# 石羊河流域近 53 a 参考作物蒸散量的敏感性分析

张春玲，张 勃，周 丹，张调风，安美玲
（西北师范大学 地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

**摘 要**：利用国家气象信息中心提供的地面气候资料日值数据集，基于 FAO Penman—Monteith 公式计算了石羊河流域 4 个测站 1959—2011 年的逐日参考作物蒸散量($ET_0$)。利用敏感系数法计算了其对平均最高气温、平均最低气温、风速、平均相对湿度和日照时数的敏感系数，并分析了敏感系数的时空变化特征。结果表明，石羊河流域 $ET_0$ 对相对湿度最敏感，其次为风速和气温，而对日照时数的敏感性最低。由于气象要素分布不均，敏感系数的空间差异显著，相对湿度的敏感系数在上游祁连山区形成高值区，同时，气温在该区的敏感系数也相对较大，而风速的敏感系数在下游民勤盆地较大，日照时数的敏感系数在全区无明显差异。各气象因子的敏感系数均存在一定程度的波动，风速的敏感系数冬高夏低，气温和日照时数的敏感系数均为夏季最高，相对湿度敏感系数的绝对值持续上升在秋季达到最大。53 a来，相对湿度敏感系数波动变化，近 20 a 来其绝对值上升趋势显著，而风速、日照时数和气温的敏感系数无明显变化趋势。

**关键词**：Penman—Monteith 公式；参考作物蒸散量；敏感系数
**文献标识码**：A **文章编号**：1000-288X(2014)01-0303-04 **中图分类号**：K903

# Sensitivity Analysis of Reference Crop Evapotranspiration in Shiyang River Basin in Recent 53 Years

ZHANG Chun-ling, ZHANG Bo, ZHOU Dan, ZHANG Tiao-feng, AN Mei-ling
(*College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

**Abstract**: The sensitivity coefficients of daily reference evapotranspiration ($ET_0$) to average temperature, wind speed, relative humidity and sunshine hours in the Shiyang River basin during 1959—2011 were calculated by using Penman—Monteith equation recommended by FAO, based on daily meteorological data provided by the China Meteorological Administer. Moreover, temporal variations of the sensitivity coefficients were analyzed. Results show that relative humidity was the most sensitive factor of $ET_0$ in the Shiyang River basin, wind speed and temperature were in the second place, and sunshine hours had the lowest sensitivity. Because of climate factors contrast and significant spatial difference of the sensitive coefficients, the sensitive coefficient of relative humidity formed high value area in the upstream area of the Qilian Mountains. Meanwhile, the sensitive coefficient of temperature was relatively large. But the sensitive coefficient of wind speed was the largest in the downstream area of the Minqin basin. The sensitive coefficient of sunshine hours had no significant difference in all the areas. The sensitive coefficient of each of the meteorological factors showed a certain degree of volatility. Wind speed was high in winter, but low in summer; temperature and sunshine hours were all high in summer; and the absolute value of relative humidity continued to rise to the maximum in fall. The sensitive coefficient of relative humidity fluctuated in the past 53 years, absolute value showed a significant upward trend, but the wind speed, sunshine hours and temperature had no obvious trend in the last 20 years.

**Keywords**: **Penman－Monteith equation; reference crop evapotranspiration; sensitivity coefficient**

**收稿日期**:2013-01-23 **修回日期**:2013-04-25
**资助项目**:国家自然科学基金项目“水资源约束下的黑河流域土地利用/覆盖变化模拟研究”(40961038)；生态经济学省级重点学科(5001-021)；西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJCXGC-03-66)
**作者简介**:张春玲(1988—)，女(汉族)，甘肃省兰州市榆中县人，硕士研究生，从事区域环境与资源开发研究。E-mail:Z_CL1115@163.com。
**通信作者**:张勃(1963—)，男(汉族)，甘肃省庆阳市人，博士，教授，主要研究方向为区域环境与资源开发。E-mail:zhangbo@nwnu.edu.cn。

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部，乌稍岭以西，祁连山北麓，东南与甘肃省白银、兰州两市相连，西北与甘肃省张掖市毗邻，西南紧靠青海省，东北与内蒙古自治区接壤(36°29′—39°27′N，101°41′—104°16′E)。

石羊河流域总面积 $4.16\times10^4$ km$^2$，年径流量在河西 3 大内陆河中最小，而人口密度却最大，且远远超过联合国规定的关于干旱区合理承载量的人口标准。近 2 000 a 来，尤其是近 50 a，在气候变化和人类活动双重干扰下，石羊河流域环境逐渐恶化，引发了水资源短缺、水土流失、冰川萎缩、河川断流等一系列环境问题，使流域内原有的水热(能)平衡被打破，造成地表能量和水分的收支严重失衡，使干旱和土地沙漠化更加严重[1-3]。流域极度恶化的生态环境问题引起了国家和社会的高度重视及广泛关注。参考蒸散量是重要的水文参量之一，它直接关系到地表的能量和水量平衡[4]，在计算作物实际需水量、优化协调区域生态环境以及制定合理的灌溉计划等方面发挥着重要作用。尽管国内关于参考蒸散量的敏感性研究较多，但多在东北、华北和长江流域[5-8]。本文对石羊河流域进行分析和评价，为深入理解该地区气候变化对参考蒸散量的影响，指导生态环境的综合治理，促进该流域经济可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究数据来源于中国气象局国家气象信息中心。选取石羊河流域具有代表性的 4 个国家气象站，包括上游祁连山区乌鞘岭气象站，中游武威、永昌气象站，以及下游民勤气象站，逐日的平均最高气温、平均最低气温、平均相对湿度、日照时数和平均风速观测数据。为保证数据的利用率，对参与计算 $ET_0$ 的逐日气温、风速、日照时数和相对湿度等资料的缺测值进行线性插补，建立了 1959—2011 年长时间序列的气象因子。

### 1.2 研究方法

1.2.1 *参考蒸散量的计算方法* 采用 FAO 推荐的 Penman—Monteith 公式[9]，它以水分扩散理论和能量平衡为基础，考虑植被生理特征的同时，综合了空气动力学和辐射项，具有较好的理论依据，其优势得到普遍认可，被国内外众多学者应用。表达式如下：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(E_s-E_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \quad (1)$$

式中：$ET_0$——参考作物蒸散量(mm/d)；$\Delta$——温度随饱和水汽压变化的斜率(kPa/℃)；$G$——土壤热通量密度〔MJ/(m$^2$·d)〕，可利用相近 2 个月的平均气温推算[11]，相对于 $R_n$ 取值很小，当植被覆盖、计算步长等于或接近于 1 d 时，忽略为 0；$\gamma$——干湿表常数(kPa/℃)；$T$——日平均气温(℃)；$U_2$——2 m 高处风速(m/s)；$E_s$，$E_a$——饱和水汽压和实际水汽压(kPa)；$R_n$——净辐射〔MJ/(m$^2$·d)〕，可以结合地表反射率和其他气象条件，利用地面吸收的太阳短波辐射 $R_{ns}$〔MJ/(m$^2$·d)〕减去发射的长波辐射 $R_{nl}$〔MJ/(m$^2$·d)〕[9]计算得出：

$$R_n=R_{ns}-R_{nl} \quad (2)$$

Yin 等[10]建立了适用于中国净短波辐射的经验公式，并指出利用 Penman 修正式[11]计算中国净长波辐射更为准确，即：

$$R_{ns}=(1-\alpha)〔0.2+0.79(n/N)〕R_a \quad (3)$$

$$R_{nl}=\sigma\left(\frac{T_{\max,k}^4+T_{\min,k}^4}{2}\right)(0.56-0.25\sqrt{E_a})\cdot〔0.1+0.9\left(\frac{n}{N}\right)〕 \quad (4)$$

式中：$\alpha$——地表反照率(%)；$n$——日照时数(h/d)；$N$——可照时数(h/d)；$R_a$——大气顶层的太阳辐射〔MJ/(m$^2$·d)〕；$\sigma$——波尔兹曼常数〔$4.903\times10^{-9}$ MJ/(K$^4$·m$^2$·d)〕；$T_{\max}$，$k$ 和 $T_{\min}$，$k$——最高绝对气温和最低绝对气温(℃)。

1.2.2 *敏感性分析及敏感系数* 敏感性分析法是定量描述模型参数对输出结果重要程度的方法[12]，主要包括敏感曲线法和敏感系数法。其中敏感系数法是由 McCuen 等[13-14]1974 年提出的一种用数学定义的敏感性分析方法。利用参考作物蒸散量与单个气象因子的相对变化量之比计算[14]，其意义与数学中的偏导数类似，结果直观、意义明确，在研究中得到广泛应用[5-7,15]。考虑到 Penman—Monteith 模型中各气象因子的相对大小及单位有差异，这里采用无量纲化的相对敏感系数[13,16]。

$$S_{X_i}=\frac{\partial ET_0}{\partial X_i}\cdot\frac{|X_i|}{ET_0} \quad (5)$$

式中：$X_i$——气象要素($i$ 取 1～5，分别代表平均相对湿度、平均风速、日照时数、平均最高气温和平均最低气温)；$S_{Xi}$——$ET_0$ 对各气象要素的敏感系数，由于该相对敏感系数无量纲，故可直接用于比较各气象要素对 $ET_0$ 的影响。敏感系数的正/负，反应 $ET_0$ 变化与气象要素的变化一致/相反，其绝对值越大意味着该气象要素对 $ET_0$ 的影响越大，反之亦是。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要气象要素与 $ET_0$ 的季节平均值

石羊河流域多年平均最高温和最低温的季节差

异性最大,其次为 $ET_0$。以研究区的多年季节平均为参照值,风速呈单谷型变化,气温和相对湿度呈单峰型变化,日照时数变化不大。区域 $ET_0$ 在夏季最高达到 4.20 mm,冬季降至最低仅为 1.02 mm(表 1)。

表 1　研究区 1959－2011 年气象要素在各季节的日平均值

| 季节 | 风速/(m·s$^{-1}$) | 相对湿度/% | 日照时数/h | 最低气温/℃ | 最高气温/℃ | $ET_0$/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 春 | 3.62 | 44.51 | 8.15 | 0.13 | 13.61 | 3.21 |
| 夏 | 3.07 | 56.99 | 8.34 | 11.24 | 24.34 | 4.20 |
| 秋 | 2.78 | 57.37 | 7.55 | －0.15 | 12.52 | 1.99 |
| 冬 | 2.81 | 47.83 | 7.55 | －13.66 | －0.33 | 1.02 |

### 2.2　$ET_0$ 与各气象要素敏感系数的时空分布特征

2.2.1　$ET_0$ 的时空分布特征　由于石羊河流域中下游属于典型的大陆性干旱气候,上游属于山地气候,受流域内气候和地形等因素影响,石羊河流域的年平均 $ET_0$ 区域差异明显,从上游至下游逐渐增大(图 1)。上游的祁连山区海拔较高,年 $ET_0$ 约为 686～843 mm,中游的武威盆地和永昌盆地分别在 845～1 070和 910～1 087 mm,下游民勤盆地约为 1 030～1 213 mm。除冬季外,各季节 $ET_0$ 整体均呈南少北多的特征,春季上游多年均值约为 220 mm,中游约 300 mm,下游约 350 mm;夏季上游约 288 mm,中游约 386 mm,下游约 470 mm;秋季上游约 151 mm,中游约 183 mm,下游约 209 mm;冬季上游约95 mm,中游约 90 mm,下游约 94 mm。在同一区域,季节 $ET_0$ 表现为秋冬最少,夏季最多,春季次之,这与刘明春[17]研究的参考蒸散量分布特征较为一致。

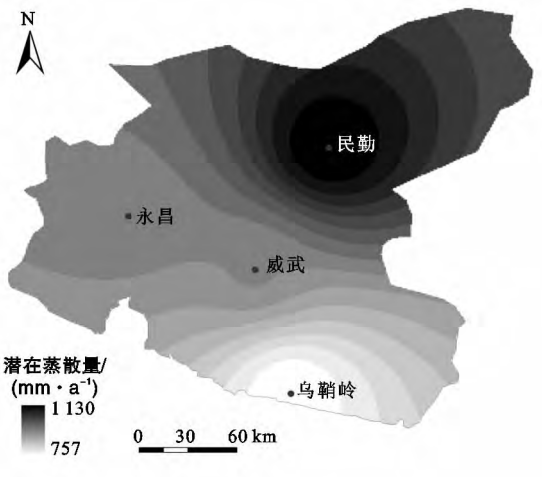



图 1　石羊河流域 1959－2011 年平均参考蒸散量的空间分布特征

2.2.2　敏感系数的空间分布特征　由表 2 可以看出,石羊河流域 $ET_0$ 对风速、日照时数、最低气温和最高气温的变化呈正敏感,对相对湿度的变化呈负敏感。其中,相对湿度敏感系数的绝对值最大,表明 $ET_0$ 对相对湿度的变化最敏感;其次是最高气温和风速,日照时数与最低气温敏感系数的绝对值最小。这与梁丽乔等[6]和 Gong 等[5]对松嫩平原西部和长江流域所得研究结果一致,而与刘小莽等[8]和曾丽红等[7]对海河流域和东北地区所得研究结果不同,说明各区域间不同气候特点导致的 $ET_0$ 变化对同一气象要素变化的敏感性存在差异。由于区域内具有不同的地形特点和气候特征,$ET_0$ 对各气象因子的敏感性大小在 4 个站点间也略有差别。武威县、民勤县相对湿度的绝对值与最高气温相近,表明在这两个地区 $ET_0$ 对最高气温的敏感性与相对湿度无显著差异,乌鞘岭和永昌相对湿度的绝对值远大于最高气温的绝对值,说明这两个区 $ET_0$ 对相对湿度的敏感性超过了最高气温。

表 2　1959－2011 年石羊河流域 $ET_0$ 对各气象因子敏感系数的日平均值

| 区域 | 风速 | 相对湿度 | 日照时数 | 最低气温 | 最高气温 |
|---|---|---|---|---|---|
| 乌鞘岭 | 0.17 | －0.95 | 0.09 | 0.12 | 0.21 |
| 武威 | 0.23 | －0.28 | 0.11 | 0.06 | 0.27 |
| 永昌 | 0.25 | －0.45 | 0.10 | 0.07 | 0.28 |
| 民勤 | 0.32 | －0.33 | 0.10 | 0.06 | 0.31 |
| 全区 | 0.24 | －0.50 | 0.10 | 0.08 | 0.27 |

$ET_0$ 与风速、日照时数、最高气温和最低气温的变化方向一致,随风速、日照时数、最高气温和最低气温的增加而增加;$ET_0$ 与相对湿度的变化相反,随相对湿度的增加而减小。敏感系数绝对值的大小表明,$ET_0$ 对相对湿度的变化最为敏感,其次是最高气温和风速,对日照时数和最低气温变化的敏感性最低。即,在石羊河流域相对湿度是 $ET_0$ 的主要控制因子,相对湿度发生 10%的变化可能引起 $ET_0$ 发生高达 5%的变化。总的来讲,最高气温和风速的敏感系数都在流域下游的民勤盆地形成高值区,相对湿度(绝对值)和最低气温的敏感系数则在流域上游祁连山区形成高值区,相对湿度(绝对值)敏感系数在流域中游形成低值区,而最低气温敏感系数在中下游无明显差异,说明在流域内蒸散发对各气象要素变化的敏感性存在区域差异。

2.2.3　敏感系数的季节分布特征　区域多年的风速、相对湿度、日照时数、最低气温和最高气温的敏感系数在春季、夏季、秋季、冬季的平均值见表 3。

表 3 1959—2011 年石羊河流域的各气象因子敏感系数在各季节的日平均值

| 季节 | 风速 | 相对湿度 | 日照时数 | 最低气温 | 最高气温 |
|---|---|---|---|---|---|
| 春季 | 0.21 | −0.41 | 0.16 | 0.06 | 0.29 |
| 夏季 | 0.16 | −0.46 | 0.24 | 0.08 | 0.39 |
| 秋季 | 0.25 | −0.62 | 0.07 | 0.05 | 0.26 |
| 冬季 | 0.35 | −0.53 | −0.07 | 0.12 | 0.13 |

从图 2 可以看出，各气象变量的敏感系数在季节间均存在一定程度的波动，这与其他学者的研究结果一致[5,18]。日照时数敏感系数的变化波动最大，其次是最高气温、相对湿度和风速的敏感系数，最低气温敏感系数的变化波动最为平缓。最高气温和日照时数的敏感系数呈单峰型分布，在夏季达到最高值，表明 $ET_0$ 对最高气温和日照时数变化的敏感性在夏季最高；风速的敏感系数呈单谷型分布，在夏季达到最低值，表明 $ET_0$ 对风速变化的敏感性在夏季最低；相对湿度敏感系数的绝对值从春季至秋季（平均值）表现为持续上升趋势，冬季有所下降，但仍高于夏季，表明 $ET_0$ 对相对湿度的变化在秋季最为敏感，在春季敏感性最低；最低气温敏感系数波动平缓，在冬季达到最大值，表明 $ET_0$ 对最低气温变化的敏感性在冬季最高。

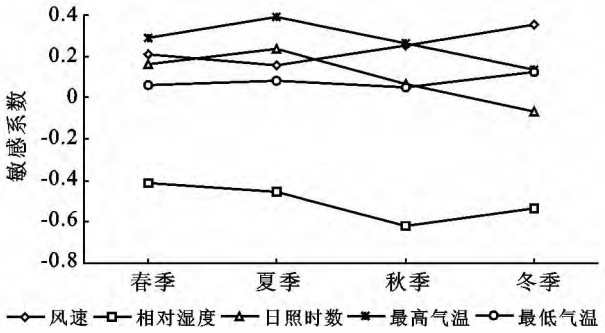



图 2 石羊河流域平均季节敏感系数的变化趋势

## 3 结论

本文基于 FAO 推荐的 Penman—Monteith 模型，结合 ArcGIS 反距离权重插值方法，分析了近53 a 来石羊河流域参考作物蒸散量的时空变化特征，同时根据敏感性分析，揭示了参考蒸散量对各气象要素变化的敏感性。

（1）石羊河流域年 $ET_0$ 南北差异明显，从南至北呈增大趋势。上游的祁连山区海拔较高，年 $ET_0$ 约在 686～843 mm，中游的武威和永昌分别在 845～1 070和 910～1 087 mm，下游民勤地区的年 $ET_0$ 约在 1 030～1 213 mm。各季节 $ET_0$ 亦呈南少北多的特征，同一区域，参考蒸散量在夏季最大，春季次之，秋冬最少。参考蒸散量的变化在空间均表现为波动中略有增加。

（2）流域内 $ET_0$ 对相对湿度的变化最为敏感。即，相对湿度是控制 $ET_0$ 变化的主要因子。近 53 a 区域平均的相对湿度敏感系数为−0.50，即当相对湿度增加（降低）10%时，参考蒸散量降低（增加）5%；其次是最高气温和风速，敏感系数分别约为 0.27，0.24；$ET_0$ 对日照时数和最低气温的敏感性最低，敏感系数分别为 0.10 和 0.08。

（3）季节上，敏感系数均存在一定程度的波动，日照时数敏感系数的变化波动最大，其次是最高气温、相对湿度和风速的敏感系数，最低气温敏感系数的变化波动最为平缓。最高气温和日照时数的敏感系数呈单峰型分布，夏季达到最高值；风速的敏感系数呈单谷型分布，在夏季达到最低值；最低气温敏感系数波动平缓，冬季达到最大值。

（4）空间上，流域内受局部气候和地形等因素的影响，各气象变量敏感系数的空间差异性较大。最高气温和风速的敏感系数都在流域下游的民勤盆地形成高值区，相对湿度（绝对值）和最低气温的敏感系数则在流域上游祁连山区形成高值区，相对湿度（绝对值）敏感系数在流域中游形成低值区，而最低气温敏感系数在中下游无明显差异。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 秦大河. 中国西部环境演变评估：综合卷[M]. 北京：科学出版社，2002：73-78.

[2] Zhang Qiang, Song Lianchun, Huang Ronghui. The bulk transfer coefficients of the atmospheric momentum and sensible heat over desert and Gobi in arid climate region of Northwest China[J]. Sci. China: Series D, 2002,45(5):468-480.

[3] Zhang Qiang, Song Lianchun, Huang Ronghui.. Characteristics of hydrologic transfer between soil and atmosphere over Gobi near oasis at the end of summer[J]. Adv. Atmos. Sci., 2003,20(3):442-452.

[4] 梁丽乔，闫敏华，邓伟，等. 松嫩平原西部参考作物蒸散量变化过程[J]. 地理科学进展，2006，25(3)：22-31.

[5] Gong Lebing, Xu Chongyu, Chen Deliang. Sensitivity of the Penman—Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang basin[J]. Journal of Hydrology, 2006,329(3/4):620-629.

[6] 梁丽乔，李丽娟，张丽，等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. 农业工程学报，2008，24(5)：1-5.

（下转第 310 页）

种子萌发需要充足的氧气，以保证其强呼吸作用。在高 $CO_2$ 浓度下，会使种子萌发环境 $O_2$ 浓度降低，但在一定范围内仍能满足一般种子萌发的正常需要，另外，在自然情况下，土壤空气中本身 $CO_2$ 浓度是很高的[7]，种子在土壤中萌发时，其 $CO_2$ 浓度可能也较高，这些似乎可以解释在高 $CO_2$ 浓度下，对种子的发芽率不会产生显著影响。

刘大永等[8]研究表明，高浓度 $CO_2$ 下，会使种子中过氧化氢酶(CAT)活性、酸性磷酸酯酶活性增强，这两种酶在种子萌发期间会释放 $O_2$，增加种子活力，同时与种子代谢直接相关的 ATP 含量也相应增加，这似乎可以解释高浓度 $CO_2$ 对种子的发芽势有明显的促进作用。

另外，据刘存德等[9]研究，不同作物种子萌发对 $O_2$ 的需求不同，例如 5%的 $O_2$ 即可满足水稻种子的萌发，但小麦可能需要更多的 $O_2$ 才能保证种子的正常萌发。虽然不同 $C_4$ 作物在高浓度 $CO_2$ 条件下发芽率和发芽势的变化具有一定的规律性，但这似乎可以解释各 $C_4$ 作物分别在不同的 $CO_2$ 浓度下其发芽率、发芽势达到最大值。但是，高浓度 $CO_2$ 下对种子萌发影响的机理还有待于进一步研究。

[ 参 考 文 献 ]


[1] Working Group Ⅲ of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[M]. Cambridge: Cambridge Univefsity Press, 2005.

[2] IPCC. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[R]. Geneva: IPCC, 2005.

[3] 刘兰翠，曹东，王金南. 碳捕获与封存技术潜在的环境影响及对策建议[J]. 气候变化研究进展，2010，6(4)：290-296.

[4] 刘建利. $CO_2$ 对蒺藜状苜蓿种子萌发的影响[J]. 种子，2009，28(12)：10-13.

[5] 陈章和，林丰平，张德明. 高 $CO_2$ 浓度下 4 种豆科乔木种子萌发和幼苗生长[J]. 植物生态学报，1999，23(2)：161-170.

[6] 高素华，郭建平，毛飞，等. $CO_2$ 浓度升高对植物种子萌发及叶片的影响[J]. 资源科学，2000，22(6)：18-21.

[7] 曲仲湘，吴玉树，王焕校，等. 植物生态学[M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，1983.

[8] 刘大永，刘庆全，梁颖. 大气中 $CO_2$ 含量对水稻种子萌发和幼苗生长的生理效应[J]. 西南农业大学学报，1996，18(4)：343-345.

[9] 刘存德，沈全光，梁峥，等. $O_2$ 和 $CO_2$ 浓度对水稻和小麦种子萌发过程中同工酶的影响[J]. 植物学报，1981，23(5)364-369.


(上接第 306 页)


[7] 曾丽红，宋开山，张柏，等. 东北地区参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析[J]. 中国农业气象，2010，31(1)：11-18.

[8] 刘小莽，郑红星，刘昌明，等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 资源科学，2009，31(9)：1470-1476.

[9] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.

[10] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zheng Du, et al. Radiation calibration of FAO 56 Penman—Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(1): 77-84.

[11] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London (Series A): Mathematical and Physical Sciences, 1948, 193(1032): 120-146.

[12] 蔡毅，邢岩，胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报：自然科学版，2008，44(1)：9-16.

[13] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. Water Resource Bulletin[J]. 1974, 10(3): 486-498.

[14] Beven K. A sensitivity analysis of the Penman—Monteith actual evapotranspiration estimates. Journal of Hydrology[J]. 1979, 44(3/4): 169-190.

[15] 曹雯，申双和，段春锋. 西北地区近 49 年生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 中国农业气象，2011，32(3)：375-381.

[16] Coleman G, DeCoursey D G. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models[J]. Water Resource Research, 1976, 12(5): 873-879.

[17] 刘明春. 石羊河流域气候干湿状况分析及评价[J]. 生态学杂志，2006，25(8)：880-884.

[18] Hupet F, Vanclooster M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology, 2001, 24(3): 192-204.