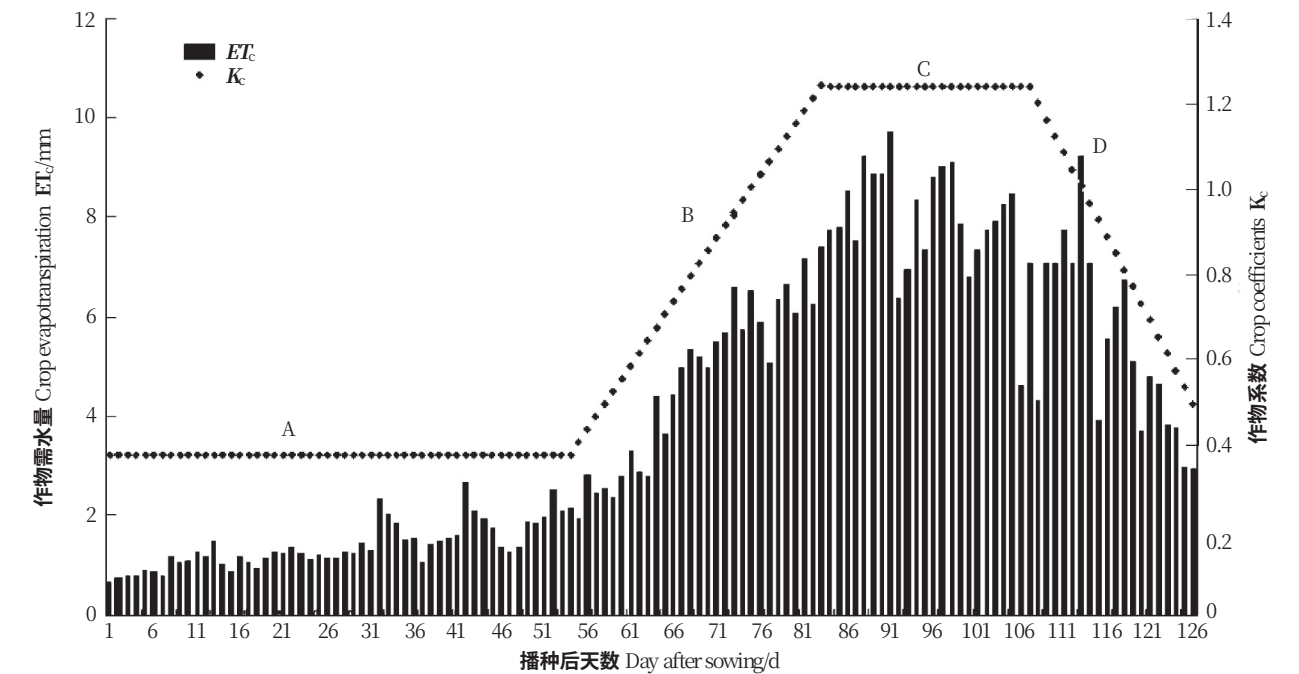


图 2 高台县春小麦不同生长阶段作物系数曲线与需水量

Fig. 2 The crop coefficient curve and crop water requirement of spring wheat at different growing stage in Gaotai county

A: 生长初期; B: 生长发育期; C: 生长中期; D: 生长末期

2.3 影响春小麦需水量的气候因子分析

气候因子是影响作物需水量的主要因素,它不仅影响蒸腾速率,也直接影响作物生长发育。为了探讨气候因子对黑河中游春小麦需水量变化的影响,本文对春小麦与所选取的 5 个气象因子(日平均气温、日降水量、日平均风速、日最小相对湿度和日照时数)进行主成分分析,相关系数矩阵见表 2。可以看到一些气候因子之间的相关系数值很大,特别是日降水量和日最小相对湿度因子,说明它们之间相关性很强。主成分分析

表 2 气候因子之间的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix among climate factors

项目 Item	气温 Temperature	降水 Precipitation	风速 Wind speed	最小相对湿度 Min relative humidity	日照时数 Sunshine duration
气温 Temperature	1.000				
降水 Precipitation	-0.278	1.000			
风速 Wind speed	-0.315	-0.047	1.000		
最小相对湿度 Min relative humidity	0.181	0.468	-0.006	1.000	
日照时数 Sunshine duration	0.128	-0.057	-0.032	-0.003	1.000

方法就可以提取彼此独立的变量,从而筛选到具有代表性的因子。计算相关系数矩阵的特征值,相关系数矩阵的特征值及其贡献率、累积贡献率见表 3。可以看出前 4 个主成分的累计贡献率达到 89.895% > 80%。这 4 个主成分基本上代表了原来 5 个气候因子 89.895% 的信息,因此选用前 4 个主成分代替原气候因子。

表 3 特征值及贡献率

Table 3 The eigen value and contributive rate

主成分 Principal component	特征根 Eigen value	贡献率 Contributive rate/%	累计贡献率 Total contributive rate/%
1	1.690	33.799	33.799
2	1.205	24.103	57.902
3	0.972	19.444	77.346
4	0.627	12.549	89.895
5	0.505	10.105	100.000

表 4 主成分载荷矩阵

Table 4 The principal component loading matrix

	第一主成分 The first principal component	第二主成分 The second principal component	第三主成分 The third principal component	第四主成分 The forth principal component
气温 Temperature	0.678	-0.446	-0.053	0.534
降水 Precipitation	0.769	0.367	0.021	0.076
风速 Wind speed	-0.371	0.665	0.463	0.443
最小相对湿度 Min relative humidity	0.703	-0.433	0.180	-0.349
日照时数 Sunshine duration	0.076	-0.491	0.850	-0.135

表 4 是前 4 个主成分的载荷矩阵,可以看出,日降水量、日最小相对湿度对第一主成分相关系数最高,贡献最大,风速对第二主成分贡献最大,日照时数对第三主成分贡献最大,气温对第四主成分贡献最大。因此,日平均气温、降水量、风速、最小相对湿度和日照时数均为对春小麦需水量有重要影响的变量。

以日平均气温、降水量、风速、最小相对湿度和日照时数为自变量,以春小麦需水量为因变量,进行标准化和多元回归分析,各因子均通过 0.05 的置信度的检验,结果见表 5。

表 5 多元回归分析结果

Table 5 The results of multivariate regression analysis

	回归系数 Regression coefficient	标准系数 Standard coefficient	标准误差 Standard error	<i>t</i>
常量 Constant	-78.905		4.050	-19.483
气温 Temperature	7.039	0.813	0.107	65.782
降水 Precipitation	0.058	0.020	0.037	1.578
风速 Wind speed	20.738	0.215	1.134	18.290
最小相对湿度 Min relative humidity	-0.065	-0.011	0.074	-0.880
日照时数 Sunshine duration	4.343	0.382	0.128	33.853

$$\text{回归方程为: } Y = 7.039T + 0.058P + 20.738u_2 - 0.065RH_{\min} + 4.343SR - 78.905 \quad (6)$$

式中, T 为气温, P 为降水量, u_2 为风速, $RH_{\min}$ 为最小相对湿度, SR 为日照时数。

标准回归系数是为了消除不同指标不同计量单位带来的影响而进行的标准化处理^[13]。若从各因子对春小麦需水量变化的相对影响力百分比来看,日平均气温、降水量、风速、最小相对湿度和日照时数各因子分别占总影响力的 57.29%、1.41%、15.15%、0.78% 和 26.92%。

2.4 春小麦需水量的空间分布

通过 ArcGis 软件中的 Kriging 地统计插值方法得出全流域参考作物蒸散量的空间分布,然后根据各地区的作物系数,得出春小麦各个生长阶段及全生长期需水量的空间分布(图 3)。本研究采用交叉验证的方法对参考作物蒸散量的插值结果进行分析^[17],对 14 个站点的插值结果进行了全交叉验证。运用 3 月至 8 月的月绝对平均误差(MAE)、相对平均误差(MRE)以及均方根误差(RMSE)作为检验的标准,各月份对比结果如表 6。

表 6 参考作物蒸散量的交叉验证结果
Table 6 Cross validation of reference crop evapotranspiration

项目 Item	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August
绝对平均误差 Mean absolute error/mm	3.30	9.86	23.43	29.06	27.10	15.10
相对平均误差 Mean relative error/%	13.23	15.70	16.60	16.80	16.07	15.04
均方根误差 Root mean squared error/mm	4.86	13.11	30.46	38.43	37.36	21.72

由图 3 可以看出,在不同生长阶段, ET_c 变化剧烈。在春小麦生长初期(图 3A), ET_c 在 21—28 mm 之间,全区需水量变化幅度仅为 6.88 mm;生长发育期(图 3B), ET_c 在 176—233 mm 之间,全区需水量变化幅度增至 57.02 mm,临泽的 ET_c 高于酒泉、张掖、山丹和民乐;在春小麦生长中期(图 3C), ET_c 在 292—399 mm 之间,全区需水量变化明显,增加至 107.13 mm,高台与临泽地区的 ET_c 高于民乐、山丹和酒泉;在春小麦生长末期(图 3D), ET_c 减少至 83—120 mm 之间,全区变化幅度为 36.49 mm, ET_c 高值区出现在山丹,最低值出现在民乐。从各生长阶段来看,春小麦的需水量标准差分别为 1.57 mm, 13.31 mm, 24.22 mm, 6.78 mm,可以看出,生长中期春小麦需水量空间差异最大,生长初期空间差异性最小。

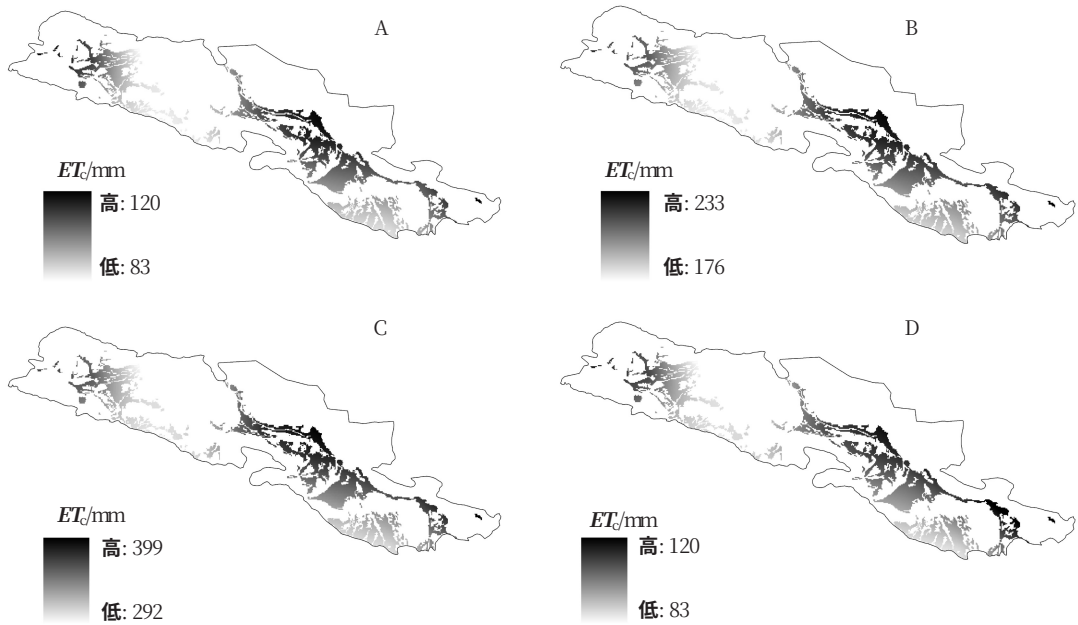


图 3 1970—2009 年黑河中游春小麦不同生长阶段年均需水量的空间分布

Fig. 3 The Spatial distribution of mean annual water requirements of spring wheat at different growing stages in the middle reaches of Heihe River basin from 1970 to 2009

A: 生长初期; B: 生长发育期; C: 生长中期; D: 生长末期

在生长初期,由于气温低、降水少、相对湿度较小,作物盖度小,存在大面积的裸地,蒸散发以土壤蒸发为主,蒸发量较小,不同区域 ET_c 差异不明显,平均 ET_c 为 24.24 mm,这一阶段的需水量仅占全生长期总需水量的 3.64%。进入生长发育期后,由于气温逐渐升高、作物生长速度快,蒸腾作用随之增强,需水量也逐渐增

加,但各地区由于地理位置、气温、降水等的差异, ET_c 变化幅度明显。例如临泽县 ET_c 最高达 224.88 mm,而民乐 ET_c 仅为 184.01 mm,这一阶段各区需水量平均值占全生长期总需水量的 30.57%。当春小麦进入生长中期后,小麦处于生长发育的旺季,并且气温高,因此蒸散发量最大,从 ET_c 空间分布上看,最大值出现在高台, ET_c 达到 377.82 mm,最低出现在民乐, ET_c 为 304.89 mm,这一阶段各区 ET_c 占全生长期的 51.14%。在生长末期,小麦趋于成熟,加之气温降低、小麦的蒸散发作用逐渐减弱, ET_c 在 87.36—112.17 mm 之间。

表 7 黑河中游春小麦各生长阶段年均需水量的差异

Table 7 The variation of mean annual water requirements of spring wheat at different growing stages in the middle reaches of Heihe River basin in 2008

项目 Item	ET_c /mm			
	初始阶段 Initial stage	生长发育期 Development stage	生长中期 Mid-season stage	生长末期 Late-season stage
平均值 Mean value	24.24	203.50	340.39	97.48
变化幅度 Variational scope	6.88	57.02	107.13	36.49
标准差 Standard Deviation	1.57	13.31	24.22	6.78

由图 4 可以看出,黑河中游春小麦需水量(ET_c)的空间差异比较大。全生育期内, ET_c 整体分布具有从南向北递增的趋势。在春小麦全生长期(图 4),黑河中游 ET_c 在 573—781 mm 之间,临泽、高台地区的 ET_c 高于张掖、民乐、山丹和酒泉地区,春小麦全部生长期的 ET_c 空间差异最大为 207.51 mm。

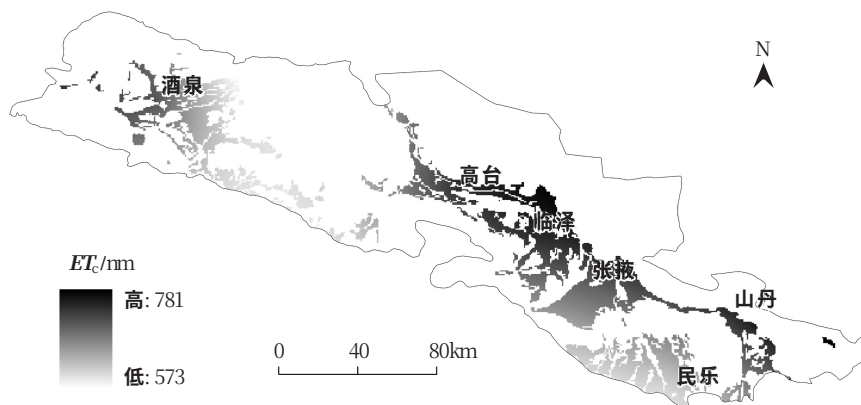


图 4 1970—2009 年黑河中游春小麦年均需水量空间分布图

Fig. 4 The Spatial distribution of mean annual water requirements of spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin

3 结论

本文通过采用 Penman-Monteith 模型对 1970—2009 年黑河中游春小麦参考作物蒸散量进行了估算,研究结果与前人的研究结果^[3,18-20]一致,表明该模型在干旱地区的适用性较好。

黑河中游春小麦在生长初期、生长发育期、生长中期、生长末期的需水量分别在 21—28 mm、176—233 mm、292—399 mm、83—120 mm 之间,全生长期春小麦需水量在 573—781 mm 之间;需水强度最大值出现在中期,高台、张掖、民乐、临泽、山丹和酒泉在中期的需水量分别为整个生长季的 51.67%、51.11%、50.96%、51.24%、50.82% 和 50.77%,需水强度最小值出现在生长季初期,6 个区域的需水量占整个生长季需水量的比例分别为 3.52%、3.66%、3.67%、3.64%、3.52%、3.61%;研究区春小麦需水量的空间差异明显,春小麦需水量最大值出现在高台,为 731.26 mm,春小麦需水量最小值出现在民乐,为 598.24 mm。

对影响黑河中游春小麦需水量变化的气候因子进行主成分分析表明,日平均气温、日照时数、风速、降水量、最小相对湿度和各因子的影响力由大到小分别占总影响力的 57.29%、26.92%、15.15%、1.41% 和 0.78%。

本文采用 Penman-Monteith 模型并结合气象数据不仅能够较准确地计算黑河中游春小麦作物需水量,而且能够反应出各生长阶段作物需水量的季节和空间变化规律,为水资源的配置提供了可靠的量化信息。

References:

- [1] Zhao C Y, Nan Z R, Cheng G D. Methods for estimating irrigation needs of spring wheat in the middle Heihe basin, China. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(1): 54-70.
- [2] Zhang G H, Nie Z L, Liu S Y, Wang J Z. Threshold of influence of water resources in the Heihe River valley, northwestern Gansu, China on the ecological environment variation of the lower reaches. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1): 244-250.
- [3] Kang E S, Li X, Zhang J S, Hu X L. Water resources relating to desertification in the Hexi area of Gansu province, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 657-667.
- [4] Nandagiri L, Kooroor G M. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(3): 238-249.
- [5] Vanderlinden K, Giróldze J V, van Meirvenne M. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves Method in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(3): 184-191.
- [6] Irmak S, Allen R G, Whitty E B. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2003, 129(5): 360-370.
- [7] Itenfisu D, Elliot R L, Allen R G, Walter I A. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2003, 129(6): 440-448.
- [8] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements// FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United, 1998.
- [9] Gao Q Z, Li F X. The Water Resources and its Rational Development and Utilization in Heihe River Basin. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1991: 23-77.
- [10] Kashyap P S, Panda R K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 2001, 50(1): 9-25.
- [11] Moges S A, Katambara Z, Bashir K. Decision support system for estimation of potential evapo-transpiration in Pangani Basin. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28(20/27): 927-934.
- [12] Brisson N, Itier B, L'Hotel J C, Lorendeau J Y. parameterization of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological Modeling*, 1998, 107(2/3): 159-169.
- [13] Lü Y X, Wang G X. Response of runoff variation to climate change in Hailuoguo drainage basin in Gongga Mount in 1990—2007. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 960-966.
- [14] Li L, Zhou X Y, Huang Z L, Wei S G, Shi J H. Study on the relationship between α diversity of plant community and environment on Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2301-2307.
- [15] Li L, Wang Z Y, Wang Q C. Influence of climatic change on flow over the upper reaches of Heihe River. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(1): 40-46.
- [16] Cheng Y F. Study on Temporal and Spatial Distribution of Crop Evapotranspiration in Plain of the Main Heihe River Middle Reaches. Lanzhou: College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, 2007.
- [17] Feng Z M, Yang Y Y, Ding X Q, Lin Z H. Optimization of the spatial interpolation methods for climate resources. *Geo Graphical Research*, 2004, 23(3): 357-364.
- [18] Pei B X. The Measurement and Calculation of Evaporation and Evapotranspiration. Beijing: China Meteorological Press, 1989: 82-98.
- [19] 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.
- [20] Liu S M, Sun Z P, Li X W, Liu C M. A comparative study on models for estimating evapotranspiration. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 161-167.

参考文献:

- [2] 张光辉, 聂振龙, 刘少玉, 王金哲. 甘肃西北部黑河流域水资源对下游生态环境变化的影响. *地质通报*, 2006, 25(1): 244-250.
- [3] 康尔泗, 李新, 张济世, 胡兴林. 甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 657-667.
- [9] 高前兆, 李福兴. 黑河流域水资源合理开发利用. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 23-77.
- [13] 吕玉香, 王根绪. 1990—2007 年贡嘎山海螺沟径流变化对气候变化的响应. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 960-966.
- [14] 李林, 周小勇, 黄忠良, 魏识广, 史军辉. 鼎湖山植物群落 α 多样性与环境的关系. *生态学报*, 2006, 26(7): 2301-2307.
- [15] 李林, 王振宇, 汪青春. 黑河上游地区气候变化对径流量的影响研究. *地理科学*, 2006, 26(1): 40-46.
- [16] 程玉菲. 黑河干流中游平原作物蒸发蒸腾量时空分布研究. 兰州: 兰州大学资源环境学院, 2007.
- [17] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 林忠辉. 气象要素空间插值方法优化. *地理研究*, 2004, 23(3): 357-364.
- [18] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989: 82-98.
- [19] 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.
- [20] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 刘昌明. 蒸散量测定与估算方法的对比研究. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 161-167.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 9 May, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Guest Editorial from EAM Workshop—Sustainability of agricultural ecosystems in arid regions in response to climate change	
..... LI Fengmin, Kadambot H. M Siddique, Neil C Turner, et al (I)	
Overview on the 2 nd international workshop on ecosystem assessment and management (EAM)	
..... LI Pufang, ZHAO Xuzhe, CHENG Zhengguo, et al (2349)	
Arid agricultural ecology in response to global change: Overview on Young Scholar Forum of the 2 nd International Workshop on	
EAM	ZHAO Xuzhe, LI Pufang, Kadambot H. M Siddique, et al (2356)
The effects of micro-rainwater harvesting pattern and rainfall variability on water ecological stoichiometry in oat (<i>Avena sativa</i> L.)	
field	QIANG Shengcai, ZHANG Hengjia, MO Fei, et al (2365)
Spatial variation of water requirement for spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin	
..... WANG Yao, ZHAO Chuanyan, TIAN Fengxia, et al (2374)	
Model-based estimation of the canopy transpiration of Qinghai spruce (<i>Picea crassifolia</i>) forest in the Qilian Mountains	
..... TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong (2383)	
Litter amount and its nutrient storage and water holding characteristics under different coniferous forest types in Xiaolong Mountain,	
Gansu Province	CHANG Yajun, CHEN Qi, CAO Jing, et al (2392)
Effect of irrigation frequency on life history strategy and yield formation in Jerusalem artichoke (<i>Helianthus tuberosus</i> L.) in oasis	
of Hexi Corridor	ZHANG Hengjia, HUANG Gaobao, YANG Bin (2401)
The evaluation method of water resources sustainable utilization in Manas River Basin	
..... YANG Guang, HE Xinlin, LI Junfeng, et al (2407)	
Correlation of topographic factors with precipitation and surface temperature in arid and cold region of Northwest China: a case	
study in Gansu Province	YANG Sen, SUN Guojun, HE Wenying, et al (2414)
The relationship between riparian vegetation and environmental factors in Heihe River Basin	
..... XU Shasha, SUN Guojun, LIU Huiming, et al (2421)	
Effects of drought stress on the photosynthesis of <i>Salix paraqulesia</i> and <i>Hippophae rhamnoides</i> seedlings	
..... CAI Haixia, WU Fuzhong, YANG Wanqin (2430)	
The comparison of drought resistance between <i>Caragana species</i> (<i>Caragana arborescens</i> , <i>C. korshinskii</i> , <i>C. microphylla</i>) and two	
chickpea (<i>Cicer arietinum</i> L.) cultivars	FANG Xiangwen, LI Fengmin, ZHANG Haina, et al (2437)
Response of chlorophyll fluorescence characteristics of <i>Populus euphratica</i> heteromorphic Leaves to high temperature	
..... WANG Haizhen, HAN Lu, XU Yali, et al (2444)	
Free amino acid content in different tissues of <i>Caragana korshinskii</i> following all shoot removal	
..... ZHANG Haina, FANG Xiangwen, JIANG Zhirong, et al (2454)	
“Fertile Island” features of soil available nutrients around <i>Halostachys caspica</i> shrub in the alluvial fan area of Manas River watershed	
..... TU Jinna, XIONG Youcai, ZHANG Xia, et al (2461)	
Analysis of the activities of protective enzymes in <i>Bidens pilosa</i> L. inoculated with <i>Glomus mosseae</i> under drought stress	
..... SONG Huixing, ZHONG Zhangcheng, YANG Wanqin, et al (2471)	
Evaluation and selection on drought-resistance of germplasm resources of <i>Avena</i> species with different types of ploidy	
..... PENG Yuanying, YAN Honghai, GUO Laichun, et al (2478)	
Ecophysiological mechanism of photoperiod affecting phenological period and spike differentiation in oat (<i>Avena nuda</i> L.)	
..... ZHAO Baoping, ZHANG Na, REN Changzhong, et al (2492)	
Effects of water and fertilization on relationship between competitive ability and seed yield of modern and old spring wheat varieties	
..... DU Jingqi, WEI Panpan, YUAN Ziqiang, et al (2501)	

- Inhibitory effect of biogas slurry from swine farm on some vegetable pathogen SHANG Bin, CHEN Yongxing, TAO Xiuping, et al (2509)
- Effects of different summer catch crops planting on soil inorganic N residue and leaching in greenhouse vegetable cropping system WANG Zhiyi, GUO Ruiying, LI Fengmin (2516)
- Photosynthetic characterization and yield of summer corn (*Zea mays* L.) during grain filling stage under different planting pattern and population densities WEI Li, XIONG Youcai, Baoluo Ma, et al (2524)
- Effects of desulfurization waste treatment on calcium distribution and calcium ATPase activity in oil-sunflower seedlings under alkaline stress MAO Guilian, XU Xing, ZHENG Guoqi, et al (2532)
- The evolution between ecological security pattern and agricultural productive force in Manas River Basin for the past 30 years WANG Yuejian, XU Hailiang, WANG Cheng, et al (2539)
- Spatio-temporal analysis of ecological carrying capacity in Jinghe Watershed based on Remote Sensing and Transfer Matrix YUE Dongxia, DU Jun, LIU Junyan, et al (2550)
- The coupling relationship and emergy analysis of farming and grazing ecosystems in Mu Us sandland HU Binghui, LIAO Yuncheng (2559)
- Dynamic analysis of farmland ecosystem service value and multiple regression analysis of the influence factors in Minqin Oasis YUE Dongxia, DU Jun, GONG Jie, et al (2567)
- Environment purification service value of urban green space ecosystem in Qingdao City ZHANG Xuliang, XU Zongjun, ZHANG Zhaohui, et al (2576)
- The spatial relationship analysis of rural per capital revenue based on GIS in Zulihe River basin, Gansu Province XU Baoquan, SHI Weiqun (2585)

Review and Monograph

- The key issues on plant phenology under global change MO Fei, ZHAO Hong, WANG Jianyong, et al (2593)
- Recent advances on regional climate change by statistical downscaling methods ZHU Hongwei, YANG Sen, ZHAO Xuzhe, et al (2602)
- Current progress in eco-physiology of root-sourced chemical signal in plant under drought stress LI Jinan, LI Pufang, KONG Haiyan, et al (2610)
- ODAP biosynthesis: recent developments and its response to plant stress in grass pea (*Lathyrus sativus* L.) ZHANG Dawei, XING Gengmei, XIONG Youcai, et al (2621)
- Current progress in plant ideotype research of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) LI Pufang, CHENG Zhengguo, ZHAO Hong, et al (2631)
- Recent advances in research on drought-induced proteins and the related genes in wheat (*Triticum aestivum* L.) ZHANG Xiaofeng, KONG Haiyan, LI Pufang, et al (2641)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

客座编辑 Guest Editors LI Fengmin XIONG Youcai Neil Turner Kadambot Siddique

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 9 期 (2011 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 9 2011

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:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元