

# 祁连山北坡草地潜在蒸散量研究

张耀生<sup>1</sup>, 黄德青<sup>1</sup>, 赵新全<sup>1</sup>, 赵双喜<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 高原生物适应与进化重点实验室, 青海西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100001)

**摘要** 采用 FAO 推荐的标准化、统一化后的 Penman-Monteith 公式计算植物生长季节祁连山北坡 5 种主要类型草地的潜在蒸散量, 通过揭示植物生长季蒸散量季节变化特征, 分析不同类型草地的蒸散特征以及蒸散量与土壤水分之间的关系。

**关键词** FAO 彭曼公式; 蒸散; 祁连山; 草地类型; 盖度

**中图分类号** S11<sup>+</sup>9 **文献标识码** A **文章编号** 0517 - 6611(2008)20 - 08403 - 03

## Study on the Potential Evapotranspiration of Grassland in the North Slope of Qilianshan Mountain

ZHANG Yao-sheng et al (Northwest Institute of Plateau Biology, Key Laboratory for Adaptation and Evolution of Plateau Organism, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001)

**Abstract** The standardized and unified Penman-Monteith formula recommended by FAO was used to calculate the potential evapotranspirations of 5 main types of grasslands in the north slope of Qilianshan Mountain in the growing seasons of plant. The evapotranspiration characteristics of different types of grasslands and the relationship between evapotranspiration and soil water were analyzed through revealing the seasonal variation characteristics of evapotranspiration in the growing seasons of plant.

**Key words** FAO Penman-Monteith formula; Evapotranspiration; Qilianshan Mountain; Grassland type; Coverage

内陆河流域水资源管理是保护生态环境的主要内容之一, 流域上游植被和水分相互关系研究是流域生态水文学研究的重点。黑河是我国第二大内陆河, 祁连山是其主要的水源供给地。山区草地植被具有重要的水源涵养生态功能, 而草地蒸散是影响草地土壤水分动态的关键因素之一。国内外对农作物的蒸散研究已经有了较成熟的方法, 对草地的蒸散研究也已有一些报道, 但对祁连山不同类型高寒草地蒸散特征的比较研究还不多见<sup>[1-23]</sup>。该文采用 FAO 推荐的标准化、统一化后的 Penman-Monteith 公式计算了植物生长季节祁连山北坡 5 种主要类型草地的潜在蒸散量, 通过揭示植物生长季蒸散量季节变化特征, 分析不同类型草地的蒸散特征以及蒸散量与土壤水分之间的关系。以期对祁连山草地生

态环境保护和流域水资源、草地资源利用以及流域综合管理提供科学根据。

### 1 研究区概况

研究观测地区位于黑河上游的甘肃省肃南裕固族自治县境内, 地处祁连山北坡、河西走廊南侧, 地理位置介于 97°20' ~ 102°13' E, 37°28' ~ 39°49' N。该区域属于大陆性高寒半干旱气候, 土壤和植被类型因海拔高度、地形和地理位置的差异而形成明显的垂直分布差异<sup>[24-29]</sup>。该研究以高寒草原、山地草甸、山地草甸草原、山地草原和山地荒漠草原 5 种主要的天然草地类型为研究对象, 分别在各草地类型设立相应观测点, 通过仪器观测和人工调查取样获取相关研究数据。各观测点的基本概况见表 1。

表 1 各观测点的基本概况

Table 1 General conditions of each observation site

草地类型 Grassland type	观测点 Observation site	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude m	土壤类型 Soil type
高寒草原 Alpine steppe	天生圈	98°14' E, 39°06' N	3 445	高山草原土
山地草甸 Mountain meadow	灰沟梁	99°48' E, 38°46' N	3 134	亚高山灌丛草甸土
山地草甸草原 Mountain meadow steppe	牛心墩	99°49' E, 38°48' N	2 950	山地暗栗钙土
山地草原 Mountain steppe	马场滩	99°54' E, 38°49' N	2 785	山地栗钙土
山地荒漠草原 Mountain-desert grassland	珠龙关	98°00' E, 39°11' N	2 861	山地棕钙土

### 2 数据分析方法

在 5 类草地各架设自动气象站 1 套, 观测相关气象数据。土壤水分数据采用土钻方法获取。所有运算过程通过 SAS 8 统计软件进行。土壤水分和蒸散量相关性分析采用 Excel 软件进行。为解决 Penman-Monteith 模式中空气动力学阻力和植被冠层表明阻力取值比较困难的问题, 1992 年 Smith 在总结试验的基础上提出了计算蒸散量的 P-M 简化公式:

$$E_w = \frac{0.408 (R_n - G) + \frac{C_n \times \mu_s \times (e_s - e_a)}{T + 273}}{1 + C_d \times \mu_s} \quad (1)$$

$E_w$  为蒸散量 (mm/d), 以 1 天步长进行计算;  $e_s$  为饱和水汽压曲线对温度的斜率 (kPa/°C);  $R_n$  为净辐射 [MJ/(m<sup>2</sup>·h)];  $G$  为地热通量 [MJ/(m<sup>2</sup>·h)];  $C_n$  为干湿表常数 (kPa/°C);  $C_d$  和  $C_n$  分别是以小时和 1 天为步长的彭曼公式设置常数;  $\mu_s$  为风速 (m/s);  $e_s$ 、 $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压。式 (1) 在实际应用中具有比较高的精度, 2000 年它被美国灌溉与水文技术委员会 (ASCE) 推荐使用<sup>[11]</sup>, 用来计算矮草 (0.12 m 左右, 牧场、草坪等) 的蒸散发  $E_w$  与高草 (0.5 m 左右, 小麦、棉花等) 的蒸散发  $E_w$ , 简称 ASCE-PM 公式, 公式中针对矮草与高草的常数与可选参数参见表 2。

#### 2.1 饱和水汽压曲线对温度的斜率 的计算方法有很

**基金项目** 国家科技支撑计划项目 (2006BAC01A02); 中国科学院知识创新重大项目 (kzcx1-09); 中国科学院西北高原生物研究所知识创新重点研究领域项目 (cjc020144) 资助。

**作者简介** 张耀生 (1953 - ), 男, 陕西凤翔人, 副研究员, 从事草地生态方面的研究。

**收稿日期** 2008-04-07

表 2 ASCE-PM 公式参数值与常量取值

Table 2 Constant value and parameter value of the ASCE-PM formula

项目 Item	矮草 Short grass		高草 Tall grass		$E_n$ 与 $E_r$ 单位 Unit of $E_n$ and $E_r$	$R_n$ 与 $G$ 单位 Unit of $R_n$ and $G$
	$C_n$	$C_d$	$C_n$	$C_d$		
天 Day	900	0.34	1 600	0.38	mm/d	MJ/(m <sup>2</sup> ·d)
小时(白天) Hour in daytime	37	0.24	66	0.25	mm/h	MJ/(m <sup>2</sup> ·h)
小时(夜间) Hour at night	37	0.96	66	1.70	mm/h	MJ/(m <sup>2</sup> ·h)

多,经过对比,以下公式计算结果和黑河山区实测结果最为吻合,其形式如下:

$$= \frac{4\ 098 \times e_{day}^o}{(273 + T_{av})^2} \quad (2)$$

式中,  $T_{av}$ 为日平均气温;  $e_{day}^o$ 为饱和蒸汽压。当日饱和蒸汽压通过以下公式计算:

$$e_{day}^o = \exp \left[ \frac{16\ 78 \times T_{av} - 116\ 9}{T_{av} + 237.3} \right] \quad (3)$$

2.2  $e_s$ 、 $e_a$  物理学中,把相对湿度定义为空气中实际水汽压与同温度下的饱和水汽压的百分比。因此饱和水汽压可用绝对湿度和相对湿度的比值来计算。

$$e_s = \frac{e_a}{RH} \quad (4)$$

式(4)中,  $e_s$ 为饱和水汽压;  $e_a$ 为实际水汽压,计算时可用绝对湿度来代替;  $RH$ 为相对湿度。

2.3 干湿表常数 采用 Brunt(1952)提出的公式计算,形式如下:

$$= \frac{C_p P}{P} = 0.001\ 63 \frac{P}{P} \quad (5)$$

式(5)中,  $C_p$ 为空气定压比热 [1 004 J/(kg· )];  $P$ 为大气压力 (hPa); 为水汽分子与干空气分子的重量比,取值 0.622; 为蒸发潜热 (MJ/kg)。蒸发潜热采用 Harrison (1963)提出的公式计算。

$$= 2\ 500\ 25 - 0.002\ 365 / T_{av} \quad (6)$$

式(6)中,  $T_{av}$ 为日平均温度。

2.4  $R_n$  净辐射采用下式计算:

$$R_n = Q_r (1 - ) - \times (273 + T_{av})^4 (0.39 - 0.058 \sqrt{e_a}) (0.10 + 0.90n/N) \quad (7)$$

式(7)中,  $Q_r$ 为太阳总辐射; 为地面反射率,草地为 0.26; 为大气发射率(假定 =0.9); 为斯蒂芬·波尔兹曼常数, =4 903 ×10<sup>-9</sup> MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $T_{av}$ 为日平均气温;  $e_a$ 为实际水汽压;  $n/N$ 为日照百分率,  $n$ 为某月实际平均日照时数,  $N$ 为某月平均可日照时数。

2.5  $G$  土壤热通量采用 Zhang L等<sup>[8]</sup>通过多季节 Lysimeter 观测得出的公式计算:

$$G = 0.12 \times [T_{av, day} - (T_{av, day-1} + T_{av, day-2} + T_{av, day-3}) / 3] \quad (8)$$

式(8)中,  $T_{av, day}$ 为日平均气温;  $T_{av, day-1}$ 、 $T_{av, day-2}$ 、 $T_{av, day-3}$ 为前 3 d的平均气温。

### 3 结果与分析

3.1 蒸散量的季节变化特征 与各种天然植被蒸散研究的结果相同,祁连山北坡草地的蒸散量季节动态也呈现单峰曲线状态。根据计算结果绘制的 2004年祁连山北坡 5类天然

草地生长季的潜在蒸散量动态曲线(图 1)表明,5种类型草地生长季的蒸散量动态变化过程具有相似性,均在 7月达到年度最高值,这是由于 7月太阳辐射最强,由其提供的蒸散过程的驱动能量达到了一年中的峰值。这与吴锦奎等人研究黑河中游草地蒸散季节动态的结果一致;生长季蒸散量在达到峰值之前的 4月下旬都出现一次小时段的峰值,这是由于春季土壤解冻以后伴随气温的回升,近地面多风、地表冰雪和浅层土壤固体水分的融化加速了垫面水汽交换,以及植物的生长活动提升了蒸散量中的植物蒸腾分量等因素造成的;5月蒸散量动态出现一个小幅度的波谷过程,主要因为当年此阶段祁连山北坡经历了一次大范围的降雪降温过程;从 5月下旬到 7月中旬,5类天然草地蒸散量持续升高并最终达到年度最大值;从 7月下旬开始直至生长季末期,蒸散量动态呈现明显的降低过程。因为气温的逐渐降低及牧草生长速度逐渐下降减弱了蒸散强度。

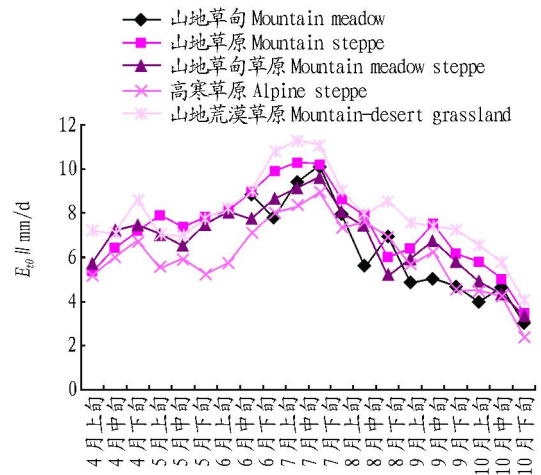


图 1 5种类型草地生长季潜在蒸散量

Fig 1 Potential evapotranspiration of 5 kinds of grassland in growing season

3.2 不同草地类型的蒸散量特征 影响蒸散的主导气象因子在不同草地类型的幅值差异,导致计算得来的潜在蒸散量有明显差别。由图 1和表 3可知,5种草地潜在蒸散量的顺序为:山地荒漠草原 >山地草原 >山地草甸草原 >山地草甸 >高寒草原。山地荒漠草原潜在蒸散量的计算值最大,日平均为 7.945 3 mm;高寒草原潜在蒸散量计算值最小,日平均为 6.092 4 mm。不同类型草地的潜在蒸散量差异与各类型草地所在区域的主要气象因子观测值的差异相关,诸如太阳辐射、气温、空气湿度和风速等;蒸散量实际上还与不同类型草地的下垫面特征有关,诸如草地盖度、植株平均高度、植物群落物种组成和生长阶段差异等;土壤水分含量与蒸散量的关系更是密切。

表 3 不同草地类型的潜在蒸散量 mm

草地类型 Grassland type	日平均蒸散量 Average daily evapotranspiration	生长季蒸散量 Evapotranspiration of growing season
高寒草原 Alpine steppe	6 092.4	1 236.76
山地草甸 Mountain meadow	6 361.1	839.67
山地草甸草原 Mountain meadow steppe	6 811.4	1 382.71
山地草原 Mountain steppe	7 310.6	1 484.05
山地荒漠草原 Mountain-desert grassland	7 945.3	1 612.90

注:山地草甸观测点计算日期为 6月中旬~10月中旬,其余观测点计算日期为 4月上旬~10月中旬。

Note: Observation time at mountain meadow was from the middle June to middle October, observation time was from the beginning of April to the middle of October in other sites

3.3 蒸散量与土壤水分的关系 土壤水分蒸散是土壤—植被—大气界面水分交换的主要方式,降水入渗是天然草地土壤水分的主要来源。降水入渗不仅依赖于随机的降水事件,而且受制于土壤状况<sup>[7]</sup>;同时,不同植被类型的土壤具有不同的水分平衡关系,土壤湿度依赖于植被类型和土壤特性,

但反过来是决定不同植被蒸散量的关键因素<sup>[6]</sup>。

按照不同草地类型、不同深度土壤层次对蒸散量与 0~60 cm 土层的土壤含水量的关系进行了分析(表 4),结果表明 5 种类型草地生长季蒸散量与土壤表层 0~10 cm 的土壤含水量关系最大,回归分析显示蒸散量与该层土壤含水量显著相关( $P < 0.05$ ),相关系数均在 0.75 以上。其次,蒸散对大多 10~20 cm 土层的土壤含水量影响也达显著水平( $P < 0.05$ ),这是由于 0~20 cm 土层是大量根系集中分布的主要层次、植物根系吸水以及植物生长发育的利用所造成。蒸散量与下层土壤含水量的相关性明显下降,即蒸散对深层土壤水分的影响较小。从 5 种类型草地蒸散量与土壤含水量的分析中还发现,山地荒漠草原和高寒草原蒸散量与 0~20 cm 土壤含水量的相关程度较其他 3 类天然草地要高,主要由于它们的植被盖度较其他 3 类天然草地植被盖度低。比如在山地荒漠草原,植被盖度还不到 15%,而山地草甸平均盖度可以高达 95%。由此说明,植被盖度越高的草地类型,蒸散量与土壤含水量的相关性越低,即盖度愈高,蒸散量对土壤含水量的影响愈小。反之,植被的盖度愈低,蒸散量对土壤含水量的影响愈大。这与王根绪等<sup>[13]</sup>对高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环的影响的研究结论是一致的。

表 4 蒸散量与土壤含水量的关系模拟

Table 4 Relation simulation of evapotranspiration and soil water content

土层 Soil layer	cm	草地类型 Grassland type	拟合曲线 Simulation curve	$R^2$	$R$	标准误 Standard error
0~10		高寒草原	$y = 2.7616x - 2.2296$	0.6412	0.8007*	0.92
		山地草甸	$y = 2.8506x + 33.2510$	0.5974	0.7729*	1.33
		山地草甸草原	$y = 2.8589x - 0.4516$	0.5875	0.7665*	1.07
		山地草原	$y = 2.1200x - 2.6337$	0.6020	0.7759*	0.77
		山地荒漠草原	$y = 1.7786x - 8.1230$	0.6436	0.8022*	0.59
10~20		高寒草原	$y = 1.8943x + 2.2743$	0.6213	0.7882*	0.66
		山地草甸	$y = 1.0764x + 42.8490$	0.4063	0.6374	0.75
		山地草甸草原	$y = 1.4221x + 8.7459$	0.5751	0.7584*	0.54
		山地草原	$y = 1.1298x + 4.1760$	0.5943	0.7709*	0.42
		山地荒漠草原	$y = 0.8557x + 0.3938$	0.6024	0.7762*	0.31
20~40		高寒草原	$y = 1.3091x + 6.5472$	0.4401	0.6634	0.52
		山地草甸	$y = 2.3412x + 28.4460$	0.5552	0.7451	1.21
		山地草甸草原	$y = 1.5567x + 8.5211$	0.5207	0.7216	0.67
		山地草原	$y = 0.4890x + 8.3036$	0.4617	0.6795	0.23
		山地荒漠草原	$y = 0.4053x + 3.6927$	0.3260	0.5710	1.05
40~60		高寒草原	$y = 0.2685x + 8.9588$	0.1087	0.3297	1.36
		山地草甸	$y = 0.3959x + 35.7000$	0.2098	0.4580	2.05
		山地草甸草原	$y = 1.5399x + 7.5797$	0.5954	0.7684	1.77
		山地草原	$y = 0.4901x + 9.2318$	0.3889	0.6236	1.10
		山地荒漠草原	$y = 0.0968x + 4.6631$	0.0431	0.2076	0.83

注:  $y$  为土壤含水量,  $x$  为蒸散量; \* 表示数据在 0.05 水平上差异显著。

Note:  $y$  stands for soil water content,  $x$  stands for evapotranspiration \* means significant difference at 0.05 level

#### 4 结论

(1) 祁连山北坡草地潜在蒸散量具有明显的季节动态变化规律,生长季蒸散量动态呈现单峰曲线,峰值出现在 7 月。

(2) 不同类型的草地潜在蒸散量具有明显的差异。依其计算数值大小顺序排列为:山地荒漠草原 > 山地草原 > 山地草甸草原 > 山地草甸 > 高寒草原。

(3) 蒸散量和土壤水分含量的相关性分析表明,表层土壤水分含量与蒸散量的相关性高于深层土壤水分含量。在 5

类草地中,较高植被盖度草地的这种相关程度低于较低植被盖度的草地,说明适度的高植被覆盖度有利于增进草地土壤水分含量的稳定性。

#### 参考文献

- [1] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAESD, et al. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, Crop Evapotranspiration [M]. Rome: FAO, 1998
- [2] BRENNER A J, NCOLL L D. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands[J]. Agri For (下转第 8435 页)

- [D]. 天津:天津大学,1991
- [10] 沈浩,施南庚. 用离心传质机对含氨废水进行吹脱[J]. 南京化工学院学报, 1994, 16(4): 60 - 64
- [11] 张立德,牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京:科学出版社, 2001: 5
- [12] 陈建峰,贾志谦,王玉红. 等. 超重力场中合成立方形纳米  $\text{CaCO}_3$  颗粒与表征[J]. 化学物理学报, 1997, 10(5): 457 - 460
- [13] 刘建伟,刘有智,张艳辉. 等. 超重力技术制备纳米氧化锌的工艺研究[J]. 化学工程师, 2001(5): 22 - 23
- [14] 李军平,刘有智,员汝胜. 等. 纳米硫酸钡粒子超重力法制备及其表征[J]. 山西化工, 2002(1): 9 - 10
- [15] 周敏毅,陈建峰,刘晓林. 重结晶法制备微粉布洛芬的初步探索[J]. 化工进展, 2003, 22(5): 524 - 527
- [16] 万冬梅. 超重力技术用于工业尾气脱硫化学吸收过程的研究[D]. 北京:北京化工大学, 1995
- [17] 陈昭琼,熊双喜,童志权. 等. 螺旋型旋转吸收器烟气脱硫[J]. 环境工程, 1996, 14(2): 21 - 24
- [18] 张健. 旋转床超重力场分离气溶胶的研究[D]. 北京:北京化工大学, 1994
- [19] 张海峰. 旋转床除尘技术的研究[D]. 北京:北京化工大学, 1996
- [20] 张艳辉. 超重力旋转床用于烟气除尘的实验研究[J]. 环境工程, 2003, 21(6): 42 - 58
- [21] 彭锋. 内循环超重力反应器传质、发酵性能及放大研究[D]. 北京:北京化工大学, 2000
- [22] TAKEMURA M, YOSHIDA S. Stimulation of DNA polymerase alpha by hypergravity generated by centrifugal acceleration[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2001, 289(2): 345 - 349
- [23] MARTIZMANOU M, HAMPP R. Hypergravity effects on the *Arabidopsis thaliana* transcriptome[J]. Physiol Plant, 2003, 118(2): 221 - 231
- [24] SOGA K, WAKABAYASHI K, HOSON T, et al. Hypergravity induced increase in the apoplastic pH and its possible involvement in suppression of beta - glucan breakdown in maize seedlings[J]. Aust J Plant Physiol, 2000, 27(10): 967 - 972
- [25] SOGA K, WAKABAYASHI K, KAM ISAKA S, et al. Gravitropism perception in growth inhibition of plant shoots under hypergravity conditions produced by centrifugation is independent of that in gravitropism and may involve mechanoreceptors[J]. Planta, 2004, 218(6): 1054 - 1061
- [26] SOGA K, WAKABAYASHI K, KAM ISAKA S, et al. Growth restoration in azuki bean and maize seedlings by removal of hypergravity stimuli[J]. Adv space Res, 2003, 31(10): 2269 - 2274
- [27] SOGA K, WAKABAYASHI K, KAM ISAKA S, et al. Perception mechanism of gravity stimuli in hypergravity induced growth inhibition of azuki bean roots[J]. Biol Sci Space, 2003, 17(3): 179 - 180
- [28] SOGA K, WAKABAYASHI K, KAM ISAKA S, et al. Mechanoreceptors rather than sedimentable amyloplasts perceive the gravity signal in hypergravity induced inhibition of root growth in azuki bean[J]. Funct Plant Biol, 2005, 32(2): 175 - 179
- [29] BACON E, MORRE D J. Plasma membrane NADH oxidase of maize roots responds to gravity and imposed centrifugal forces[J]. Plant Physiol Biochem, 2001, 39(6): 487 - 494
- [30] GARCIA C, HICKS C, MORRE D J. Plasma membrane NADH oxidase is gravi-responsive[J]. Plant Physiol Biochem, 1999, 37(7/8): 551 - 558
- [31] KITTING A I, VAN LOON J J, VORSTO, et al. Ground based studies of gene expression in Arabidopsis exposed to gravity stresses[J]. Gravity Physiol, 2004, 1(2): 223 - 224
- [32] 林杉,陶洪斌,赵紫娟. 离心力对蚕豆叶片质外体汁液中磷酸己糖异构酶活力的影响[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(2): 153 - 155
- [33] 李巧英. 超重力处理对三种豆类生理生化机理影响的研究[D]. 山西农业大学, 2004
- [34] 杨美红,郭春绒,王金胜. 超重力处理及盐胁迫对绿豆幼苗生理生化指标的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 108 - 109
- [35] 杨美红,郭春绒,董宽虎. 等. 超重力处理对苜蓿幼苗抗盐性的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 16 - 18
- [36] 郝靖国. Mass transfer of centrifugally enhanced polymer devolatilization by using foam metal bed[M]. MS Dissertation: Case Western Reserve University, 1995
- [37] 周绪美,郭锴,王玉红. 等. 超重力场技术用于油田注水脱氧的工业研究[J]. 石油化工, 1994, 23(12): 807 - 812

## (上接第 8405 页)

- Meteorol, 1997, 84: 187 - 205
- [3] DOLMAN A J. A multiple-source and surface energy balance model for use in general circulation models[J]. Agri For Meteorol, 1993, 65: 21 - 45
- [4] KM K S, BEARD J B. Comparative evapotranspiration rates and associated plant morphological characteristics[J]. Crop Science, 1988, 28: 328 - 331
- [5] RANA G, KATERJIN. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: A review[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13: 125 - 153
- [6] RODRIGUEZ-PIURBE I. Ecohydrology: A hydrological perspective of climate-soil-vegetation dynamics[J]. Water Resources Research, 2000, 36(1): 3 - 9
- [7] ZHANG L, DAWASW R, REECE P H. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701 - 708
- [8] ZHANG L, DAWESW R, SLAVICH P G, et al. Growth and groundwater uptake responses of Lucerne to changes in groundwater levels and salinity: lysimeter, isotope and modeling studies[J]. Agricultural Water Management, 1999, 39: 265 - 282
- [9] 宋克超,康尔泗,金博文. 等. 黑河流域山区植被带草地蒸散发试验研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 349 - 356
- [10] 赵炳祥,陈佐忠,胡林. 等. 草坪蒸散发研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 148 - 157
- [11] 司建华,冯起,张小由. 等. 极端干旱条件下柽柳种群蒸散量的日变化研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 380 - 385
- [12] 王新平,张利平,刘立超. 等. 干旱沙区陆面蒸散量与土壤水分关系的数值计算[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 388 - 391
- [13] 王根绪,沈永平,钱鞠. 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653 - 659
- [14] 吴锦奎,丁永建,沈永平. 等. 黑河中游地区湿草地蒸散量试验研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 582 - 590
- [15] 李晓军,李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 212 - 216
- [16] 程积民. 黄土丘陵半干旱区几种牧草蒸腾作用的研究[J]. 干旱区研究, 1989(2): 62 - 65
- [17] 宋炳煜. 草原区不同植物群落蒸蒸发蒸腾的研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 319 - 328
- [18] 王笑影. 农田蒸散估算方法研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(2): 81 - 84
- [19] 赵炳祥,陈佐忠,胡林. 等. 草坪蒸散发研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 148 - 157
- [20] 王积强,李国振. 土壤水分不停运动和转化不存在零通量面(一)[J]. 干旱区地理, 1992, 15(3): 92 - 99
- [21] 张富仓,张一平,张君常. 温度对土壤水分保持影响的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 160 - 169
- [22] 康绍忠,刘晓明,高新科. 等. 土壤—植物—大气连续体水分传输的计算机模拟[J]. 水利学报, 1992(3): 1 - 12
- [23] 朱春来,张耀生,孙广春. 青海东部 4 种作物群落蒸散规律研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(5): 107 - 110
- [24] 黄德青,张耀生,赵新全. 等. 祁连山北坡主要草地类型的土壤水分动态研究[J]. 草业科学, 2005, 22(8): 6 - 11
- [25] 赵双喜,张耀生,赵新全. 等. 草地蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国农业气象, 2007, 28(S): 115 - 117
- [26] 宁宝英,樊胜岳,赵成章. 肃南县草原退化原因分析与分区治理对策[J]. 中国草地, 2004, 26(3): 65 - 68
- [27] 马兴祥,刘明春,尹东. 祁连山草地气候和草地资源开发利用[J]. 草原与草坪, 2000(3): 37 - 40
- [28] 李栋梁,刘洪兰. 黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 385 - 391
- [29] 李栋梁,冯建英,陈雷. 等. 黑河流量和祁连山气候的年代际变化[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 104 - 110