

永定河北京段蒸散发研究

张士锋^{1,2}, 王翠翠^{1,3}, 孟秀敬^{1,3}, 华 东^{1,3}, 门宝辉⁴, 李智飞⁴

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 华北电力大学, 北京 102206)

摘 要:永定河北京段蒸散发研究对永定河生态走廊建设有着重要的支撑作用。本文采用多种方法计算了永定河北京段的水面蒸发、潜在蒸散发和实际陆面蒸散发, 结果显示: 北京段水面蒸发为 1182 mm, 潜在蒸散发为 969 mm, 1999-2009 年北京市实际蒸散发 494 mm。对各种水面蒸散发计算结果比较, 并通过相关分析和 *RMSE* 分析发现, 利用中国科学院地理研究所方法计算永定河北京段水面蒸散发较为合理, 施成熙方法、前苏联扎依可夫方法计算结果相近, 但彭曼公式结果偏大。潜在蒸散发采用 Presley-Taylor 公式, 而联合国粮农组织(FAO)修正的彭曼公式和 Hargreaves 公式结果都偏大。研究区的实际蒸散量使用傅抱璞方法计算, 结果得到了相同研究时段北京市水量平衡研究成果的验证。相比而言, 张鲁公式和 Turc 公式结果偏大, 而高桥公式所得结果与傅抱璞方法最为接近。

关 键 词: 蒸散发; 彭曼公式; Presley-Taylor 公式; 傅抱璞公式; 永定河

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.010

1 引言

北京人均水资源量在世界各国首都中排名百位之后。在 20 世纪 50-60 年代, 北京水资源供需矛盾不大, 70 年代以后, 缺水成为北京面临的严重问题之一(任宪韶, 2007; 颜昌远, 1999)。北京市为此提出, 要把永定河建设成为“生态的河”和“有水的河”。为实现这一目标, 必须保证永定河的生态需水量。但永定河生态需水量包括哪些部分, 需求量为多少, 这都需要采用科学方法计算获得。蒸散发消耗是生态需水的重要组成部分, 蒸散发研究既是水文学研究的重要课题, 也是目前水文循环各要素研究的难点, 相关科研人员提出了多种蒸散发的测定和研究方法(Hargreaves et al, 1985; Penman, 1948; Priestley et al, 1972; 宋璐璐等, 2012)。永定河北京段蒸发包括水面蒸发、湿地蒸散发、河滨带植被蒸散发等各种不同类型。准确界定永定河北京段的蒸发量, 不仅具有科学意义, 而且具有重要的现实意义。

2 数据与方法

本文主要采用中国气象局 1999-2009 年北京站气象数据, 包括日平均温度、距地面 2 m 风速、湿度等, 降水资料来自水利部 2000-2010 年中国水资源公报和北京市水资源公报。蒸发的内容主要包括水面蒸发、潜在蒸散发和实际蒸散发。

永定河北京段示意图如图 1。

2.1 水面蒸发的方法

水面蒸发的计算方法很多, 包括施成熙公式(引自沈灿桑, 1992)、彭曼公式(Penman, 1948)、前苏联扎伊科夫公式(引自沈灿桑, 1992)等; 此外彭曼公式还有不同的修正公式。中国科学院地理科学与资源研究所洪嘉琨等在研究华北平原水面蒸发的规律后, 提出水面蒸发(E_0)公式(引自沈灿桑, 1992):

$$E_0 = 0.144(1 + 0.75u_{1.5})[D + d(T_{1.5})(\alpha - 1)T_{1.5}] \quad (1)$$

式中: $u_{1.5}$ 为 1.5 m 高度风速(m/s); D 为饱和水汽压差(毫巴); $\alpha - 1$ 为温度层结调节系数; $T_{1.5}$ 为 1.5 m 处气

收稿日期: 2012-09; 修订日期: 2013-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171032); 国家重点基础研究发展计划(2012CB955304)。

作者简介: 张士锋(1965-), 男, 湖北江陵人, 副研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zhangsf@igsnrr.ac.cn

580-586 页



图1 永定河流域北京段示意图
Fig. 1 Beijing Section of the Yongding River Basin

温(℃); $d(T_{1.5})$ 为饱和水汽压斜率,单位毫巴/℃。

2.2 潜在蒸散发

在当前常用的SWAT 分布式水文模型中,包含3 种潜在蒸散发计算方法: Priestley-Taylor 公式(Pristley et al, 1972)、Penman-Monteith 公式和 Hargreaves 公式(Hargreaves et al, 1985)。目前,联合国粮农组织修正的 Penman-Monteith 公式和 Priestley-Taylor 公式应用较广(高歌等, 2006; 谢贤群等, 1991, 2007; 左大康等, 1991), Priestley-Taylor 公式计算方法如下:

$$ET_0 = 1.28 \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times (R_n - G) \tag{2}$$

式中: ET_0 为参考蒸散量(mm d^{-1}); R_n 为净辐射量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量(MJ m^{-2}); Δ 为饱和水汽压斜率($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); γ 为湿度计常数($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$)。

2.3 天然条件下的实际蒸散发

本文采用傅抱璞公式(傅抱璞, 1981)进行实际

蒸散发(E_a)的估算。其中潜在蒸散发则根据 Priestley-Taylor 公式中的假设条件得到。傅抱璞公式计算方法如下:

$$E_a = P \left\{ 1 + \frac{R_n}{LP} - \left[1 + \left(\frac{R_n}{LP} \right)^m \right]^{1/m} \right\} \tag{3}$$

式中: P 为年降水量(mm); LP 为汽化潜热(MJ kg^{-1});依据 Budyko 假设(Zhang, 2008), R_n/LP 可以用 ET_0 代替; m 的取值与气候及径流状况有关,对于山区和平原地区,取值各有不同。

3 结果与分析

3.1 计算结果

将研究区的下垫面划分为水面、水浇地、旱地、林草地和城市用地等5类,可分别计算出相应的蒸发量。

利用中科院地理研究所公式计算得到的1999-2009年平均水面蒸发结果为1182 mm,具体结果见图2。1999-2009年水面蒸发的最小和最大值分别为1095 mm和1265 mm,分别发生在2008年和2004年。

为计算水面蒸发以外的其他各种下垫面实际蒸散发,必须先计算潜在蒸散。本文分别采用Priestley-Taylor公式、Penman-Monteith的FAO修正公式(谢贤群等, 2007)、Hargreaves公式等计算得到永定河潜在蒸散量,并比较分析,最后得到1999-2009年平均潜在蒸散量为969 mm,变化幅度为896~1042 mm。

利用潜在蒸散发结果,采用傅抱璞公式计算实际蒸散发,由于不同地区下垫面条件对蒸散量影响的差异,对山丘地区和平原地区分别取值计算,平原区和山丘区 m 取值分别为2.75和2.06,得到1999-2009年北京地区的实际蒸散发(图3)。

计算得到永定河北京段山区蒸散发量为371 mm,平原地区为425 mm,对于华北地区水面、水浇地、旱地、林草地以及城市用地等分别采取的不同的作物系数,可得到以上各种下垫面的蒸发量分别

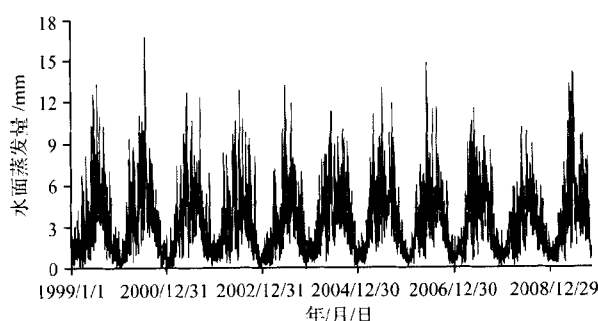


图2 永定河北京段水面蒸发计算结果

Fig. 2 The water surface evaporation result in Beijing Section of the Yongding River

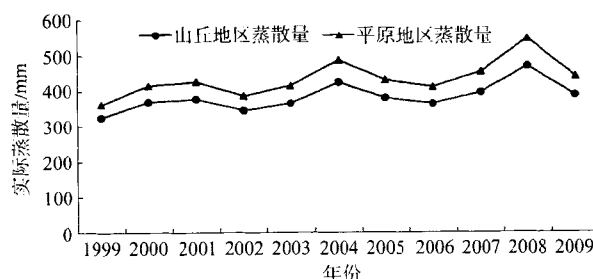


图3 永定河北京段实际蒸散发结果

Fig. 3 The actual evapotranspiration results in Beijing Section of the Yongding River

为1182、840、425、371和291 mm。采用2005年北京国土资源局土地分类资料成果估算永定河北京段土地分类比例,以上5种下垫面的土地类型的面积比例分别为4.14%、18.61%、12.66%、58.73%和5.86%。在此基础上,最后得到研究区1999-2009年实际陆面蒸散发量为494 mm。

3.2 合理性分析

3.2.1 水面蒸发结果分析与比较

水面蒸发的计算有多种方法,除中科院地理研究所提出的公式外,还有一些公式在实际工作中得到广泛使用,如施成熙公式。

施成熙基于道尔顿假设,认为水面蒸发的决定性因素是水面与大气之间的气压差,并与风速之间存在经验关系,公式如下:

$$E_0 = 0.22(e_0 - e_{1.5})\sqrt{1 + 0.32u_{1.5}^2} \quad (4)$$

式中: E_0 为水面蒸发量(mm d^{-1}); e_0 为根据水面温度求得的饱和水汽压(毫巴); $e_{1.5}$ 为水面以上1.5 m处实际水汽压(毫巴); $u_{1.5}$ 为1.5 m高度风速(m/s)。

前苏联扎依科夫公式也有类似的算法:

$$E_0 = 0.15(1 + 0.72u_2)(e_0 - e_2) \quad (5)$$

式中: E_0 为水面蒸发量(mm d^{-1}); u_2 为水面以上2 m高度风速(m/s); e_0 为根据水面温度求得的饱和水汽压(毫巴); e_2 为水面以上2 m处实际水汽压(毫巴)。

理论依据较为完备的彭曼公式既考虑动力项的作用,也考虑能量平衡项的作用,曾经也得到很好的应用。

$$E_0 = \frac{\Delta H_0 + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (6)$$

其中:

$$E_a = 0.35(e_a - e_d)(1 + 9.8 \times 10^{-3}u_2) \quad (6a)$$

$$H_0 = R_a \times (1 - r) \times (0.18 + 0.55n/N) - \sigma T_a^4(0.56 - 0.092\sqrt{e_d})(0.10 + 0.90 \times n/N) \quad (6b)$$

式中: E_a 为干燥力(mm d^{-1}); H_0 为净辐射量(mm d^{-1}); e_a 为相应于大气温度的饱和水汽压, e_d 为实际空气水汽压,单位均为 mmHg ; u_2 为2 m高度风速(mile d^{-1}); R_a 为天体辐射(mm d^{-1}); r 为水体反射率,一般取0.05; T_a 为气温(K); n 为实际日照时数; N 为最大可能日照时数。

彭曼公式有各种表达方法,但主要公式一般是公式(6)所示,对于不同的观测资料、量纲和单位体系,干燥力可有不同的表达,如:

$$E_a = 0.26(e_a - e_d)(0.5 + 0.54u_2) \quad (6c)$$

公式(6c)是中国地理学会水文专业委员会第五次会议(沈灿桑, 1992)总结的另外一种形式,同时还给出了彭曼公式中辐射项和干燥力项的一种修正形式,公式如下:

$$H_0=0.575R_a(0.18+0.55\times n/N)+11.456\quad(6d)$$

$$E_a=0.27(e_a-e_d)(1+0.28u_{10})\quad(6e)$$

式中:水汽压的单位为毫巴; u_2 和 u_{10} 分别为2 m和10 m高处的风速(m/s)。按照以上方法得到的水面蒸发结果见表1和图4。

表1、图4结果显示,彭曼公式结果偏大,为1289 mm,符合其假设条件和学术界的一般认识,中科院地理研究所公式计算结果(1182 mm)与施成熙方法(1121 mm)和扎伊科夫公式(1247 mm)所得结果比较接近。官厅的实测水面蒸发为1111 mm,但此值仅覆盖1982年以前;根据北京市水资源评价资料,北京市多年平均(1951-2009)水面蒸发结果为1182 mm,研究时段1999-2009年的实测结果为

表1 水面蒸发计算结果(单位:mm)
Tab. 1 Caculation results of water surface

年份	evaporation(mm)				
	彭曼	扎依科夫	施成熙	地理所	实测量
1999	1286	1165	1045	1103	1137
2000	1353	1292	1157	1224	1258
2001	1320	1212	1091	1148	1213
2002	1306	1212	1089	1148	1202
2003	1225	1174	1043	1112	1089
2004	1322	1335	1201	1265	1229
2005	1323	1334	1198	1264	1252
2006	1234	1265	1139	1199	1166
2007	1269	1268	1144	1202	1230
2008	1233	1155	1045	1095	1168
2009	1303	1310	1179	1242	1267
平均	1289	1247	1121	1182	1201

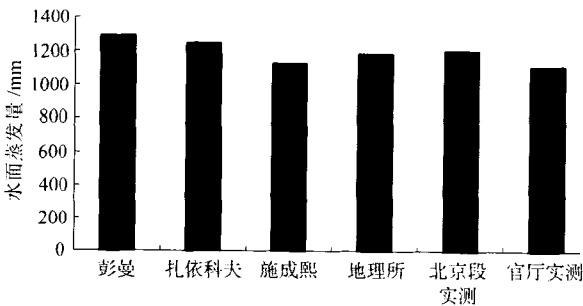


图4 不同方法计算水面蒸发结果比较

Fig. 4 Comparision of different menthods of water surface evaporation results

1201 mm。
分别用以上4种方法的结果与实测结果进行相关分析,得到的相关系数是彭曼公式0.761,扎伊科夫公式0.793,施成熙方法0.817,地理所方法0.794。可见施成熙方法最好,地理所方法和扎伊科夫次之,彭曼方法较差。

本文还针对4种水面蒸发与实测值进行了均方根误差(RMSE)分析,结果显示,以上4种方法得到的结果是彭曼公式93.58,扎伊科夫公式59.59,施成熙方法86.38,地理所方法40.42。可见地理所方法最好,扎伊科夫次之,施成熙方法和彭曼方法较差。

综上,本文采用地理所公式得到的1182 mm,是一个可以接受的结果。

3.2.2 潜在蒸散发成果分析与比较

除 Priestley-Taylor 相关公式, SWAT 模型中的另外两种计算方法 Penman-Monteith 和 Hargreaves 公式(1985)也广泛用于潜在蒸散发的研究。Penman-Monteith 公式如下:

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}\quad(7)$$

式中: ET_0 为参考蒸散量(mm day^{-1}); e_s 为陆面饱和水汽压; e_a 为实际水汽压; T 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

Hargreaves 公式如下:

$$\lambda ET_0=0.0023R_a(T_{\text{mx}}-T_{\text{mn}})^{0.5}(T+17.8)\quad(8)$$

式中: λ 为蒸发潜热; T_{mx} 、 T_{mn} 分别为日最高、最低气温。

此外,均衡蒸发模型是潜在蒸发的另外一种思路,均衡蒸发(equilibrium evaporation)的概念由 Slatyer 和 McIlroy(1961)提出,定义为充分湿润下垫面在其上覆空气趋于饱和状态时发生的蒸发,他们考虑的是一种绝对无平流、下垫面水平均一的极端状况,代表了湿润地表蒸发的下限(Zhang et al, 2009; Trajkovic et al, 2009)。

$$ET_0=\frac{\Delta(R_n-G)}{\Delta+\gamma}\quad(9)$$

表2给出了以上各种方法计算的潜在蒸散发结果,其中 Hargreaves 计算结果为1075 mm,FAO修正的彭曼方法的结果为1100 mm,均衡蒸发模型结果为757 mm。由于均衡蒸发考虑的只是一种最小值状态,结果偏小,其结果作为一种潜在蒸散发下限值的校验值,为各种方法的比较提供支撑。

表 2 潜在蒸发计算结果(单位:mm)
Tab. 2 The potential evaporation results (mm)

年份	PM-FAO	Hargreaves	Taylor	均衡蒸发
1999	1098	1122	1017	795
2000	1158	1157	1042	814
2001	1130	1143	1041	813
2002	1115	1125	995	778
2003	1046	1006	945	739
2004	1128	1061	933	729
2005	1128	1079	958	748
2006	1050	986	896	700
2007	1084	1049	947	740
2008	1047	1006	924	722
2009	1112	1096	963	752
平均	1100	1075	969	757

3.2.3 实际陆面蒸散发成果分析与比较

以上潜在蒸散发的结果是否合理,主要依赖于最终实际蒸散发的结果是否正确。而在陆面蒸散发研究中,除本文采用的傅抱璞公式外,高桥浩一郎公式应用也相当广泛。高桥公式是根据一定的物理考虑和观测结果提出的适合大面积陆面实际蒸发计算的方法。该方法以降水和月平均气温为主要因子,对一个地区的实际蒸散发进行计算,由于计算得到的是月蒸发量,所以需要进一步求和得到历年的蒸散发量。高桥公式如下(引自宋正山等,1999):

$$E_a = \frac{3100P_M}{3100 + 1.8P_M^2 \exp(-\frac{34.4T_M}{235.0 + T_M})}$$
 (10)

式中: P_M 为月降水量; T_M 为月平均气温。

张鲁公式(Zhang, 2008)也是十分重要的陆面实际蒸散发计算方法,尤其在中国和澳大利亚等地使用比较广泛。张鲁公式是基于彭曼假设和泰勒假设2种情形,这2种情形又分别分为森林地区和作物、草地2种。公式如下:

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + w \times \frac{E_p}{P}}{1 + w \times \frac{E_p}{P} + (\frac{E_p}{P})^{-1}}$$
 (11)

式中: E 为区域年蒸散量; P 为区域年降水量; E_p 为可能蒸散量; w 为植被有效水分系数,对植被来说,其取值范围为0.5~2.0,森林取2.0,草地和农作物取0.5,裸土小于0.5;可能蒸散用Priestley-Taylor公式计算。

Turc公式(Brutsaert, 1982; 马雪华, 1993; Trajković et al, 2007)是气候学计算年蒸散发的另一种方法,在森林地区应用较广。Turc公式如下:

$$E = P/[0.9 + (\frac{P}{L_T})^{1/2}] \quad (P/L_T > 0.316)$$
 (12)

$$E = P \quad (P/L_T < 0.316)$$
 (13)

式中: L_T 为最大蒸散值,它与年平均气温 $T(^{\circ}C)$ 之间存在如下关系: $L_T = 300 + 25T + 0.05T^3$ 。

以上3种方法和傅抱璞公式的结果比较见图5。在无灌溉条件下,傅抱璞公式和高桥公式结果较为接近;Turc公式和张鲁公式等较为接近,但是比前2种方法的结果值偏大。在实际蒸散发计算中,依据土地类型分类,考虑水面面积、水浇地面积和城市不透水面积等,综合得到不同模式下实际蒸散发结果:高桥公式496 mm, Turc公式518 mm;傅抱璞公式和张鲁公式则随着采用潜在蒸散发模式的不同而有不同的结果,其中傅抱璞模式结果分别为494、503和505 mm,张鲁公式结果为524、531和533 mm(表3)。

3.2.4 水平衡方法对实际陆面蒸散发成果的验证

要验证不同结果的合理性,可采用水量平衡方法。区域水量平衡方程(张士锋等, 2012)如下:

$$E = P - Q - \Delta W$$
 (14)

式中: E 为蒸散发量(mm); P 为降水量(mm); Q 为河川净排泄量(mm),包括出境水 Q_1 、入境水量 Q_2 和应急调水 Q_3 ; ΔW 为系统或区域蓄变量(mm),包括地

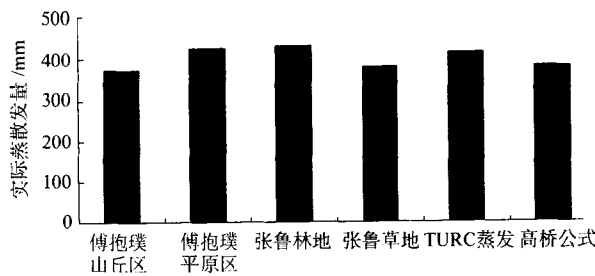


图5 无灌溉模式下永定河北京段实际蒸散发计算结果
Fig. 5 The actual evaporation results in Beijing section of Yongding River without irrigation

表 3 永定河北京段的实际蒸散发(mm)
Tab. 3 The actual evaporation in Beijing section of the Yongding River (mm)

潜在蒸散发模式	傅抱璞公式	张鲁公式	高桥公式	Turc公式
PM-FAO	505	533		
Presley-Taylor	494	524	496	518
Hagreaves	503	531		

下水蓄变量 ΔW_1 和水库蓄变量 ΔW_2 。

根据中国水资源公报(2000-2010)、北京市水资源公报等有关数据,1999-2009年间,北京市年平均降水量 P 为471.1 mm。北京市2001-2009年平均出境水量 Q_1 为8.47亿 m^3 ,入境水量 Q_2 为4.72亿 m^3 ,应急调水 Q_3 为0.30亿 m^3 ,由此得到河川净排泄量 Q 为3.45亿 m^3 ;以北京市国土面积为16800 km^2 计算,折合净排泄水量为20.5 mm。1999-2009年北京市年均地下水蓄变量 ΔW_1 为-5.05亿 m^3 ,水库净储量年均减少值 ΔW_2 为-2.09亿 m^3 ,由此可以得到水资源系统内的蓄变量为-7.14亿 m^3 ,折合净减少量为-42.5 mm。按照公式(14),计算可得研究区实际蒸散发为493.1 mm。永定河北京段面积约占北京市国土面积的20%,其土地类型构成与北京市总体相似,北京市水量平衡结果可在相当程度上代表永定河段结果,而此实际蒸散发结果与前文实际蒸散发计算结果494 mm是吻合的。可见,在各种蒸散发模式中,傅抱璞公式较为接近水平衡的结果,而潜在蒸散发的计算则可采用Presley-Taylor公式。

4 结论与讨论

(1) 1999-2009年北京段水面蒸发结果为1182 mm,潜在蒸散发为969 mm,实际蒸散发为494 mm,其中山区林草蒸散发371 mm,平原旱地蒸散发425 mm,水浇地蒸散发840 mm,城市不透水地区的蒸散发为291 mm。

(2) 分析和比较各种水面蒸散发计算成果,并经过相关分析、RMSE分析发现,利用中国科学院地理科学与资源研究所方法计算水面蒸散发较为合理,施成熙方法、前苏联扎依科夫方法较为接近,但彭曼公式结果偏大。一般认为,在彭曼公式中动力项计算对水面蒸发成果偏大有一定影响。

(3) 潜在蒸散发计算宜采用Presley-Taylor公式,FAO修正后的彭曼公式和Hargreaves公式结果偏大;实际蒸散发计算宜采用傅抱璞方法,高桥公式的模拟值与傅抱璞方法接近,可以相互验证,计算结果与研究区同时段水平衡分析结果493.1 mm较为接近,而张鲁公式和Turc公式结果偏大。

参考文献(References)

Brutsaert W. 1982. Evaporation into the atmosphere: Theory, history and applications. Berlin: Springer.

- Fu B P. 1981. On the calculation of evaporation from land surface. *Scientia Atmospherica Sinica*, 5(1): 23-31. [傅抱璞. 1981. 论陆面蒸发的计算. *大气科学*, 5(1): 23-31.]
- Gao G, Chen D L, Ren G Y, et al. 2006. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000. *Geographical Research*, 25(3): 378-387. [高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 2006. 1956-2000年中国潜在蒸散量变化趋势, *地理研究*, 25(3): 378-387.]
- Hargreaves G H, Samani Z A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99.
- Ma X H. 1993. Forest hydrology. Beijing, China: China Forestry Publishing House. [马雪华. 1993. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社.]
- Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193: 120-145.
- Pristley C H B, Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2): 81-92.
- Ren X S. 2007. Water resource assessment in Haihe River Basin. Beijing, China: China Water Power Press. [任宪韶. 2007. 海河流域水资源评价. 北京: 中国水利水电出版社.]
- Shen C X. 1992. Proceedings of the fifth congress hydrology sciences in China. Beijing, China: Science Press. [沈灿桑. 1992. 第五次全国水文学术会议论文集. 北京: 科学出版社.]
- Slatyer R O, Mcllroy I C. 1961. Evaporation and the principle of its measurement//Slatyer R O, Mcllroy I C. *Practical microclimatology*. Melbourne, Australia: CSIRO.
- Song L L, Yin Y H, Wu S H. 2012. Advancements of the metrics of evapotranspiration. *Progress in Geography*, 31(9): 1186-1197. [宋璐璐, 尹云鹤, 吴绍洪. 2012. 蒸散发测定方法研究进展. *地理科学进展*, 31(9): 1186-1197.]
- Song Z S, Yang H, Zhang Q Y. 1999. The characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over northern China. *Plateau Meteorology*, 18(4): 552-566. [宋正山, 杨辉, 张庆云. 1999. 华北地区水资源各分量的时空变化特征. *高原气象*, 18(4): 552-566]
- Trajkovic S, Kolakovic S. 2009. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resource Management*, 23: 3057-3067.
- Trajković S, Stojnić V. 2007. Effect of wind speed on accuracy of Turc method in a humid climate. *Architecture and Civil Engineering*, 5(2): 107-113.

- Xie X Q, Wang L. 2007. Changes of potential evaporation in northern China over the past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 22(5): 683-691. [谢贤群, 王菱. 2007. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化. *自然资源学报*, 22(5): 683-691.]
- Xie X Q, Zuo D K. 1991. Farmland evaporation measurement and calculation. Beijing, China: Meteorological Press. [谢贤群, 左大康. 1991. 农田蒸发测定与计算. 北京: 气象出版社.]
- Yan C Y. 1999. A review of Beijing water resource from 1949 to 1999. Beijing, China: China Water Power Press. [颜昌远. 1999. 水惠京华: 北京水利五十年. 北京: 中国水利水电出版社.]
- Zhang L. 2008. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework model development and testing. *Journal of Hydrology*, 360: 117-131.
- Zhang S F, Meng X J, Liao Q. 2012. Research on water resources and water balance in Beijing. *Geographical Research*, 31(11): 1991-1997. [张士锋, 孟秀敬, 廖强. 2012. 北京市水资源与水量平衡研究. *地理研究*, 31(11): 1991-1997.]
- Zhang X Q, Ren Y, Yin Z Y. 2009. Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971-2004. *Journal of Geophysical Research*, 114: D15105.
- Zuo D K, Xie X Q. 1991. Farmland evaporation research. Beijing, China: Meteorological Press. [左大康, 谢贤群. 1991. 农田蒸发研究. 北京: 气象出版社.]

Evaporation study in Beijing Section of the Yongding River

ZHANG Shifeng^{1,2}, WANG Cuicui^{1,3}, MENG Xiujing^{1,3}, HUA Dong^{1,3}, MEN Baohui⁴, LI Zhifei⁴

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Key Lab of Water Cycle and Related Surface Processes, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. North China Electronic Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Evaporation study in Beijing section of the Yongding River is of great significance to the ecological corridor construction since the Yongding River is recognized as the mother river of Beijing. Several methods are used to calculate water surface evaporation, potential evaporation and actual evaporation in Beijing, China. The research result indicates that water surface evaporation in Beijing is 1182 mm, potential evaporation is 969 mm, and actual evaporation from 1999 to 2009 was 494 mm, while the actual evaporation is 371 mm in the mountainous area, and 425 mm in the plain area when no irrigation is applied. Comparison study is undertaken to the adaptability of the different evaporation method and formula. The Hongjialian formula developed by the Chinese academy of Sciences is applicable to the free water evaporation, and the results of Shichengxi formula and Zaikov formula are close to the measured result. Meanwhile the result by Penman formula is bigger. The cause of which is due to the dynamic part estimate in Penman formula. The correlation analysis and root-mean-square error (RMSE) is used to verify the research results. The average value and RMSE analysis show that the Hongjialian formula is the best way to simulate the water surface evaporation although the correlation analysis shows that the Shichengxi formula is a suitable way. The applicable Potential evaporation method is Presley-Taylor in this study. The results of UN-FAO formula, Hargreaves formula, and equilibrium method are not suitable to the result in Beijing. As to the actual evaporation, the Fubaopu method is adapted to the research since it is verified by water balance result. While Zhanglu method and Turc method can be adjusted to each other, but the result of Takahashi Kouichiro is very close to the Fubaopu's result.

Key words: evapotranspiration; Penman Formula; Presley-Taylor Formula; Fubaopu Formula; the Yongding River