

内蒙古东部牧区缺测数据条件下适宜 ET_0 计算方法优选

石明宇

(内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 内蒙古东部牧区多地处偏远边疆,气象站点有限,应用 FAO56 Penman - Monteith 计算 ET_0 相对困难。为了在缺测气象数据条件下准确计算 ET_0 , 本文依据该区内典型气象站点资料,以 FAO56 Penman - Monteith 为标准方法,以 FAO17 Penman, Priestley - Taylor, Irmark - Allen 拟合法、Hargreaves - Samani 法为对照方法分别对 ET_0 进行计算,并对 4 种方法适用性进行评价。结果表明: Priestley - Taylor 与 Hargreaves - Samani 法计算值较 FAO56 PM 法计算结果偏大,不适于该地区 ET_0 计算。FAO17 Penman 法和 Irmark - Allen 拟合法与 FAO56 PM 法计算结果平均相对误差小于 15%, 计算精度较高,但 Irmark - Allen 拟合法仅需气温和日照时间气象资料,因此, Irmark - Allen 拟合法适宜缺测气象条件下内蒙古东部牧区 ET_0 计算。

关键词: ET_0 计算方法; 气温; 日照时间; Irmark - Allen 方法; 方法优选; 内蒙古东部牧区

中图分类号: S274 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)02-0232-05

Optimal selection of ET_0 calculation methods under condition of lack of measured data in eastern mongolia pastoral areas

SHI Mingyu

(Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China)

Abstract: Many regions in eastern pastoral areas of Inner Mongolia locate in far distance and have limited meteorological stations, the calculation of ET_0 in application of FAO56 Penman - Monteith formula is relative difficult. In order to calculate ET_0 accurately under the condition of lack of meteorological data, the paper relied on data of typical meteorological stations, and took FAO56 Penman - Monteith as standard method, took methods of FAO17 Penman, Priestley - Taylor, Irmark - Allen fitting and Hargreaves - Samani as comparative method to compute ET_0 , and evaluated the applicability of the four methods. The results show that the values calculated by methods of Priestley - Taylor and Hargreaves - Samani are greater than that by FAO56 Penman - Monteith method, and are not suitable for the region. FAO17 Penman method and Irmark - Allen method got approximated calculation results whose relative error is less than 15% and had great accuracy. However, Irmark - Allen method need only meteorology data such as air temperature and sunshine time. Therefore, Irmark - Allen method is suitable for eastern pastoral areas of Inner Mongolia to calculate ET_0 with lack of meteorological data.

Key words: ET_0 calculation method; temperature; sunshine; Irmark - Allen method; optimal selection of ET_0 calculation methods; eastern pastoral areas in Inner Mongolia

计算作物需水量是农业灌溉设计和节水规划中必不可少的内容,计算作物需水量的关键是参考作物腾发量的计算。由于 FAO56 Penman - Monteith 公式较全面地考虑了影响蒸发面蒸散的各种因素,并在气候条件差异较大的不同地区的应用中取得了

较好的结果,在近年来的研究中,国际上一致推荐采用 FAO56 Penman - Monteith 方法作为计算参考作物腾发量的近似式^[1-6]。但是 FAO56 Penman - Monteith 法计算 ET_0 需要非常详尽的气象资料,而许多地区气象资料往往有限,利用少量气象资料准确计算

ET_0 受到众多学者关注^[7-16]。内蒙古东部牧区多地处偏远边疆,气象站点有限,应用 FAO56 Penman - Monteith 计算 ET_0 相对困难,为此,本文依据该区内典型气象站点资料,以 FAO56 Penman - Monteith 为标准方法,以 FAO17 Penman、Priestley - Taylor、Irmak - Allen 拟合法、Hargreaves - Samani 法为对照方法分别对 ET_0 进行计算,分析各对照方法在该地区的适用性,寻求缺测气象数据条件下 ET_0 适宜精准计算方法,为内蒙古东部牧区牧草需水量计算与灌溉制度制定提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文的计算参数包括,内蒙古东部牧区巴林左旗、翁牛特旗、新巴尔虎右旗气象站点 2013-05-01 - 09-30 逐日 2 m 处风速、最高温度、最低温度以及相对湿度、日照时间和降雨量。本文所有数据均来自于中国气象数据中心。

1.2 潜在腾发量 ET_0 计算方法

FAO 对参考作物腾发量 ET_0 (Reference Evapotranspiration) 进行了重新定义(1990):假设作物高度为 0.12 m,并且有固定的地表阻力 $y = 70$ s/m 和反射率 $\alpha = 0.23$ 的假想参考作物的腾发率。相当于高度均一、生长旺盛、完全覆盖地面并不缺水的开阔绿草地的腾发量。

(1) FAO56 Penman - Monteith 公式(FAO56 PM 法)。根据重新定义的 ET_0 概念,FAO 提供了新的 ET_0 计算式,即 FAO56 Penman - Monteith 公式:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为参考作物腾发量, mm/d; R_n 为冠层表面净辐射, MJ/(m² · d); G 为土壤热通量, MJ/(m² · d); T 为平均气温, °C; u_2 为高度 2.0 m 处风速, m/s; e_s 为饱和水汽压, kPa; e_a 为实际水汽压, kPa; Δ 为饱和水汽压温度曲线的斜率, kPa/°C; γ 为湿度计常数, kPa/°C。

(2) FAO17 Penman 法。Penman 公式是国内外应用最普遍的综合公式,它在能量平衡法的基础上引用干燥力的概念,经过简捷的推导,得到了一个用普通气象资料就可计算参考作物潜在腾发量的公式。目前,国内外计算参考作物潜在腾发量大多仍采用 1979 年联合国粮农组织推荐的彭曼修正式(FAO17 PM 法),尽管在计算中都试图将一些参数

修正,但结果仍表现出明显的不确定性。该方法需要气温、相对湿度、日照时数、风速资料。

$$ET_{0p} = \frac{\frac{p_0}{p}(a_1 + b_1 u_2)(e_s - e_a) + \frac{\Delta}{\gamma} R_n}{\frac{p_0}{p} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0} \quad (2)$$

式中: ET_{0p} 为 FAO17 Penman 法得到的 ET_0 , mm/d; p_0 为海平面气压, hPa; p 为本站气压, hPa; $a_1 = 0.26$, $b_1 = 0.14$; 其他物理量意义与公式(1)相同。

(3) Priestley - Taylor 法。Priestley - Taylor 法(PT 法)是 Priestley - Taylor(1972)以平衡蒸发为基础,假设周围环境湿润的前提下,忽略空气动力学项而得出的简化方程,通过引进常数 α , 导出了估算无平流条件下蒸发的模式,即 Priestley - Taylor 模式,利用海面和湿润陆面的资料得出 $\alpha = 1.25$ 。该方法由于需要输入参数较少而得到广泛应用,该方法需要气温、日照时数、地理位置等资料。

$$ET_{0PT} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (3)$$

式中: ET_{0PT} 为应用 Priestley - Taylor 法所得的 ET_0 , mm/d; α 值为经验系数,一般取 1.26; 其他物理量意义与公式(1)相同。

(4) Irmak - Allen 拟合法。Irmak - Allen 法(IA 法)根据美国湿润地区资料,得到的经验公式 Irmak - Allen 拟合公式,该方法需要气温、日照时数、地理位置资料。

$$ET_{0IA} = 0.489 + 0.289R_n + 0.023T \quad (4)$$

式中: ET_{0IA} 为应用 IA 拟合法所得的 ET_0 , mm/d; 其他物理量意义与公式(1)相同。

(5) Hargreaves - Samani 法。Hargreaves - Samani 法(HS 法)是 Hargreaves 和 Samani 根据美国西北部较干旱气候的加利福尼亚州 8 a 的牛毛草蒸渗仪数据推导出了基于温差来反映辐射项的参考作物蒸发蒸腾量计算公式,该方法在缺少辐射资料的地区得到广泛的应用,并被证明是一种有效的估算方法,该方法只需要气温和地理位置数据。

$$ET_{0HS} = 0.023R_a (T + 17.8) TD^{0.5} \quad (5)$$

式中: ET_{0HS} 为应用 HS 法所得的 ET_0 , mm/d; TD 为最高与最低气温之差, °C; R_a 为天顶辐射, MJ/(m² · d), 可由温度估算得到; 其他物理量意义与公式(1)相同。

2 结果与分析

2.1 不同方法计算 ET_0 的结果

选取内蒙古东部牧区, 3 个典型气象站点 2013-

05-01 - 09-30 气象资料分别应用 5 种方法计算逐日 ET_0 。部分计算结果统计见表 1, 全部计算结果见图 1 ~ 3。

表 1 不同方法计算所得 ET_0 月累计值

典型地区	月份	FAO56	FAO17	PT 法	IA 法	HS 法
		PM 法	PM 法			
新巴尔虎右旗	5	158.82	202.11	309.13	138.55	345.73
	6	143.68	167.80	351.47	146.22	343.74
	7	149.26	178.01	384.15	154.55	377.87
	8	121.15	153.54	311.03	132.65	298.15
	9	97.11	108.05	196.92	99.12	218.84
翁牛特旗	5	214.21	236.72	343.23	145.65	395.12
	6	173.56	204.42	360.64	146.09	397.15
	7	179.26	221.34	411.68	160.33	406.34
	8	153.82	162.60	343.85	140.31	368.05
	9	122.45	116.55	221.55	104.56	248.65
巴林左旗	5	184.03	186.51	350.72	147.23	408.32
	6	152.94	168.89	374.75	150.26	396.65
	7	156.41	183.44	412.69	160.59	389.71
	8	142.53	153.43	341.88	139.49	363.28
	9	106.23	99.52	226.10	106.05	263.72

由于不同方法计算 ET_0 所需的参数具有差异, 因此 ET_0 的计算结果也不尽相同。从图 1 ~ 3 中可以较明显的看出, 虽然不同方法计算的结果在数值上具有一定差异性, 但是各种方法计算结果的变化趋势基本相同。

从总体上看, FAO56 Penman - Monteith 法与 FAO17 Penman 法和 IA 拟合法在大部分时间段的计算结果较为接近, 个别时间段有微小偏差, 在作物全生育期内 FAO17 Penman 法和 IA 拟合法的相对误差均控制在 15% 以内。FAO17 Penman 法与 FAO56 PM 法相比, 其计算结果在 6、7 月份的计算值相较后者的计算结果略微偏大, 但是在其它月份计算结果与 FAO56 PM 法基本保持一致; IA 拟合法与 FAO56 PM 法的计算结果相对比, 在全生育期初期 5 月上旬 - 6 月上旬, 其计算结果与 FAO56 PM 法相比较偏小, 而在之后的时间里两种方法计算值没有明显偏差, 误差值较小, 并且 IA 拟合法作为线性拟合公式, 其计算结果比较稳定, 随气象因子的变化, 结果在数值上变幅较小, 该结果与参考文献[5]的研究结果相类似。虽然 PT 法与 HS 法计算 ET_0 的结果和 FAO56 PM 计算值的总体变化趋势相同, 但是其计算值总体偏大, 而且偏差数值较大。

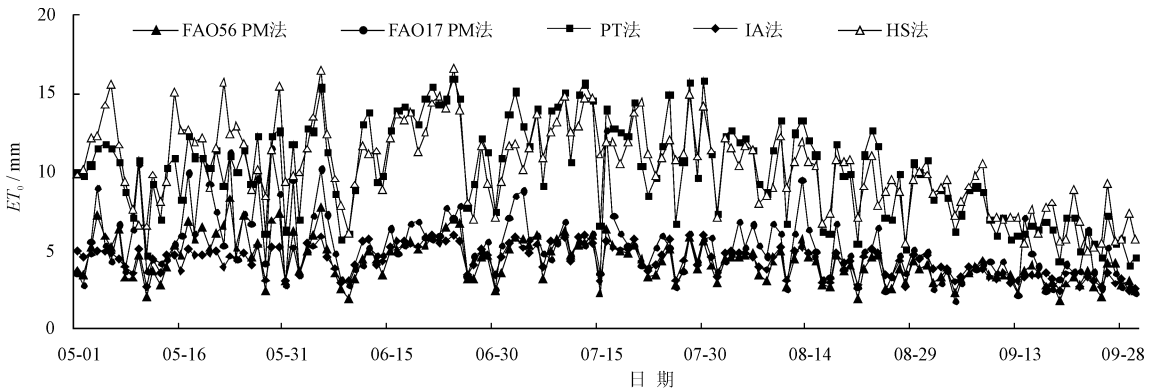


图 1 新巴尔虎右旗不同方法计算的逐日 ET_0 结果图(2013 年)

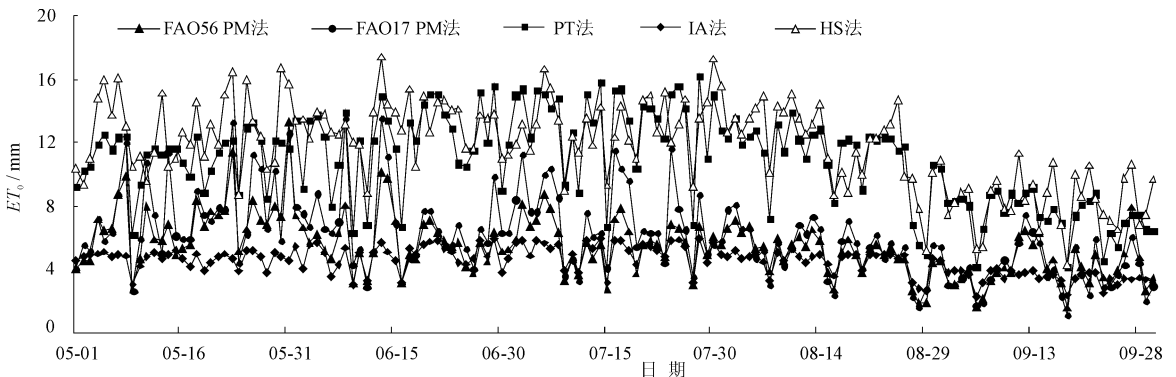


图 2 翁牛特旗不同方法计算的逐日 ET_0 结果图(2013 年)

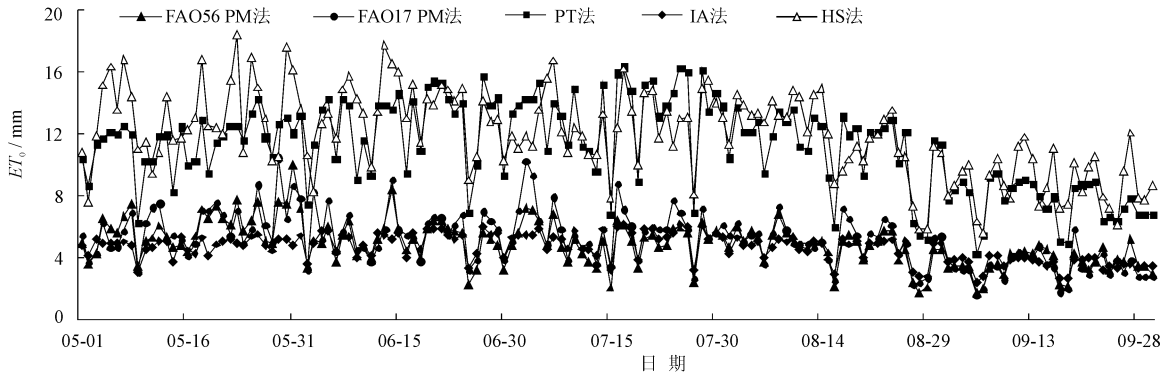


图 3 巴林左旗不同方法计算的逐日 ET_0 结果图(2013 年)

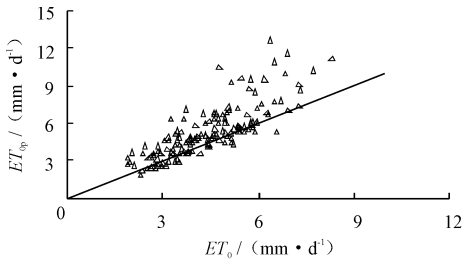
2.2 不同方法计算结果偏差及其分析

将 FAO56 PM 法计算的结果作为标准 ET_0 , 分别对新巴尔虎右旗、翁牛特旗、巴林左旗 3 个典型地区其它 4 种方法的计算结果与 FAO56 PM 法的计算结果进行拟合, 全生育期拟合点的平均偏差值见表 2。由于篇幅所限, 本文仅将新巴尔虎右旗不同方法与 FAO56 PM 法计算结果的拟合图列出, 结果如图 4 所示。从图 4a 中可以看出, FAO17 Penman 法计算的 ET_0 结果与 FAO56 PM 法计算的值有较好的相关性, 但有部分计算结果偏大, 总体来说拟合点比较均匀的分布在直线 $y = x$ 两侧, 其拟合点平均偏差在 15% 以内。图 4c 中 IA 拟合法与 FAO56 PM 法计算结果的拟合点有部分计算值相比较 FAO56 PM 法偏小, 但同样基本位于直线 $y = x$ 的两侧, 其拟合点平均偏差同样控制在 15% 以内。图 4b 和 4d 中 HS 法和 PT 法的计算结果与 FAO56 PM 法计算结果的

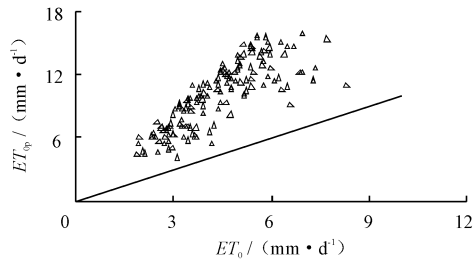
拟合点比较离散, 大多数值偏大, 其原因主要在于这两种方法将温差作为主要考虑的气象因子, 而内蒙古东部牧区昼夜温差大, 以典型计算区为例, 2013 年 5-9 月日平均温差在 12°C 以上, 导致计算的结果具有较大差异性。4 种方法计算的逐日 ET_0 与 FAO56 Penman - Monteith 计算结果间的误差主要是由于各种方法考虑不同的气象因子或同一气象因子对不同方法影响的显著程度不同而造成, 表 3 给出计算时段内不同气象因子的日均变化。

表 2 不同方法与 FAO56 PM 法计算结果平均偏差 %

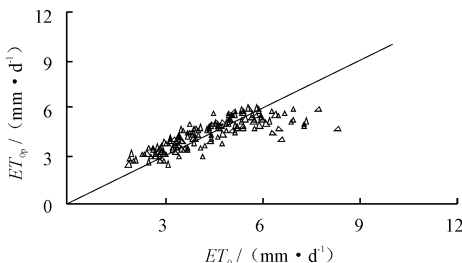
典型地区	FAO17 Penman 法	Priestley - Taylor 法	Irmak - Allen 拟合法	Hargreaves - Samani 法
新巴尔虎右旗	14.71	135.19	12.42	144.60
翁牛特旗	13.30	109.34	13.56	128.70
巴林左旗	12.90	135.85	14.60	155.04



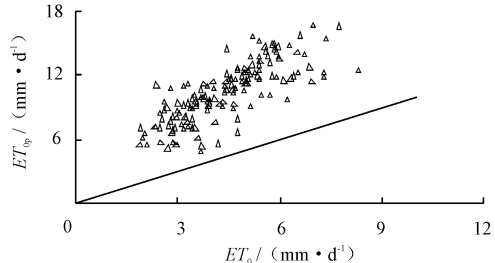
(a) 与FAO17 PM法比较



(b) 与PT法比较



(c) 与IA拟合法比较



(d) 与HS法比较

图 4 新巴尔虎右旗 FAO56 Penman - Monteith 与其它方法计算结果比较

表3 内蒙东部牧区2013年5-9月气象因子日均值

典型地区	日照时数/h	日均温差/°C	日均湿度/%	日均风速/(m·s ⁻¹)	日均降雨/(mm·d ⁻¹)
新巴尔虎右旗	8.84	12.02	57.83	2.65	1.89
翁牛特旗	9.69	13.12	50.01	2.81	1.55
巴林左旗	9.45	13.19	55.90	2.07	2.44

FAO17 Penman 法与 FAO56 PM 法均由辐射项和空气动力项组成,但是二者计算方式不同,造成两者产生相对误差,FAO17 Penman 法计算结果相比 FAO56 PM 法较大的主要原因是前者没有将土壤热通量的影响考虑在内,另外辐射变化及风速也是引起偏差的原因。

PT 法没有将风速的影响考虑在内,另外 PT 法中将 α 看作常数也是产生偏差的原因之一,内蒙古东部牧区 5-9 月日平均风速大于 2 m/s,使得其计算结果偏大。同理,由于该法没有考虑相对湿度的影响,但是 5-9 月日平均相对湿度超过 50%,也是造成该法计算结果明显大于 FAO56 PM 法的原因。

IA 拟合法主要考虑净辐射与气温对 ET_0 的影响,因此该法计算结果产生偏差的主要原因在于风速与相对湿度;另外,IA 拟合法作为线性拟合公式,其计算结果比较稳定,结果在数值上变幅较小,因此 IA 拟合法与 FAO56 PM 法计算结果偏离较小;最后由于两方法考虑的辐射项不同,计算结果的偏差随着辐射的减小而减小,由此可知 FAO56 PM 法计算值随辐射减小的程度相比 IA 拟合法更明显。

HS 法主要考虑了温度的影响,虽然也有辐射项但是采用的是天顶辐射,这导致该方法计算结果偏大。HS 法计算值所产生的偏差随着温差的增大而增大;另外,HS 法没有将相对湿度对 ET_0 的影响因素考虑在内,所以在相对湿度较大时,会导致该法计算值更加偏大。

从以上分析可以看出,对作物生长期风速较大,日夜温差变化显著,并且随生育期相对湿度逐渐增加的内蒙古东部牧区,FAO17 Penman 法和 IA 拟合法与 FAO56 PM 法计算结果较为接近,并且 FAO17 Penman 法与 FAO56 PM 法适用条件基本相近,IA 拟合法所需要的气象资料仅为气温和日照时间,并且计算结果有较高精度。

3 结 语

(1)5 种方法计算结果变化趋势类似,但不同方

法的计算值在不同时期差异明显。以 FAO56 PM 法计算结果作为标准,与其它 4 种方法进行比较发现,应用 FAO17 Penman 法计算的 ET_0 值与 FAO56 PM 法计算的结果有较好的一致性, ET_0 值略大于 FAO56 PM 法计算结果,日均相对误差小于 15%,结果差异性较小,该方法适用于该地区的 ET_0 计算。

(2)IA 拟合法的计算结果与 FAO56 PM 法的计算结果很接近,日均相对误差小于 15%,且其所需气象数据较少,计算方法简便,适用于内蒙古东部牧区缺测数据条件下 ET_0 计算。

(3)HS 法的计算结果比 FAO56 PM 法的计算结果大多数值偏大,适用于在温差和相对湿度较小地区 ET_0 计算;PT 法由于没有考虑风速和相对湿度的影响,造成该地区计算结果偏差较大,不适宜昼夜温差变化显著的内蒙东部牧区的 ET_0 计算。

参考文献:

- [1] 彭世彰,徐俊增.参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J].灌溉排水学报,2004,23(6):5-9.
- [2] 李玉霖,崔建垣,张铜会.参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J].中国沙漠,2002,22(4):372-376.
- [3] 谢平,陈晓宏,刘丙军.湛江地区适宜参考作物蒸发蒸腾量计算模型分析[J].农业工程学报,2008,24(5):6-9.
- [4] 孙庆宇,佟玲,张宝忠,等.参考作物蒸发蒸腾量计算方法在海河流域的适用性[J].农业工程学报,2010,26(11):68-72.
- [5] 闫浩芳,史海滨,薛铸,等.内蒙古河套灌区 ET_0 不同计算方法的对比研究[J].农业工程学报,2008,24(4):103-106.
- [6] 郑汐,王齐,孙吉雄.深圳地区参考作物蒸散量计算方法适用性分析[J].亚热带植物科学,2010,39(4):28-32.
- [7] 丁加丽,彭世彰,徐俊增,等.基于温度资料的参考作物蒸发蒸腾量计算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2007,35(6):633-637.
- [8] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等.甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J].农业工程学报,2004,20(1):99-103.
- [9] 霍再林,史海滨,陈亚新,等.内蒙古地区 ET_0 时空变化与相关分析[J].农业工程学报,2004,20(6):60-63.
- [10] 刘晓英,李玉中,王庆锁.几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J].农业工程学报,2006,22(6):12-18.
- [11] 樊军,邵明安,王全九.黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J].农业工程学报,2008,24(3):98-102.

(下转第 240 页)

面积,将新疆农业用水比例降低到一个合理值。

(2)新疆农业经济追求利益最大化。建议新疆在关注农业经济利益的同时,考虑一下新疆水资源的承载能力。

(3)灌溉水利用系数的测算工作,离开资金投入将会寸步难行。为了加大监管工作的投入力度,一方面应加强对各灌区实测单位的经费支持;一方面增加对技术支撑单位的资金投入,使技术支撑单位能够对存在问题的灌区进行实地考察、搜集灌区第一手资料,提高灌溉水利用系数的测算精度。以保护和改善新疆绿洲生态环境为前提,治理与保护相结合,发展和防御并举,使水土资源开发利用与环境保护同步,生态环境与经济效益相统一,建设一个和谐的可持续的美丽新疆。

参考文献:

- [1] 何文勤,章曙明. 合理开发利用新疆水资源发展绿洲生态农业[J]. 干旱区地理,2001,24(1):42-46.
- [2] 赵建平,阿布都热西提·阿布都外力,吴梅. 浅析和田洛浦沙漠化的影响因素:林业和水资源[J]. 水资源与水

工程学报,2010,21(5):99-101.

- [3] 李军华,杨珊珊. 新疆水资源合理开发利用与生态环境保护[J]. 环境与可持续发展,2010,35(5):30-32.
- [4] 郭勇. 新疆玛纳斯河流域水资源利用与管理[J]. 水利科技与经济,2013,19(7):81-82+86.
- [5] 王霞,何颖舟. 新疆水资源承载力探析[J]. 新疆财经大学学报,2011,(2):11-14+19.
- [6] 胡汝骥,马虹,樊自立,等. 新疆水资源对气候变化的响应[J]. 自然资源学报,2002,17(1):22-27.
- [7] 吴素芬,何文勤,胡汝骥,等. 近年来新疆盆地平原区域湖泊变化原因分析[J]. 干旱区地理,2001,24(2):123-129.
- [8] 张玉进,刘玉甫,吴健军,等. 新疆水资源分布及绿洲水资源开发利用探讨[J]. 水土保持研究,2004,11(3):157-159.
- [9] 邓铭江,李兰奇,董新光,等. 新疆水资源合理配置研究[J]. 新疆农业大学学报,2002,25(Z1):22-26.
- [10] 姚安琪,姜卉芳,何英. 玛纳斯河流域不同程度枯水年的水资源配置[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(4):86-89+94.

(上接第236页)

- [12] Cai Jiabing, Liu Yu, Lei tingwu, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman - Monteith equation using daily weather forecast messages[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007,145(1-2):22-35.
- [13] Irmak S, Iramak A, Allen R G, et al. Solar and net radiation - based equations to estimate reference in humid climates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2003,129(5):336-347.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement

[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

- [15] Irmak S, Allen R G, Whitty E B. Daily grass and alfalfa-to-grass reference evapotranspiration estimates and alfalfa - grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. Journal of Irrigation and drainage Engineering, 2003,129(5):360-370.
- [16] Smith M. The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(1):99-108.