

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.016

# 浑善达克沙地天然植被蒸散量两种计算方法的比较\*

刘艳伟<sup>1</sup> 朱仲元<sup>1</sup> 乌云<sup>1</sup> 荆玉龙<sup>2</sup> 朝伦巴根<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 开鲁县林业局, 开鲁 028400)

**【摘要】** 以土壤-水分-大气-作物系统模拟模型——SWAP模型和FAO-56分册推荐的最新双作物系数法为基础, 计算浑善达克沙地天然植被蒸散量。结果表明: SWAP模型和最新双作物系数法模拟的蒸散量结果相近, 均可用于模拟蒸散量。SWAP模型能模拟土壤剖面的水分动态。

**关键词:** 沙地 天然植被 蒸散量 SWAP模型 双作物系数法

**中图分类号:** S161.4; S271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0084-05

## Comparison of Evapotranspiration of the Natural Vegetation in the Otindag Sandy Area Using Two Calculation Methods

Liu Yanwei<sup>1</sup> Zhu Zhongyuan<sup>1</sup> Wu Yun<sup>1</sup> Jing Yulong<sup>2</sup> Chaolunbagen<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulics and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. Forestry Administration of Kailu, Kailu 028400, China)

### Abstract

Using SWAP (soil-water-atmosphere-plant) model and dual crop coefficient approach presented in the FAO irrigation and drainage paper 56 (FAO-56, 1998, crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirement), the evapotranspiration of the natural vegetation in Otindag Sandy Area was calculated. The main results indicate that SWAP model and dual crop coefficient approach can be used to simulate evapotranspiration. SWAP model can simulate soil profile soil volumetric moisture.

**Key words** Sandy area, Natural vegetation, Evapotranspiration, SWAP model, Dual crop coefficient approach

### 引言

蒸散量的研究始于1802年道尔顿提出的道尔顿蒸发公式, 此后取得一系列有意义的成果<sup>[1~2]</sup>。孙景生等<sup>[3]</sup>研究了夏玉米蒸腾与土壤蒸发模拟计算方法; 樊引琴等<sup>[4]</sup>研究了不同计算方法模拟蒸散量的效果与精度; 张岩等<sup>[5]</sup>模拟了基于Penman-Monteith模型的杨树日蒸腾量; 朱仲元等<sup>[6]</sup>研究了浑善达克沙地天然杨树群落蒸散(发)量; 司建华等<sup>[7]</sup>用波文比-能量平衡法模拟了荒漠-绿洲过渡带芦苇地蒸散量; 焦醒等<sup>[8]</sup>用Penman-Monteith模

型计算了森林植被蒸散量, 并指出该模型未来发展的方向。

大田作物和人工牧草等方面蒸散量受到广泛关注, 并取得大量研究成果<sup>[9~11]</sup>, 而自然生态系统下天然植被的蒸散量的研究并不多见<sup>[12]</sup>, 本文对SWAP模型和最新双作物系数法计算天然植被蒸散量进行分析比较。

## 1 研究区概况及实验观测

### 1.1 地理概况

研究区位于浑善达克沙地东南缘南沙梁草甸草

收稿日期: 2010-05-11 修回日期: 2010-06-17

\* 国家自然科学基金资助项目(50769005, 50769002, 50139040)

作者简介: 刘艳伟, 博士生, 主要从事水资源规划与合理配置研究, E-mail: liu-xiaocao@sohu.com

通讯作者: 朱仲元, 教授, 主要从事干旱区水文水资源研究, E-mail: zhongyuanzhu@sohu.com

原区(内蒙古自治区多伦县境内),  $116^{\circ}25'36''$  E,  $42^{\circ}9'18''$  N, 海拔 1 258 m, 生育期地下水埋深在 1.2 ~ 25 m 之间。

## 1.2 野外试验观测

在试验地(海拔 1 258 m) 2 m 高处的 AZW-001 (Aust.) 自动气象站观测降水量、大气压强、空气相对湿度、太阳辐射、2 m 处大气温度、2 m 处风速、风向等微气象要素。

羊草群落生长指标的测量采用 CI-110(USA) 型叶面指数仪, 观测时段选择从植被返青期开始到枯黄, 每 5 天对 3 处  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  样方测量羊草群落叶面指数( $R_{LAI}$ )。与观测  $R_{LAI}$  同步测量 3 个样方中羊草、冰草、拂子茅的株高( $h_i, i=1, 2, 3$ )。

用 TPS-1 型光合作用仪(羊草、冰草、拂子茅依次测 1 次) 采集植被生理指标, 如参比 0.1 MPa 大气压的  $\text{CO}_2$  浓度、叶室光合有效辐射、叶片温度、叶水势、气孔导度、光合速率、叶片蒸腾速率等 14 项指标。测定时段为 6:00 ~ 19:00, 自动观测间隔设定为 10 min。

地下水位观测通过地下水位观测孔, 由自记水位计长期观测地下水位的变化。

## 1.3 实验区土壤特征参数和土壤质地的测定

土壤水分特征曲线是土壤基质吸力  $P_a$  与土壤体积含水率  $\theta_v$  的关系曲线。该研究采用压力薄膜仪和定点观测相结合的方法测定各土层的土壤水分特征曲线。

土壤物化特征参数测定包括颗粒大小分析试验、比重试验和土壤试样的基本物理化学特征参数测定。

## 2 实例分析

### 2.1 基于 SWAP 模型的蒸散量推算

SWAP 模型是模拟非饱和带土壤水分动态、温度变化、作物蒸散变化、灌溉效果、溶质传输等的软件。

#### 2.1.1 作物参数

SWAP 模型中把作物生长阶段定义为作物生长日期的线性函数, 范围为 0 ~ 2。作物返青的前一天定义为 0, 枯黄或收割日定义为 2。根据野外观测资料分别建立其与  $R_{LAI}$ 、 $h$ 、作物根长的关系, 模拟过程中假定根长密度沿土层垂向呈直线下降。

计算水分胁迫折减系数的各临界压力水头按 Wesseling 等建议选取。结合当地土壤状况, 模拟过程中不考虑盐分对根系吸水的影响。

#### 2.1.2 土壤模块的相关参数

选取土壤剖面埋深 260 cm。土壤根据类型大

致可以分为 3 层, 0 ~ 60 cm 为第 1 层, 60 ~ 120 cm 为第 2 层, 120 ~ 260 cm 为第 3 层。用土壤传递函数的方法估算了饱和水力传导度, 按 Van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线的各参数。

SWAP 模型为精确计算土壤水流, 将土层再细分为若干单元。整个土壤层面最大可划分为 60 个单元, 单元数越多计算精度越高, 但计算耗时也相应增大。该研究将试验区土壤剖面划分为 40 个单元。接近土壤表面的单元格设为 1 cm 厚度, 以精确计算上层的土壤水流, 下层依次分为 2、5、10 和 30 cm 厚度。

#### 2.1.3 初始条件和边界条件

初始条件选各单元节点的土壤体积含水率  $\theta_v$ 。

由于研究区地下水位埋深较浅, 下边界不能按照零流量或自由排水边界处理, 应该充分考虑毛管上升水的补给作用, 故从 8 个下边界条件中选取有实测资料的地下水位随时间的变化为下边界条件。

#### 2.1.4 水分运移模型参数的率定

为了保证模拟结果的准确性, 需要用模拟时段(2005 年)的实测水分数据对模型进行率定。按照初始给定的参数代入模型进行计算, 将模拟所得土壤含水率与实测土壤含水率比较, 而后适当调整有关参数。模拟值与实测值的吻合程度用均方差来表示

$$e_{\text{RMSE}} = \left[ \sum_{i=1}^N (M_i - S_i)^2 / N \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中  $M$ ——实测值  $S$ ——模拟值

$N$ ——观测次数

#### 2.1.5 SWAP 模型参数的确定及检验

保持率定的土壤、作物等的基本参数不变, 用 2006 年野外试验资料进行模型检验。2006 年根系层(生育期最大根深 85 cm)附近土层土壤体积含水率实测值与模拟值对比如图 1 所示。60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 土层实测体积含水率与模拟体积含水率的均方差分别为 4.38、2.26。由图中可以看出, 用率定后的参数能较好地模拟土壤含水率变化过程。

通过以上的率定和检验可以认为, 用率定后的参数计算所得的蒸散量是可靠的, 可以用于当地天然羊草群落蒸散量的模拟。

## 2.2 基于最新双作物系数法的蒸散量计算

天然条件下的双作物系数明显不同于充分供水条件下的双作物系数, 即计算双作物系数时要考虑蒸发衰减和水分胁迫, 需要对 FAO-56 文本中推荐的作物系数进行校正<sup>[2, 13~14]</sup>。蒸发衰减系数和水分胁迫系数的计算在 FAO-56 分册中有详细阐述, 作物生长中期的基本作物系数处在较小范围时计算

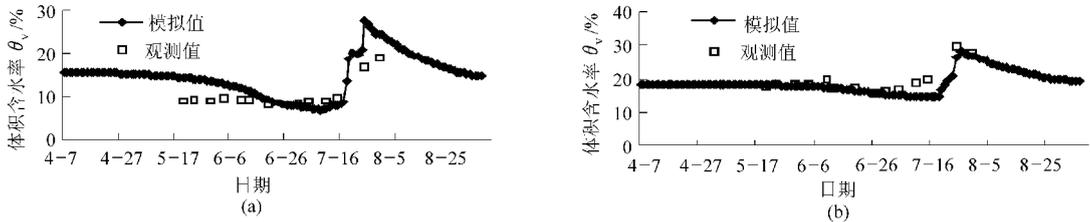


图1 2006年土壤根系层附近土层模拟值与实测值比较

Fig.1 Comparison of the simulated and the measured soil volumetric moisture in root zone  
(a) 60 ~ 80 cm (b) 80 ~ 100 cm

方法有所不同,故该文简略计算过程,将重点放在对FAO-56推荐的生长中期阶段基本作物系数的校正及依据气象因子的气孔导度回归模型的建立上。

### 2.2.1 确定生长中期阶段基本作物系数

天然条件下供水有限,羊草群落为稀疏状态,按照FAO-56推荐的方法对稀疏植被进行修正。生长中期基本作物系数用Ritchie推荐的方法估算

$$K_{cb, mid, es} = K_{cmin} + (K_{cbfull} - K_{cmin}) (1 - \exp(-0.7R_{LAI})) \quad (2)$$

$K_{cb, mid}$ 对以下两种情况进行校正:

(1) 当气候条件不是  $RH_{min} = 45\%$ ,  $u_2 = 2 \text{ m/s}$ , 基本作物系数大于0.45时

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

(2) Ritchie方法应用于单叶气孔阻力 $r$ 约为100 s/m的作物,羊草群落的牧草单叶气孔综合阻力 $r$ 要进行气孔阻力校正。气孔行为校正式为

$$K_{cb, mid, adj} = K_{cb, mid, es} F_r \quad (4)$$

$$F_r \approx \frac{\Delta + r(1 + 0.34u_2)}{\Delta + r(1 + 0.34u_2 \frac{r}{100})} \quad (5)$$

式中  $K_{cbfull}$ ——生长中期羊草群落平均高度达到最大时估计的基本作物系数平均值,具体计算参照文献[2]

$K_{cmin}$ ——裸露土壤作物系数 ( $K_{cmin} \approx 0.15 \sim 0.20$ )

$K_{cb, mid, es}$ ——充分供水条件下基本作物系数

$K_{cb, mid}$ ——经过气候校正的作物系数

$K_{cb, mid, adj}$ ——经气孔阻力校正的中期作物系数,即最终的  $K_{cb, mid}$

$F_r$ ——气孔行为校正系数

$r$ ——单叶平均气孔阻力, s/m

$u_2$ ——2 m高度处的平均风速, m/s

$RH_{min}$ ——生长中期日最小相对湿度的平均值, %

$h$ ——羊草群落3种牧草日高度的平均值, m

$\Delta$ ——饱和水汽压曲线斜率

气孔导度与气象因子关系密切,用观测的气孔导度与气象因子数据建立关系式为(以羊草为例)

$$g = 0.0108 - 1988.46R_{pa} + 0.111D_{vp} - 0.0003T_b \quad (R^2 = 0.86) \quad (6)$$

式中  $R_{pa}$ ——光合有效辐射

$D_{vp}$ ——饱和水汽压差

$T_b$ ——叶片温度

羊草单叶片气孔阻力为

$$r = 1/g \quad (7)$$

依次计算群落中冰草、拂子毛气孔阻力,式(4)

中  $F_r$ 羊草群落综合气孔行为校正系数为

$$F_r = \sum_{j=1}^3 F_{r,j} G_j \quad (8)$$

### 2.2.2 蒸散量计算式

以日为计算时段的FAO-56最新双作物系数法计算蒸散量为

$$E_i = (K_{s,i} K_{cb,i} + K_{e,i}) E_o = K_{s,i} K_{cb,i} E_o + K_{e,i} E_o = E_{c,i} + E_{s,i} \quad (9)$$

式中  $K_{cb,i}$ 、 $K_{e,i}$ ——第*i*天羊草群落基本作物系数和土壤蒸发系数

$E_i$ 、 $E_{c,i}$ 、 $E_{s,i}$ ——有水分胁迫的羊草群落蒸散量、蒸腾量和土壤蒸发, mm/d

$K_{s,i}$ ——第*i*天水分胁迫系数,  $0 \leq K_{s,i} < 1$

## 3 最新双作物系数法与SWAP模型计算蒸散量的偏差分析

以最新双作物系数法与SWAP模型分别计算了2005年及2006年研究区羊草群落蒸散量,模拟结果见图2、3及表1。从表1和图2、3中可见,两种模型模拟的蒸腾量及蒸发量,其变化趋势大体一致,但是两种模型在计算结果上存在一些差异,主要是由于:①计算参照作物蒸散量的公式不同。最新双作物系数法依据的是经过修正的Penman-Monteith公式,而SWAP根据的是Penman-Monteith公式,前者使用更广泛,适应性更强,准确度更高。②从气孔

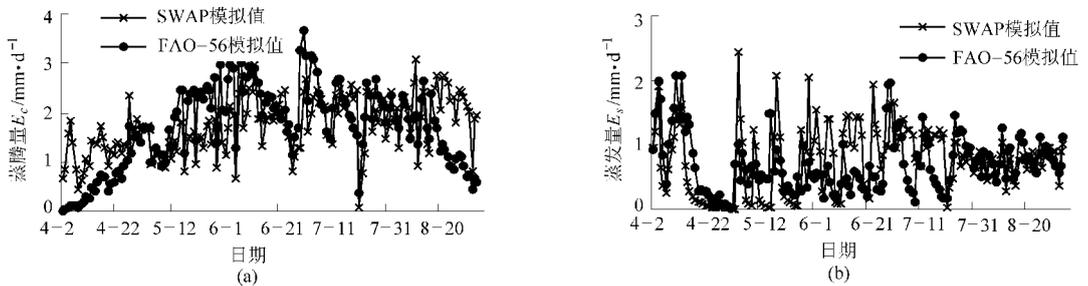


图 2 2005 年最新双作物系数法与 SWAP 模型模拟生育期蒸腾量及蒸发量过程对比图

Fig. 2 Comparison of daily transpiration and evaporation in growth period using FAO-56 dual crop coefficient approach and SWAP model in 2005

(a) 蒸腾量 (b) 蒸发量

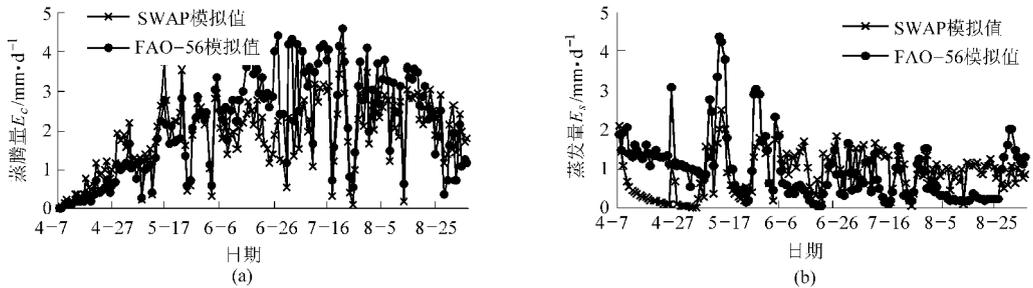


图 3 2006 年最新双作物系数法与 SWAP 模型模拟生育期蒸腾量及蒸发量过程对比图

Fig. 3 Comparison of daily transpiration and evaporation in growth period using FAO-56 dual crop coefficient approach and SWAP model in 2006

(a) 蒸腾量 (b) 蒸发量

表 1 最新双作物系数法与 SWAP 模型计算蒸散量结果比较

Tab. 1 Result of crop evapotranspiration

mm

年份	最新双作物系数法			SWAP 模型			年降雨
	蒸腾量 $E_c$	蒸发量 $E_s$	蒸散量 $E$	蒸腾量 $E_c$	蒸发量 $E_s$	蒸散量 $E$	
2005	262.83	109.17	371.99	266.96	116.64	383.60	322.80
2006	322.78	149.02	471.81	282.62	134.75	427.37	463.00

阻力的取值上分析。用光合作用仪观测数据进行相关分析,影响天然羊草日蒸腾的生理因子中,单叶片气孔导度为重要因子之一,2005 年和 2006 年相关系数分别达到了 0.70 和 0.66。由此可见,日气孔导度的取值对蒸腾量有较大影响,SWAP 模型采用推荐的气孔阻力值(70 s/m),降低了计算精度,最终导致丰水年(2006 年)模拟结果稍微偏大,枯水年(2005 年)模拟结果稍小。但是两种模型模拟的偏差在 10% 之内,模拟结果均也可用于下一步的计算。③深层渗漏和毛管上升水很难观测,最新双作物系数法计算中大多忽略了地下毛管上升水的补给作用,而地下水浅埋区植被发生胁迫时地下水又通过毛管上升水的形式补充给根系层。这样使最新双作物系数法模拟的枯水年(2005 年)结果稍微偏小。

## 4 结论

(1) 最新双作物系数法和 SWAP 模型两种方法

模拟的蒸散量均具有一定的精度,可用于模拟蒸散量。

(2) 最新双作物系数法需要气象资料、作物指标、田间持水率和凋萎含水率,而其他土壤指标不作要求;SWAP 模型需要更全面的土壤资料,能模拟各土壤分层的日土壤水分动态。

(3) 与充分供水条件下蒸散量不同,天然条件下降水分布和羊草群落蒸散量(需水量)存在一定供需矛盾,最新双作物系数法从蒸发衰减系数和水分胁迫系数方面对其进行了充分考虑,而没有考虑地下水的补给。SWAP 模型则充分考虑到了地下水对土壤水的补给,从而一定程度上缓解了羊草群落蒸散量(需水量)。对于地下水埋深较浅地区,SWAP 模型有优势;天然条件下,地下水埋深较深地区最新双作物系数法精度较高。

## 参 考 文 献

- 1 Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1948, 193: 120 ~ 145.
- 2 Richard G Allen, Luis S Pereira, Dirk Raes Martin Smith. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 1998.
- 3 孙景生,陈玉民,康绍忠,等. 夏玉米田水热耦合运移的数值模拟[J]. 灌溉排水,1995,14(3):24~29.  
Sun Jingsheng, Chen Yumin, Kang Shaozhong, et al. Numerical modeling of coupled movement of moisture and heat for summer corn field[J]. Irrigation and Drainage, 1995, 14(3):24~29. (in Chinese)
- 4 樊引琴,蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报,2002,33(3):50~54.  
Fan Yinqin, Cai Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3):50~54. (in Chinese)
- 5 张岩,许廷武,杨培岭,等. 基于 Penman - Monteith 模型的杨树日蒸腾模拟[J]. 中国农村水利水电,2006(9):32~37.  
Zhang Yan, Xu Tingwu, Yang Peiling, et al. Simulation of daily transpiration of poplar forest based on Penman - Monteith model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(9):32~37. (in Chinese)
- 6 朱仲元,朝伦巴根,王志强,等. 浑善达克沙地天然杨树群落蒸散(发)量研究[J]. 水利学报,2007,38(5):582~590.  
Zhu Zhongyuan, Chaolunbagen, Wang Zhiqiang, et al. Study on diurnal variation of Populus evapotranspiration based on Shuttleworth - Wallace model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5):582~590. (in Chinese)
- 7 司建华,冯起,张艳武,等. 荒漠-绿洲芦苇地蒸散量及能量平衡特征[J]. 干旱区研究,2010,27(2):160~168.  
Si Jianhua, Feng Qi, Zhang Yanwu, et al. Research on evapotranspiration and energy budget of Phragmites australis Stand in Oasis[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(2):160~168. (in Chinese)
- 8 焦醒,刘广全,匡尚富,等. Penman - Monteith 模型在森林植被蒸散研究中的应用[J]. 水利学报,2010,41(2):245~252.  
Jiao Xing, Liu Guangquan, Kuang Shangfu, et al. Review on application of Penman - Monteith equation to studying forest vegetation evapotranspiration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2):245~252. (in Chinese)
- 9 王宇,周广胜. 雨养玉米农田生态系统的蒸散特征及其作物系数[J]. 应用生态学报,2010,21(3):647~653.  
Wang Yu, Zhou Guangsheng. Evapotranspiration characteristics and crop coefficient of rain-fed maize agro ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3):647~653. (in Chinese)
- 10 于婵,朝伦巴根,高瑞忠,等. 无水分胁迫下行作物蒸散发与双涌源能量分配和交换关系[J]. 应用生态学报,2006,17(5):839~844.  
Yu Chan, Chaolunbagen, Gao Ruizhong, et al. Relationships between row crop evapotranspiration and two sources-energy partition and exchange under non-water stress condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5):839~844. (in Chinese)
- 11 王志强,朝伦巴根,柴建华. 浑善达克沙地人工植被覆盖下土壤蒸发的模拟研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(6):49~52.  
Wang Zhiqiang, Chaolunbagen, Chai Jianhua. Soil evaporation in artificially re-vegetated sandy areas of Hunshandake[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007,15(6):49~52. (in Chinese)
- 12 刘艳伟,朱仲元,朝伦巴根,等. 浅埋条件下天然羊草群落生育期蒸散量的计算方法[J]. 节水灌溉,2010(4):8~11.  
Liu Yanwei, Zhu Zhongyuan, Chaolunbagen, et al. Calculation method of nature Leymus Chinensis Community evapotranspiration under shallow water table condition[J]. Saving Irrigation, 2010(4):8~11. (in Chinese)
- 13 刘艳伟. 浑善达克沙地天然羊草群落生态需水研究与 GSPAC 系统水分动态模拟[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.  
Liu Yanwei. Study on the Leymus Chinensis Community of water requirement and GSPAC system water in the Otindag Sandy Area[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 14 刘艳伟,朱仲元,朝伦巴根,等. 水分胁迫条件下羊草群落生育期双作物系数计算方法的验证[J]. 中国农村水利水电,2010(4):39~42.  
Liu Yanwei, Zhu Zhongyuan, Chaolunbagen, et al. Validation of estimating dual crop coefficient approach in growing season for the community of Leymus Chinensis under water stress conditions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(4):39~42. (in Chinese)