

# 鄂尔多斯遗鸥保护区植被-水资源模拟及其调控

梁犁丽\*, 王 芳

(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044)

**摘要:**鄂尔多斯遗鸥保护区是典型的半干旱区内陆湖泊湿地, 2002 年被列为国际重要湿地, 但是近年来湖泊面积急剧萎缩, 一级保护动物遗鸥在此基本消失。为了查清湿地缺水的原因, 并寻找解决的途径, 基于 SWAT 模型, 模拟了集水区的生态水文过程, 结合气候演变规律, 分析出该湿地缺水 1004.3 万  $\text{m}^3$ 。其中气候因素综合影响的水量为 593.4 万  $\text{m}^3$ , 饲草料基地建设共增加用水 377.7 万  $\text{m}^3$ , 植被封育减少径流 24 万  $\text{m}^3$ , 大口井和截伏流工程耗水 9.2 万  $\text{m}^3$ 。同时, 计算了尾间湿地的生态需水, 从资源利用的角度调控集水区的生态水文过程, 提出饲料地发展规模以不超过 692  $\text{hm}^2$  为宜、适当放牧以减少封育影响并节省饲料地用水、合理布设水利工程等措施, 从而实现集水区坡面生态、尾间湿地以及经济的协调发展。

**关键词:**鄂尔多斯; 生态水文模拟; SWAT 模型; 生态水文过程

## Simulation of water resources evolution driven by vegetation construction and control of eco-hydrological processes in Erdos Larus Relictus Nature Reserve

LIANG Lili\*, WANG Fang

Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China

**Abstract:** Erdos Larus Relictus Nature Reserve is a typical inland wetland formed by a lake of semi-arid area, which was listed in the wetlands of international importance in 2002. Its rapid shrinking in recent years makes Larus relictus, the First-class National protected animal, almost disappear in this region. To explore the reasons for the lack of water in this wetland and more importantly to find the solutions to it, this paper performs a simulation of the eco-hydrological processes in the catchment based on the SWAT model. The simulation combined with an analysis of climate evolution indicates that as much as 10.043 million  $\text{m}^3$  is lacked in this wetland. Among the factors which cause the lacked water, climate factor resulted in 5.944 million  $\text{m}^3$ , forage consumed 3777 thousand  $\text{m}^3$ , vegetation construction reduced a runoff of 240 thousand  $\text{m}^3$ , and square-built wells and JieFulu projects consumed as much as 92 thousand  $\text{m}^3$ . Meanwhile, the ecological water demand of the wetland is calculated. To better utilize resources in the region, the author puts forward some measures of controlling eco-hydrological processes to achieve the coordinated development of slope ecology, wetland and economy in the catchment, i. e., controlling the suitable scale of forage to be no more than 692  $\text{hm}^2$ , grazing appropriately to reduce the impact of vegetation construction, saving water, and laying out water conservancy projects reasonably.

**Key Words:** Erdos; eco-hydrological modeling; SWAT model; eco-hydrological processes

鄂尔多斯遗鸥保护区是以保护国家一级保护动物遗鸥 (*Larus relictus*) 及其栖息繁殖地为目标的半干旱区内陆湖泊湿地, 2002 年被列入“世界湿地名录”。近年来, 核心区内的湖泊——泊江海子 (桃力庙-阿拉善湾海子) 面积不断缩小, 湿地生境破坏, 遗鸥迁徙他处。为了找出湿地缺水的原因, 并给出集水区沙地植被建设、湿地保护与国民经济发展的合理规模, 本文从半干旱区的产水和耗水机理出发, 基于集水区直接和间接的

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目 (2001BA610A-01; 2004BA610A-01)

收稿日期: 2008-09-10; 修订日期: 2009-01-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liangli0921@163.com

坡面生态建设过程,利用 SWAT 模型定量分析了引起湖泊水位下降的各种因素的影响程度,计算了生态需水,并根据生态水文过程,从资源利用的角度,提出改善集水区综合目标的调控措施。

## 1 研究区概况

鄂尔多斯遗鸥保护区位于毛乌素沙地西部边缘,多年平均降水 360.1mm,地势相对平缓且地表为砂质组成,地表径流缺乏,年径流深不足 10mm,无常年性河流。本文基于保护区的核心区泊江海子所在的集水区进行研究,集水区面积 650.96km<sup>2</sup>,外围为丘陵所环绕,形成西、北、东三面较高,南部略高的盆地。1:5 万集水区范围见图 1。

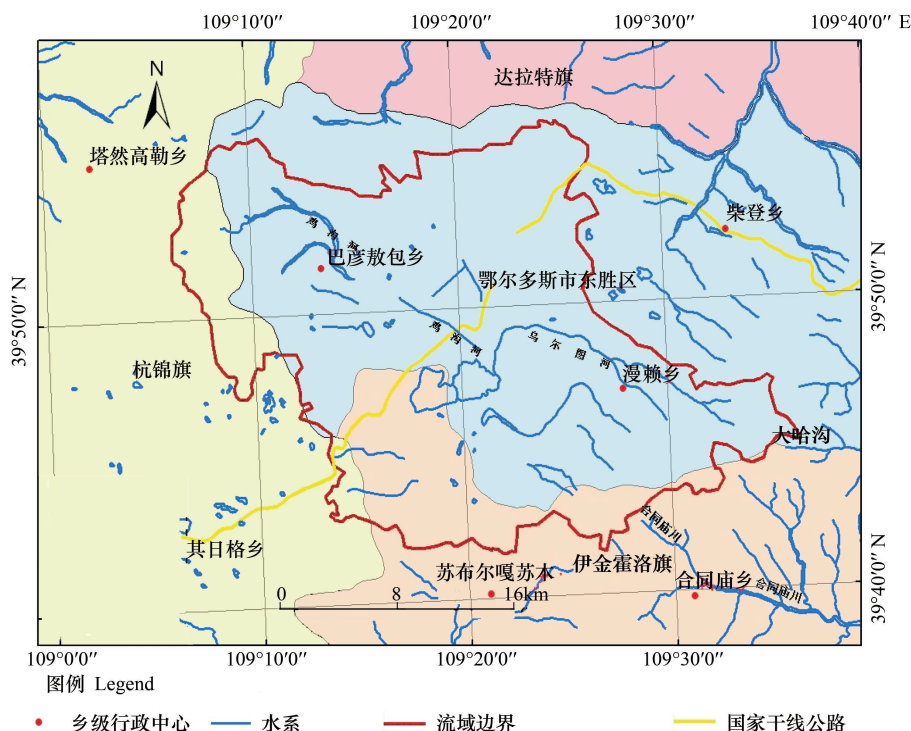


图 1 集水区范围及河流水系

Fig. 1 Catchment and river system of Erdos Larus Relictus Nature Reserve

研究区潜水含水层薄,2006 年调查的潜水水位埋深 1—5m,局部地区 5—10m,含水层厚度为 3—6m。地下水水质较好,矿化度多小于 1g/L。主要的水资源开发利用形式是截伏流工程和大口井,自 2003 年以来水利部门结合饲草料基地建设和人畜饮水工程,兴建了 6 处截伏流工程,基本在沟道的中下游。本区还有近 3—5a 内开挖的 7 眼大口井,一般就地挖 5—6m 深,依靠周围的潜水渗入。

集水区 2005 年常住人口 1.3 万,耕地 4489hm<sup>2</sup>,与 2000 年相比近一半耕地被退耕还林(草),其中水浇地主要是自 2003 年实施饲草料基地建设项目以后发展的,以灌溉玉米为主。另外,研究区有一个以沙柳为原材料的刨花板厂,年产 8 万 t,需要沙柳 12 万 t。畜牧业为当地的主要产业,2005 年总牲畜 11.67 万头。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 模型和总体研究思路

利用 SWAT(soil and water assessment tool)模型对集水区进行模拟,SWAT 模型的优势是地面植被以群落表达,以不同植物群落的生理参数分析水量消耗,可以模拟区域植被的变化对水资源的影响程度;而且研究区面积小,区内没有地下水开采漏斗,可以避免模型对地下水集总式处理的不足。

总体的研究思路是模拟近 10a 来在集水区综合因素影响下湖泊水量的变化,模拟时段为 1996—2005 年。根据模拟结果,分析坡面植被恢复的各种措施对尾间湿地水量的影响,包括直接种草种树以及建设饲草料基地间接置换;结合气候因素的总体变化趋势和近 10a 的影响,对比不同年代的水量消耗,分析气候变化、植被

建设、饲草料基地建设等不同因素的影响程度;根据湿地保护的临界水位计算生态需水,结合模拟的生态水文过程,从资源利用角度,提出改善集水区综合生态目标的措施(图2)。

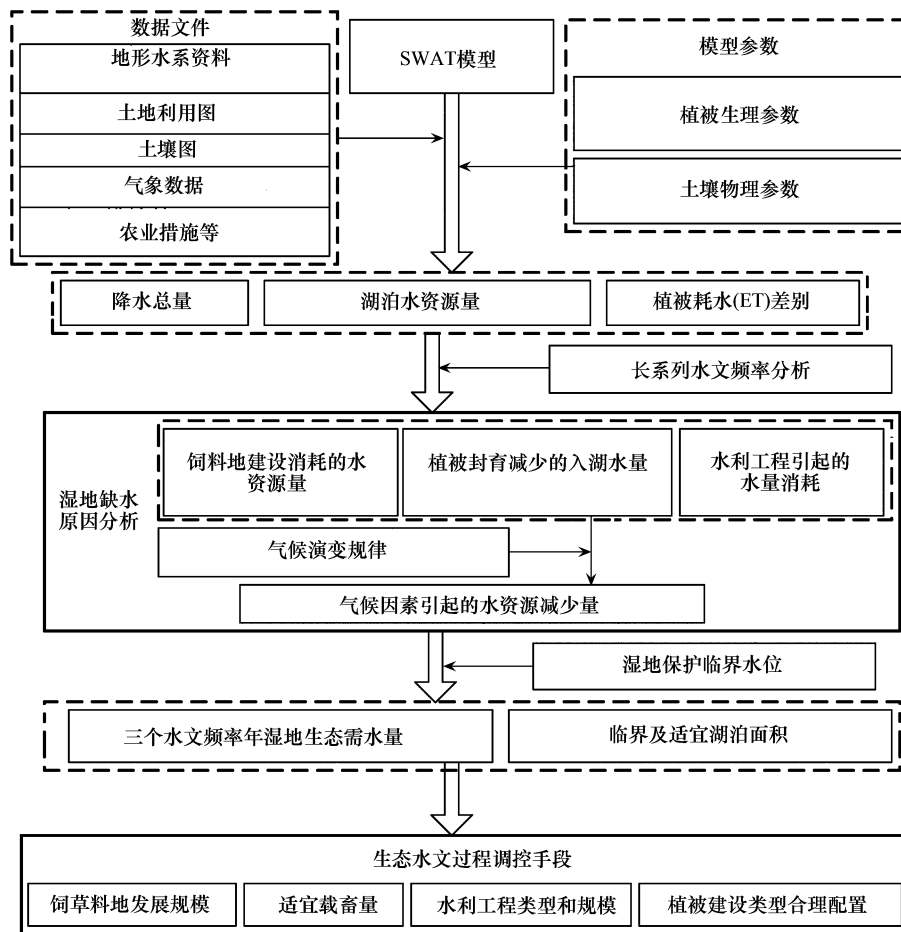


图2 研究思路

Fig. 2 Main ideas of the research

## 2.2 数据源及制备方法

研究不考虑点源和非点源污染模拟,模型输入数据有:数字高程模型(DEM)、土地利用图、土壤分布图和气象资料。

### (1) 数字地形资料及子流域的划分

DEM数据是模型进行流域划分、水系生成和水文过程模拟的基础。本文采用的DEM数据来源于国家基础地理信息中心1980年版1:5万地形图,生成精度为100m×100m网格。同时输入1:25万的水系矢量图引导模型划分水系,提高河网的模拟精度,生成子流域,见图3。

### (2) 土地利用图

土地利用图是分布式水文模型划分水文响应单元的主要条件之一,结合研究需求,本文将坡植被类型细化。以1996年TM影像、2000年中国科学院地理科学资源研究所完成的1:10万土地利用图、2002年ETM影像和2005年的ETM影像为数据源,结合实地调查,对2005年的遥感影像进行解译,总体解译精度为86%。另据调查,当地20世纪60年代开始植被建设,80年代为主要建设时期,近10a植被基本没有变化,只在退耕地上栽植柠条,由此对其它几期遥感影像和土地利用进行解译和修正。模拟期土地利用情况见表1。

### (3) 植被生理生态参数

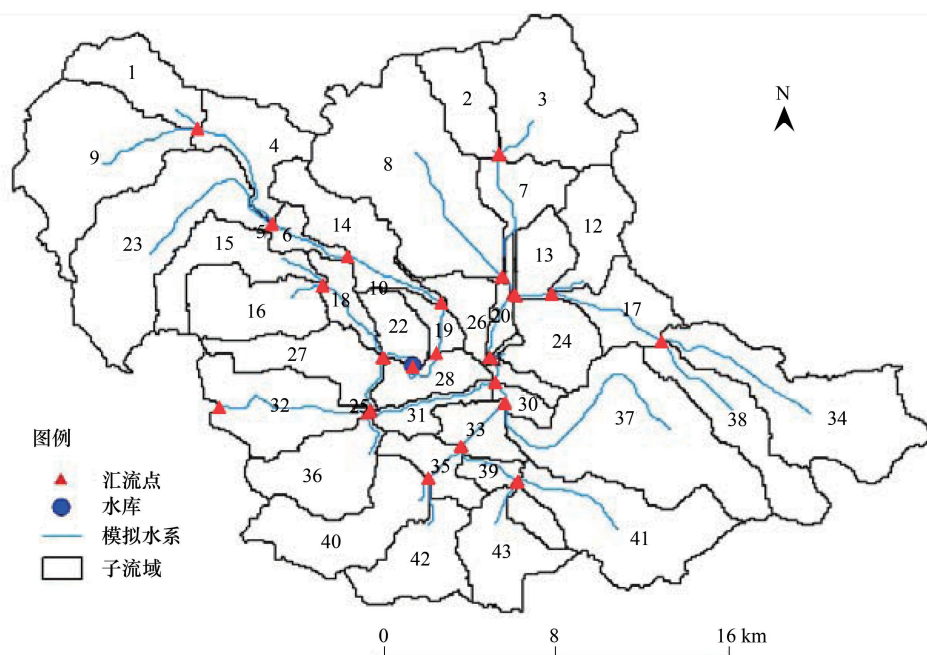


图3 子流域划分结果

Fig. 3 Result of sub-basins partition according to the model

表1 近10a不同时期土地利用

Table 1 Land uses of different periods in the past 10 years

| 土地利用类型 Land use                                                   | 年份 Year                        |                     |                                |                     |                                |                     |                                |                     |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|
|                                                                   | 1996—1998                      |                     | 1999—2001                      |                     | 2002—2003                      |                     | 2004—2005                      |                     |
|                                                                   | 面积<br>Area<br>/hm <sup>2</sup> | 比率<br>Percent<br>/% | 面积<br>Area<br>/hm <sup>2</sup> | 比率<br>Percent<br>/% | 面积<br>Area<br>/hm <sup>2</sup> | 比率<br>Percent<br>/% | 面积<br>Area<br>/hm <sup>2</sup> | 比率<br>Percent<br>/% |
| 水域 Water                                                          | 1359.32                        | 2.09                | 1212.10                        | 1.86                | 698.96                         | 1.07                | 443.71                         | 0.68                |
| 水浇地 Corn land                                                     | 531.91                         | 0.82                | 795.74                         | 1.22                | 1009.78                        | 1.55                | 1083.44                        | 1.66                |
| 干涸湖面 Dry lake                                                     | 8.50                           | 0.01                | 127.77                         | 0.20                | 640.84                         | 0.98                | 896.16                         | 1.38                |
| 盐碱地 Saline land                                                   | 800.47                         | 1.23                | 789.81                         | 1.21                | 789.77                         | 1.21                | 789.50                         | 1.21                |
| 草甸 Meadow                                                         | 1303.54                        | 2.00                | 1303.55                        | 2.00                | 1283.80                        | 1.97                | 1283.80                        | 1.97                |
| 怪柳 <i>Tamarisk chinensis</i>                                      | 2038.91                        | 3.13                | 2038.27                        | 3.13                | 2038.27                        | 3.13                | 2037.64                        | 3.13                |
| 沼泽 Marsh                                                          | 3290.43                        | 5.05                | 3308.17                        | 5.08                | 3271.01                        | 5.02                | 3265.57                        | 5.02                |
| 柠条 <i>Caragana korshinsk</i>                                      | 6649.95                        | 10.21               | 6685.62                        | 10.27               | 6574.17                        | 10.10               | 6596.97                        | 10.14               |
| 河道 Riverway                                                       | 2732.35                        | 4.20                | 2730.72                        | 4.19                | 2730.72                        | 4.19                | 2729.09                        | 4.19                |
| 柠条、油蒿混交 <i>Caragana korshinskii</i> and <i>Artemisia ordosica</i> | 2312.95                        | 3.55                | 2312.89                        | 3.55                | 2312.89                        | 3.55                | 2312.82                        | 3.55                |
| 乔木 Arbor                                                          | 1623.87                        | 2.49                | 1623.38                        | 2.49                | 1623.38                        | 2.49                | 1622.89                        | 2.49                |
| 针茅、冷蒿等地带性植被<br>Zonation of vegetation                             | 3310.98                        | 5.09                | 3272.75                        | 5.03                | 3246.66                        | 4.99                | 3251.44                        | 5.00                |
| 沙柳 <i>Salix</i>                                                   | 5037.68                        | 7.74                | 5037.12                        | 7.74                | 5036.65                        | 7.74                | 5036.06                        | 7.74                |
| 低覆盖度柠条 <i>Caragana korshinskii</i> of low coverage                | 2192.59                        | 3.38                | 2105.22                        | 3.23                | 2201.59                        | 3.38                | 2209.59                        | 3.38                |
| 低覆盖度油蒿 <i>Artemisia ordosica</i> of low coverage                  | 6335.55                        | 9.73                | 6306.07                        | 9.69                | 6329.55                        | 9.72                | 6329.54                        | 9.72                |
| 退耕地 Abandoned land                                                | 10077.56                       | 15.48               | 9993.56                        | 15.35               | 9864.91                        | 15.15               | 9772.82                        | 15.01               |
| 油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>                                      | 15489.45                       | 23.79               | 15453.30                       | 23.74               | 15443.05                       | 23.72               | 15434.93                       | 23.71               |
| 总计 Total                                                          | 65096                          | 100                 | 65096                          | 100                 | 65096                          | 100                 | 65096                          | 100                 |

植物光合作用和水分代谢有关的参数是计算植被蒸散发和生物量的关键因子,本文主要靠查阅文献资料综合分析后给出。

① 光能利用效率(*RUE*),是和植物生长及其生物量多少有关的参数。计算光能利用效率首先需要确定光合有效辐射(*PAR*)和同时期植被的地上部分生物量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),利用植被地面生物量及其所截获的总 *PAR* ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) 的线性回归法确定,直线的斜率即是 *RUE*。如油蒿光能利用效率是研究区附近各地区光合有效辐射值<sup>[1]</sup>和油蒿群落地上部分生物量<sup>[2]</sup>的曲线斜率,为 0.451。柠条、沙柳、荒化草原、草甸等主要植被的生物量靠查阅植被水分生态相关文献<sup>[3-4]</sup>并适当调整计算出其光能利用效率,结果见表 2。

② 叶面积指数(*LAI*),与植物群落蒸腾作用和光合作用相关,根据叶面积指数及叶面积生长曲线求出的 4 个参数都是模型需要的,4 个参数为:相应于最佳叶面积生长曲线上第一、第二点的热量分别占总潜在热量的百分数(*FRGRW1*、*FRGRW2*)、最佳叶面积生长曲线上第一、第二点的叶面积指数分别占最大叶面积指数的百分数(*LAIMX1*、*LAIMX2*),这里所指的“第一点”和“第二点”是最佳叶面积生长曲线的叶面积迅速上升和下降的两个拐点。油蒿、柠条和玉米的叶面积指数根据人工植被蒸腾量<sup>[5-6]</sup>给出,红柳、沙柳依照乔木的各参数给出,草甸、地带性植被、退耕地等根据大针茅、禾草、杂类草群落及典型草原叶面积指数<sup>[7]</sup>的叶面积指数曲线确定。

③ 植物生长的最佳温度和最小温度,是计算植被蒸散发的重要参数。*SWAT* 模型利用基温计算植被每天积累的热量,并默认生长季内基温不变。某种植物生长的基本温度和最佳温度基本稳定,但其值直接测量比较困难,根据当地的气候条件,设定所有植被的最佳生长温度都为 25℃,最小生长温度为 6—8℃。

表 2 主要植物群落的特征数据  
Table 2 Main characteristic data of the plant community

| 植物群落<br>Plant<br>community       | 分类<br>Land<br>cover/plant<br>classification | 光能利用<br>效率<br>Radiation-<br>use<br>efficiency | 衰落时生长<br>季百分数<br>Fraction of<br>growing<br>season when<br>leaf area<br>declines | 最大<br>冠层高<br>Maximum<br>canopy<br>height<br>/m | 最大<br>根系深<br>Maximum<br>root depth<br>/m | 叶面积<br>指数<br>Leaf area<br>index | 植被生长<br>最小温度<br>Minimum<br>temperature<br>for plant<br>growth<br>/℃ | 土地利用<br>C 因子<br>USLE-C | 收获指数<br>Harvest index |               |               |               |
|----------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                  |                                             |                                               |                                                                                 |                                                |                                          |                                 |                                                                     |                        | 1996—<br>1999         | 2000—<br>2001 | 2002—<br>2003 | 2004—<br>2005 |
| 草甸 meadow                        | Perinial                                    | 6.55                                          | 0.89                                                                            | 0.80                                           | 1                                        | 1.90                            | 6                                                                   | 0.003                  | 0.1                   | 0.1           | 0.1           | 0             |
| 沙柳 <i>Salix</i>                  | Perennial                                   | 0.25                                          | 0.95                                                                            | 2.50                                           | 2                                        | 4.5                             | 8                                                                   | 0.05                   | 0.95                  | 0.95          | 0.95          | 0.95          |
| 怪柳 <i>Chinese<br/>tamarisk</i>   | Perennial                                   | 0.58                                          | 0.95                                                                            | 5.00                                           | 10                                       | 4.5                             | 8                                                                   | 0.05                   | 0.05                  | 0.05          | 0.03          | 0             |
| 油蒿 <i>Artemisia<br/>ordosica</i> | Perennial                                   | 0.45                                          | 0.57                                                                            | 1.00                                           | 2                                        | 1.15                            | 7                                                                   | 0.003                  | 0.4                   | 0.4           | 0.2           | 0             |
| 柠条 <i>Korshinsk<br/>peashrub</i> | Perennial<br>legume                         | 0.13                                          | 0.70                                                                            | 3.00                                           | 6                                        | 0.95                            | 10                                                                  | 0.003                  | 0.4                   | 0.4           | 0.2           | 0             |
| 杨树 <i>Poplar</i>                 | Trees                                       | 1.60                                          | 0.99                                                                            | 7.00                                           | 3                                        | 5.00                            | 6                                                                   | 0.001                  | 0                     | 0             | 0             | 0             |
| 水浇地 Corn land                    | Perinial                                    | 1.39                                          | 0.81                                                                            | 2.00                                           | 1                                        | 5.14                            | 10                                                                  | 0.05                   | 0.99                  | 0.99          | 0.99          | 0.99          |

\* 杨树的生物量包括地上和地下部分,其它植物群落的生物量是指地上部分

④ 土地利用的 C 因子最小值,是用来表征适度放牧和地被植物对土壤侵蚀的减少作用的参数,该值越小表示侵蚀越少,因为残余物多增加地面覆盖。该参数适用于没有泥沙资料、但能从其它文献中查到放牧强度和草地利用率的地区,其取值范围在 0.001—0.5。根据经验,好、中、差 3 个标准的初始值用 0.003、0.05 和 0.1 表示。

#### (4) 土壤图及相关参数

土壤图不仅为模型划分水文响应单元提供依据,而且决定了流域的径流状况。根据中国科学院土壤研究所完成的 1:100 万土壤数字图及参照《美国土壤分类系统》给出的相关数据。研究区域有 20 个土壤斑块,共 12 种土壤类型(表 3)。

表 3 研究区域内土壤类型(土属)  
Table 3 Types of soil of the study area

| 土壤类型<br>Soil Type                         | 面积<br>Area<br>/hm <sup>2</sup> | 比率<br>Percent<br>/% | 土壤类型<br>Soil type                              | 面积<br>Area<br>/hm <sup>2</sup> | 比率<br>Percent<br>/% |
|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| 栗钙土(亚类 1)<br>Chestnut soil                | 7367.40                        | 11.318              | 淡栗钙土(亚类)<br>Light chestnut earth               | 2074.48                        | 3.187               |
| 沙化淡栗钙土<br>Sanded light chestnut soil      | 3108.08                        | 4.775               | 盐化潮土(亚类 2)<br>Saline Flavo-aquic Soil          | 21086.95                       | 32.394              |
| 盐化潮土(亚类 1)<br>Saline Flavo-aquic Soil     | 552.14                         | 0.848               | 流动草甸风沙土<br>Fluid meadow aeolian soils          | 7389.15                        | 11.351              |
| 钙质粗骨土 Calcic regosols                     | 2670.93                        | 4.103               | 栗钙土(亚类 2) Chestnut soil                        | 4230.79                        | 6.499               |
| 洪积砂砾质栗钙土<br>Diluvial gritty chestnut soil | 2.03                           | 0.003               | 固定草原风沙土<br>Fixed glassland aeolian soils       | 8063.13                        | 12.387              |
| 流动草原风沙土<br>Moving glassland aeolian soils | 2489.73                        | 3.825               | 半固定草原风沙土<br>Semi-fixed glassland aeolian soils | 6061.19                        | 9.311               |

主要土壤参数为土壤水文分组、渗透性、空隙率、反照率等,除数据库本身自带的参数外,其他参数的取值如下:

①土壤渗透率和土壤孔隙率,土壤渗透率参考 USDA 土壤调查局分类标准一般值和已有研究成果<sup>[8-10]</sup>给出。各类土壤的孔隙率参照土壤普查结果<sup>[11]</sup>,土壤剖面最大孔隙率由每层的田间持水率和土壤容重计算。

②土壤反照率,即地面反射的辐射与投射在地面上的辐射之比,在一定程度上决定了土壤的蒸发量。它不仅和含水量的多少有关,还和土壤的颜色、粗糙度等有关。土壤数据库中设定水面的反照率为 0.9,根据以往研究成果<sup>[12-14]</sup>给出的土壤湿度与土壤反射率的关系以及范围,结合潮土反射模型<sup>[15]</sup>,得到各类土壤的反射率。

(5)气象数据及农业管理措施

气象数据包括日降雨资料、日最高最低气温、风速、气温站位置高程、雨量站位置高程等。研究所用气象数据来自距离研究区的泊江海子 52.5km 的东胜气象站 1996—2005 年的日降雨和日最高、最低气温数据。

研究区作物种类比较单一,灌溉地主要是玉米,灌溉方式粗放,几乎是漫灌式。截伏流和大口井工程都是通过管道供水,另外有一部分直接抽取地下水灌溉,模型统一取地下水灌溉措施。根据日降雨量和当地实际的灌溉情况,为灌溉地制定了每年的灌溉制度。

2.3 模拟过程的关键技术处理

(1)水文模拟中关键问题处理

①根深植被的处理 SWAT 模型处理土壤层为 1m 深,即土壤水含量只计算 1m 深的范围,对能够直接汲取地下水的深根植被的蒸腾量计算不精确。本研究增加了植被蒸发补偿系数 EPCO,使土壤中有足够多的水分供根深植被吸收。

②湖泊处理 将研究区尾间湖泊当作不泄水无调度的水库,库容及其相应的参数由湖容曲线<sup>①</sup>给出,取最大库容为略大于最大水面面积(11.70km<sup>2</sup>)对应的水体体积,保证模拟期间不发生泄水;默认水库底部不发生渗漏。

(2)基于尾间湖泊湖容曲线的模型校核

SWAT 模型常采用河道断面洪水过程线进行拟合校正,但当地缺乏实测资料,本文提出了基于尾间湖泊湖容曲线的模型校核方法,即将 1996—2005 年模拟的尾间湖泊水量代入湖容-面积曲线计算出湖泊面积,与

① 王芳,梁犁丽.半干旱区沙地植被建设-水资源-湖沼湿地演变模拟模型结构.第十三届世界湖泊大会会议论文.



同期遥感实测的面积比较,误差控制在 10% 以内,拟合情况见图 4。

### 3 结果分析

#### 3.1 集水区水资源及其各种转化量

集水区模拟期间年平均降水总量为 23435 万 m<sup>3</sup>,水资源量 2648 万 m<sup>3</sup>,占降水量的 11.3%,其中由降水直接形成的径流量以及由壤中流和地下水转化而来的地表水资源量 1080 万 m<sup>3</sup>,土壤水资源量 1172 万 m<sup>3</sup>,模拟期间的地下水动态变化较大,但模拟期的始末总体上减少 3675 万 m<sup>3</sup>,即总体上水位呈下降趋势。各年份集水区内的水资源量见表 4。

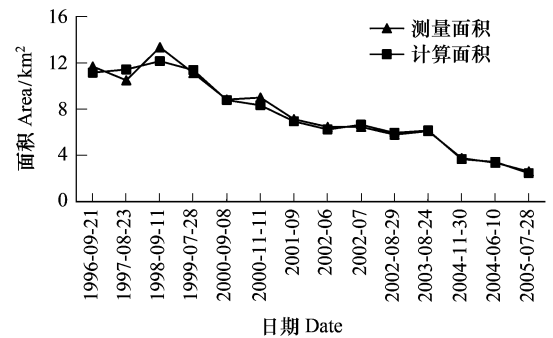


图 4 湖面面积模拟值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison of simulated area and measured area of Bojiang Lake

表 4 流域内水资源量

Table 4 Water resources of the catchment

| 时间<br>Time | 降水量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Precipitation | 直接形成<br>地表径流量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Surface<br>runoff | 壤中流<br>转化量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Lateral flow | 地下水<br>转化量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Groundwater<br>contribution<br>to stream flow | 地表水资<br>源总量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Surface<br>water<br>resources | 土壤水资源量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Soil water<br>content | 地下水资源<br>动态变化量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Dynamic<br>change of<br>groundwater | 蒸发量<br>/( × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )<br>Evapotran-<br>spiration | 长系列<br>降水频率/%<br>Frequency of<br>precipitation |
|------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1996       | 24821                                                         | 272                                                                         | 618                                                                 | 1                                                                                                    | 891                                                                                   | 2155                                                                     | 4071                                                                                           | 17704                                                                   | 46                                             |
| 1997       | 21378                                                         | 264                                                                         | 458                                                                 | 4                                                                                                    | 725                                                                                   | 553                                                                      | -2067                                                                                          | 22166                                                                   | 60                                             |
| 1998       | 35920                                                         | 2696                                                                        | 996                                                                 | 469                                                                                                  | 4160                                                                                  | 2239                                                                     | 2272                                                                                           | 27249                                                                   | 6                                              |
| 1999       | 18032                                                         | 233                                                                         | 417                                                                 | 0                                                                                                    | 649                                                                                   | 413                                                                      | 573                                                                                            | 16397                                                                   | 84                                             |
| 2000       | 12075                                                         | 33                                                                          | 162                                                                 | 1                                                                                                    | 195                                                                                   | 667                                                                      | -3204                                                                                          | 14417                                                                   | 96                                             |
| 2001       | 21098                                                         | 83                                                                          | 443                                                                 | 4                                                                                                    | 529                                                                                   | 1820                                                                     | -18                                                                                            | 18767                                                                   | 64                                             |
| 2002       | 25830                                                         | 152                                                                         | 573                                                                 | 0                                                                                                    | 725                                                                                   | 703                                                                      | 3089                                                                                           | 21313                                                                   | 42                                             |
| 2003       | 33414                                                         | 1049                                                                        | 741                                                                 | 3                                                                                                    | 1792                                                                                  | 1799                                                                     | 166                                                                                            | 29657                                                                   | 14                                             |
| 2004       | 27444                                                         | 233                                                                         | 653                                                                 | 1                                                                                                    | 883                                                                                   | 785                                                                      | 3673                                                                                           | 22103                                                                   | 32                                             |
| 2005       | 14341                                                         | 62                                                                          | 190                                                                 | 0                                                                                                    | 251                                                                                   | 581                                                                      | -4598                                                                                          | 18107                                                                   | 92                                             |
| 平均 Average | 23435                                                         | 508                                                                         | 525                                                                 | 48                                                                                                   | 1080                                                                                  | 1172                                                                     | 396                                                                                            | 20788                                                                   |                                                |

#### 3.2 植被耗水动态和耗水量

从各类植被 10a 的平均耗水来看,除水浇地外,以杨树为主的乔木和沙柳都达到 350mm;地带性植被、柠条和油蒿等沙地植被 ET 较低,但由于其种植面积比较大,耗水占本区耗水量的比例较大,分别为 11.37%、25.23%、22.54%。杨树等乔木的生长虽然需要水资源的额外支撑,但是面积小,总的水量消耗占 2.68%。沙柳是半干旱区优良的固沙树种,但相比同面积的油蒿来说,多消耗近 20% 的水分,而且水分掠夺导致林下不生长其它植物,因此沙柳对已经固定的沙地来说,不是适合的树种。

#### 3.3 饲草料基地建设消耗的水资源量

集水区水浇地大部分种植饲草料玉米进行青储,水浇地灌溉用水多,植被蒸发量大,10a 平均消耗水深 763mm,而地带性植被只有 264.6mm。2002 年灌溉地为 824.01hm<sup>2</sup>,近 3a 由于饲草料基地的建设,2003 和 2004 年分别为 1009.784hm<sup>2</sup> 和 1083.44hm<sup>2</sup>,2005 年底则增加到 1136.2 hm<sup>2</sup>。相比同面积的地带性植被,2002—2005 年共增加耗水量 377.72 万 m<sup>3</sup>。

#### 3.4 植被封育对径流形成的影响

近 10a 集水区植被格局基本不变,自 2002 年东胜市全面禁牧以来,保护区内生态环境得到了改善,封育使植物的生物量明显增加,根据调查目测估计生物量增加 20%—50%。1996—1997 年降水接近平水年,在

其他数据及参数不变的情况下,使草甸及地带性等坡面植被叶面积指数增加 50%,利用模型再次模拟 1996—1997 年尾间湖泊的水体积,并比较两次模拟结果,湖泊体积的变化即反映平水年植被生物量增加 50% 对水资源量的影响。

结果表明,植被叶面积增加 50% 所引起的入湖水量的变化为 8 万  $\text{m}^3$ ,由此可以初步推断,近几年的封育措施,多年平均来水情况下,年减少入湖水资源量约 8 万  $\text{m}^3$ ,占地表水资源总量的 7.4%,封育 3a 共减少入湖径流量 24 万  $\text{m}^3$ 。

### 3.5 水利工程拦截径流引起的水量消耗

集水区内水利工程近几年才逐渐兴建,近 3a 来水利部门兴建 6 处截伏流工程和 7 处大口井(即小型水库)。截伏流工程改变水循环方式,主要是局部地区地下水位抬高,蒸发蒸腾增加。根据现场调查,截伏流工程周边的植被长势好,由于时间短,植被类型还没有发生变化,这里根据潜水蒸发随埋深的递减规律,以此工程影响的植被面积约 1.25  $\text{hm}^2$  乘以 2.5m 平均埋深,计算 6 处截伏流工程的年蒸发量约为 1 万  $\text{m}^3$ ,2002—2005 年截伏流工程共消耗水量约 2.01 万  $\text{m}^3$ 。

2002 年以来修建的大口井有 7 处,这种大口井大多呈长方形,长约 100—200m,宽 30 多米,坡度较缓,工程简单,一般分 2—3 层阶梯。主要修建在入渗水量丰富的水浇地附近,用于引水灌溉。每眼井的面积约 4500  $\text{m}^2$ ,按照多年平均水面蒸发量 1428.9mm 减去本应该生长油蒿的年耗水量 294.7mm 后的净蒸发量 1134.2mm 计算,2005 年 7 处大口井比通常种植油蒿的沙地每年多消耗水量 3.57 万  $\text{m}^3$ ,2002—2005 年共多耗水 7.15 万  $\text{m}^3$ 。

### 3.6 气候因素对径流形成的影响

根据东胜市气象站 1957—2004 年的气象资料进行分析,气温升高明显,平均升高速率为 0.48  $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,其中冬季增温最为明显,每 10a 平均增温 0.79  $^{\circ}\text{C}$ 。集水区多年平均降水量为 375.8mm,略呈减少趋势,多年平均的递减率为 10.7mm/10a,1995 年以后降雨年差别较大且偏枯,特别是 1999—2001 年连续 3a 干旱,2000 年总降水量 181mm,达到近几十年的最低水平。多年年均蒸发能力为 1428mm,近 50a 来总体趋势略有上升,但是 20 世纪 90 年代以前呈下降趋势,90 年代以后呈稳定增加的趋势(图 5)。这与我国西北地区的气候变化趋势<sup>[16]</sup>一致。这也使 90 年代以后气候变化对径流形成的影响表现比较明显。

湖泊面积从 1996 年的 11.7  $\text{km}^2$  减少到了 2005 年的 2.63  $\text{km}^2$ ,湖泊缺水 1004.32 万  $\text{m}^3$ 。从以上分析可以看出,近 10a 来,饲草料基地建设共增加用水 377.72 万  $\text{m}^3$ ,植被封育减少径流 24 万  $\text{m}^3$ ,大口井和截伏流工程耗水 9.16 万  $\text{m}^3$ ,由此得出,因全球变暖及近期干旱减少的水量为 593.44 万  $\text{m}^3$ ,占总缺水量的 59.1%。

### 3.7 湿地生态需水

遗鸥生存和繁殖对核心区泊江海子水位过高和过低都有限制<sup>[17]</sup>,作为国际重要湿地,平常年份应保障其适宜湖泊面积 9.06  $\text{km}^2$ ;另外尽量采取措施进行水文调控,减少水文丰枯波动对遗鸥生存繁衍的影响,本文以 90% 的降水频率年不低于最小湖面面积 4.88  $\text{km}^2$ ,进行最小生态需水计算。

1997 年属于平水年,1999 年属于 75% 降水频率年,2005 年属于 90% 降水频率年。本文以湖泊及其周围整体湿地生态系统的范围<sup>[18]</sup>为计算区,得到其土地利用类型的面积,依据近 10a 模型计算的各类植被的耗水情况,以 1997 年、1999 年和 2005 年的植被类型单位面积耗水量分别计算平水年以及 75% 和 90% 降水频率年的湿地总需水,结果分别是 3121.6、2169.3 万  $\text{m}^3$  和 2063.8 万  $\text{m}^3$ (表 5)。

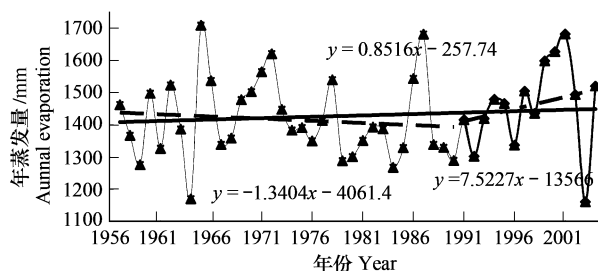


图 5 鄂尔多斯东胜气象站年均蒸发能力

Fig. 5 Average annual evaporation capacity of Dongsheng weather station in Erdos



表 5 枯水年和平水年湿地需水量

Table 5 Water demand of the wetland in dry year and average flow year

| 土地类型 Land use         | 90%降水频率年                       |                                         | 75%降水频率年                       |                                         | 平水年                            |                                         |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
|                       | Frequency of precipitation 90% |                                         | Frequency of precipitation 75% |                                         | Frequency of precipitation 50% |                                         |
|                       | 面积/km <sup>2</sup><br>Area     | 需水量/(万 m <sup>3</sup> )<br>Water demand | 面积/km <sup>2</sup><br>Area     | 需水量/(万 m <sup>3</sup> )<br>Water demand | 面积/km <sup>2</sup><br>Area     | 需水量/(万 m <sup>3</sup> )<br>Water demand |
| 草甸 Meadow             | 10.97                          | 240.48                                  | 8.11                           | 215.59                                  | 8.11                           | 259.94                                  |
| 怪柳 Chinensis Tamarisk | 0.48                           | 13.23                                   | 0.48                           | 11.69                                   | 0.48                           | 16.88                                   |
| 干涸湖面 Dry lake         | 7.09                           | 155.46                                  | 6.97                           | 187.70                                  | 0.15                           | 5.16                                    |
| 柠条 Caragana Korshinsk | 1.90                           | 51.63                                   | 1.90                           | 43.84                                   | 1.90                           | 62.37                                   |
| 乔木 Arbor              | 0.73                           | 16.08                                   | 0.73                           | 19.80                                   | 0.73                           | 23.69                                   |
| 沙柳 Salix              | 18.37                          | 403.59                                  | 16.22                          | 437.94                                  | 16.22                          | 524.79                                  |
| 水浇地 Corn land         | 1.01                           | 73.25                                   | 0.79                           | 56.43                                   | 0.79                           | 68.68                                   |
| 水域 Water              | 4.88                           | 564.55                                  | 4.88                           | 558.07                                  | 11.70                          | 1295.24                                 |
| 退耕地 Abandoned land    | 1.00                           | 27.29                                   | 5.21                           | 124.80                                  | 5.21                           | 169.14                                  |
| 盐碱地 Saline land       | 5.39                           | 112.91                                  | 6.67                           | 116.17                                  | 6.67                           | 153.03                                  |
| 油蒿 Artemisia ordosica | 5.22                           | 147.90                                  | 5.39                           | 119.12                                  | 5.39                           | 178.88                                  |
| 沼泽地 Marsh             | 11.72                          | 257.39                                  | 11.43                          | 278.12                                  | 11.43                          | 363.79                                  |
| 总计 Total              | 68.77                          | 2063.76                                 | 68.77                          | 2169.25                                 | 68.77                          | 3121.60                                 |

3.8 生态水文过程调控

由于气候因素的不可控性,且集水区的水文过程都会影响尾间湖泊水量,故本文针对影响湖泊水量的人为因素,从资源利用的角度,分析集水区水文过程的调控措施。

(1)集水区内适度发展饲草料基地,减少水资源利用

饲草料地是集水区的耗水大户,适当发展饲草料地,以保障集水区内各种用水的平衡。平水年适宜的湖泊面积为 9.06km<sup>2</sup>,2000 年 9 月份的湖泊面积 8.85km<sup>2</sup> 与适宜湖面接近,对应的沼泽地面积约为 33.08km<sup>2</sup>。集水区尾间湿地之外的坡面植被组成以现状 2005 年为准,各种植被耗水定额采用平水年(1997 年)的模拟结果。通过集水区的水量平衡计算和总面积不变原则,反推饲草料地的面积。由此可以得到集水区内在平水年保障适宜生态需水的情况下,可以发展 692.09hm<sup>2</sup> 饲草料地。

集水区现有饲草料地 1136.2 hm<sup>2</sup>,在不考虑其他措施减少水资源的利用,就应该消减现有饲草料地的 39%,以保障集水区内尾间湿地的生态需水。

(2)适度放牧,减少封育直接对径流形成的影响,同时弥补饲料基地的减少,间接减少水资源利用

根据遗鸥保护区现有的水资源供需矛盾,应在保护坡面生态的基础上适当放牧以控制牧草的长势,降低其耗水总量。按照封育后产干草量增加 30% 计算,则干草产量增加 270kg/hm<sup>2</sup>,根据集水区内地带性植被面积 3251.44 hm<sup>2</sup>(表 1)和一个羊单位的食草量 700kg/a 计算,可以承载 1254 只标准羊。

从增加的总干草量来看,饲料地按照 10689kg/hm<sup>2</sup> 的产量计算,放牧可以减少饲料地 82 hm<sup>2</sup>,这样既减少了由于植被封育所引起的径流减少量,同时在载畜量不变的情况下等于减少了饲料地面积,即间接减少了水资源利用量。研究区草场和饲料地总共能承载标准羊 20107 只,而 2005 年牲畜总量折合标准羊 125901 只,虽大部分圈养但仍处于超载状态,从积极保护和合理利用资源出发,需要合理安置本流域生态载畜量。

(3)合理布设水利工程,增加直接形成的地表径流,减少径流拦截引起水资源转化过程中的消耗

该区季节性河流汛期地表径流和其他季节沿河道侧渗的潜水是尾间湖泊的主要水源,因此,除人畜饮水工程外,禁止流域内各条支流上修建淤地坝等水利工程,减少水资源的无效消耗量。

(4)限制集水区沙柳继续发展,减少高耗水植被的水分消耗

2007 年以来,随着内蒙古沙柳生物质能源发电、沙柳制浆造纸以及沙柳高密度板等企业的兴建运营,促进了沙柳资源的开发利用。而本区水资源可利用量有限,沙柳耗水量较大,不适合固定沙地种植,应限制其发

展。另外,尽量不在集水区内存植乔木等高耗水植被以减少蒸发量,沙化治理后期应种植低耗水的植被,并促进植被的多样性发展。

#### 4 结论与讨论

(1)本文利用 SWAT 模型模拟了鄂尔多斯遗鸥保护区整个集水区的生态水文过程。在技术方法层面,建立了基于尾间湖泊湖容曲线的模型校核方法;修改了模型植被数据库,调整了相应植被的生理参数,在一定程度上提高了模拟精度。但是,部分植被参数缺乏长期监测数据,大比例土壤图数据不易获得,以及模型本身对地下水的集总式处理,使模型的应用受到一定限制,今后还需加强植被和土壤数据库的建设和模型的改进。

(2)集水区近 10a 平均降水总量为 23435 万  $\text{m}^3$ ,水资源量 2648 万  $\text{m}^3$ ,占降水量的 11.3%。从模拟结果分析,湿地缺水的原因主要是气候因素、饲草料地建设、植被封育和水利工程本身,近 10a 湖泊总缺水 1004.3 万  $\text{m}^3$ ,其中气候因素影响为 593.4 万  $\text{m}^3$ ,占 59.1%,饲料地建设用水量 377.7 万  $\text{m}^3$ ,占 37.6%,封育减少径流 24 万  $\text{m}^3$ ,水利工程增加的无效蒸发 9.2 万  $\text{m}^3$ 。

(3)根据遗鸥生存繁殖的临界水文条件,整个湿地在平水年、75% 和 90% 降水频率年的生态需水量分别是 3121.6、2169.3 万  $\text{m}^3$  和 2063.8 万  $\text{m}^3$ 。依据模拟的集水区生态水文过程,从资源利用的角度分析得出:集水区内饲料地发展规模不超过 692  $\text{hm}^2$ ;适当放牧后可增加载畜量 1254 只标准羊或减少饲料地 82  $\text{hm}^2$ ,既可消除植被封育所引起的径流减少量,又可间接减少水资源利用量;合理布设水利工程,禁止淤地坝建设,减少无效蒸发;同时限止高大乔木的种植以及沙柳面积的发展。

**致谢:**中国水利水电科学研究院贾仰文教授和清华大学杨芳副教授对本文写作给予帮助,在此一并感谢。

#### References:

- [ 1 ] Mei F S. The analysis of radiation-use ratio and the productivity of photosynthesis in Yulin district. *Shanxi Journal of Agricultural Sciences*, 1986, 6: 34-36.
- [ 2 ] Li X B, Yang J, Tian Q S, Li B. Energy Ecological Research on Productivity Dynamics of *Artemisia Ordosica* Community in Sandland. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3): 315-319.
- [ 3 ] Yang J, Gao Q Z, Li G Q, He L H, Wang Z W, Jin Z P. A study on the water ecology of dominant artificial shrubs in Huangfuchuan watershed. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1): 87-94.
- [ 4 ] Zhang N, Yu G R, Yu Z L, Zhao S D. Simulation of Temporal and Spatial Distribution of Natural Vegetation Light Utilization Efficiency Based on 3s. *Journal of Plant Ecology*(Chinese Version), 2003, 27(3): 325-336.
- [ 5 ] Zhang Z S, Li X R, Wang X P, Zhang J G. Transpiration in Artificially Re-vegetated Desert Area. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 374-379.
- [ 6 ] Zhang X D, Cai H J, Fu Y J, Wang J. Study on leaf area index of summer maize in loess areas. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2006, 24(2): 25-29.
- [ 7 ] Du Z C, Yang Z G, Cui X Y. A comparative study on leaf area index of five plant communities in typical steppe region of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland*, 2001, 23(5): 13-18.
- [ 8 ] Zhu Y J, Shao M A. Estimating saturated hydraulic conductivity of soil containing rock fragment with disc infiltrometer. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(11): 1-5.
- [ 9 ] Han C P. A tentative discussion on the soil permeating experiment. *Shanxi Science and Technology*, 2005, (3): 91-92.
- [ 10 ] Wang K, Zhang R D, Wang F Q. Continuum fractal model for unsaturated soil hydraulic conductivity. *Advances in Water Science*, 2005, 15(2): 206-210.
- [ 11 ] Office of soil investigation of Yikezhao City, Soil of Yikezhao City. Inner Mongolia: The People's Press of Inner Mongolia, 1989.
- [ 12 ] Tang S H, Zhu Q J, Zhou Y Y, Bai X H. A simple method to estimate crown cover fraction and rebuild the background information. *Journal of Image and Graphics version A*, 2003, 8(11): 1304-1309.
- [ 13 ] Fan W Y, Du H Q, Liu Z. Spectral data analysis of ground objects in Kerqin Desertification Areas. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32(2): 35-38.
- [ 14 ] Feng X M, Zhao Y S. Research on remote sensing-based reflectance model of semi-arid grassland in Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(z1): 309-313.

- [15] Sun J Y, Li M Z, Zheng L H, Hu Y G, Zhang X J. Real-time analysis of soil moisture, soil organic matter, and soil total nitrogen with NIR spectra. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26 (3): 426-429.
- [16] Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (3): 219 - 226.
- [17] Wang F, Liang L L, Zhang Y S, Gao R H. Eco-hydrological model and critical conditions of hydrology of the wetland of Erdos Larus Relictus Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica( International Journal)*, 2009, (5).

#### 参考文献:

- [1] 梅福生. 榆林地区光能利用率和光合生产潜力的分析. *陕西农业科学*, 1986, 6: 34-36.
- [2] 李晓兵, 杨劼, 田青松, 李博. 沙地油蒿群落生产力动态的能量生态学研究. *生态学报*, 1998, 18(3): 315-319.
- [3] 杨劼, 高清竹, 李国强, 何立环, 王正文, 金争平. 皇甫川流域主要人工灌木水分生态的研究. *自然资源学报*, 2002, 17(1): 87-94.
- [4] 张娜, 于贵瑞, 于振良, 赵士洞. 基于 3S 的自然植被光能利用率的时空分布特征的模拟. *植物生态学报*, 2003, 27(3): 325-336.
- [5] 张志山, 李新荣, 王新平, 张景光. 沙漠人工植被区蒸腾测定. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 374-379.
- [6] 张旭东, 蔡焕杰, 付玉娟, 王健. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 25-29.
- [7] 杜占池, 杨宗贵, 崔晓勇. 内蒙古典型草原地区 5 类植物群落叶面积指数的比较研究. *中国草地*, 2001, 23(5): 13-18.
- [9] 韩翠平. 土壤渗透试验初步探讨. *山西科技*, 2005, (3): 91-92.
- [10] 王康, 张仁铎, 王富庆. 基于连续分形理论的土壤非饱和水力传导度的研究. *水科学进展*, 2005, 15(2): 206-210.
- [11] 伊克昭盟土壤普查办公室, 伊克昭盟土壤. 内蒙古: 内蒙古人民出版社, 1989.
- [12] 唐世浩, 朱启疆, 周宇宇, 白香花. 一种简单的估算植被覆盖度和恢复背景信息的方法. *中国图像图形学报*, 2003, 8(11): 1304-1309.
- [13] 范文义, 杜华强, 刘哲. 科尔沁沙地地物光谱数据分析. *东北林业大学学报*, 2004, 32(2): 35-38.
- [14] 冯晓明, 赵英时. 内蒙半干旱草场遥感反射率模型研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 2005, 44(增刊): 309-313.
- [15] 孙建英, 李民赞, 郑立华, 胡永光, 张喜杰. 基于近红外光谱的北方潮土土壤参数实时分析. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26 (3): 426-429.
- [16] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24 (3): 219-226.