

文章编号: 1672-8785(2012)03-0027-07

结合地物分类的湿地蒸散发量定量遥感集成模型

韩 敏 李晓龙

(大连理工大学电子信息与电气工程学部智能控制理论研究所, 辽宁大连 116024)

摘 要: 湿地蒸散发量是湿地水量支出的重要组成部分。利用遥感技术可以合理有效地计算出地形复杂的湿地的蒸散发量。将遥感图像分类技术与定量遥感蒸散发模型结合起来, 考虑各类地物不同的蒸散发源和水热传输机制, 建立了集成模型, 分析和计算了湿地主要地物的蒸散发量。通过对各地物类的样区平均蒸散发量与实测数据进行比较, 证明结合地物分类的湿地蒸散发量计算集成模型能够取得很好的结果。

关键词: 蒸散发量; 分类; 集成模型; 湿地; 单源; 双源

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.03.006

Integrated Quantitative Remote Sensing Model of Wetland Evapotranspiration Combined with Classification

HAN Min, LI Xiao-long

(School of Electronic Information and Electrical Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Evapotranspiration is an important component of the water budget of wetland. By using the remote sensing technology, the evapotranspiration of wetland can be computed effectively and appropriately. The remote sensing classification technology is combined with the quantitative remote sensing technology. In view of different land with different evapotranspiration sources and different water and heat transfer mechanisms, an integrated model is established and is used to analyze and compute the evapotranspiration of some major wetland. By comparing the average evapotranspiration of different wetland with the measured data, it is shown that the integrated quantitative remote sensing model of wetland evapotranspiration combined with classification can get a good result.

Key words: evapotranspiration; classification; integrated model; wetland; single-source; dual source

0 引言

湿地蒸散发量是湿地水分损失的主要成分。准确地计算蒸散发量^[1]有助于制定湿地保护方面的决策, 使湿地周围的水资源得到合理利用^[2]。将遥感数据用于辅助陆面蒸散发量的计算已经有了很多成功的案例^[3], 并可通过将其

与部分气象数据相结合来建立蒸散发量的计算模型。这些模型一般适用于土地利用情况比较单一的干旱或半干旱地区。对于土地利用情况复杂的湿地, 我们可以先通过分类将复杂的土地利用分解成多块单一的土地利用类型, 然后选择合适的模型进行蒸散发量计算。

在利用遥感技术计算蒸散发量时, 常用的模

收稿日期: 2012-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61074096)

作者简介: 韩敏 (1959-), 女, 吉林延吉人, 教授, 主要研究方向为神经网络、专家系统、3S 系统及混沌序列分析。E-mail: minhan@dlut.edu.cn

型包括基于地表能量平衡的 SEBAL^[4-5] (Surface Energy Balance Algorithm for Land) 模型和 TSEB^[6-7] (Two Source Energy Balance) 模型以及两种模型的变种模型、基于经验关系的数值模型中的三角形模型^[8]、VITT 模型^[9]和 S-SEBI 模型^[10]等。

各种土地利用类型均有其相应的下垫面, 所以其水热传输机制也不尽相同。Liu 等人^[11]计算和比较了不同地物类型的蒸散发量。根据相应的地物类型选择合适的蒸散发量计算模型将会取得更好的结果, 而且在使用计算模型时所需的中间参数在不同地物上的计算方法也不同, 不能进行统一量化, 需要进行分类计算处理。因此, 本文根据 SEBAL 模型和 TSEB 模型的特点及其对不同地物类型蒸散发量计算的适应性, 通过遥感图像分类获得土地利用分类情况, 并对这两种模型的计算过程进行相应改进, 然后将其应用于相应的土地利用类型, 以完成湿地蒸散发量的计算。最后, 通过将其与实测数据进行比较, 得到与实测数据相当的计算结果。

1 定量遥感蒸散发量模型的特点分析

目前应用遥感数据估算大面积地表蒸散发量的方法主要基于地表能量平衡方程^[12], 用遥感表面温度结合气温以及一系列阻抗公式计算显热通量, 并将潜热通量作为剩余项(从能量平衡公式中求出, 因此这种方法又称余项法)。地表能量平衡方程可表示为

$$R_n = H + \lambda ET + G + P \quad (1)$$

式中, R_n 为净辐射能量; H 、 λET 和 G 分别为显热通量、潜热通量和土壤热通量; P 为植被光合作用的能量消耗(由于光合作用相对较小, P 可直接忽略)。

典型的模型代表为 SEBAL 模型和 TSEB 模型。其中, SEBAL 模型为单源模型^[4], TSEB 模型为双源模型^[6]。Timmermans 等人^[13]通过实验将两种模型的结果进行对比后发现, 它们都能达到较好的精度。这两种模型的净辐射能

和土壤热通量的计算过程相同, 其区别在于显热通量的计算, 即对蒸散发源的考虑。虽然它们都使用基于地气温梯度与地表阻抗作比的方法来计算显热通量, 但是其具体的计算过程是不同的。

$$H = \rho C_p \frac{dT}{R_A} \quad (2)$$

式中, H 为显热通量, ρ 为空气密度, dT 为地气温差, R_A 为空气动力学阻抗。SEBAL 模型将地表看作是单一蒸发源, 依靠人工选取“干点”(无植被区, 温度最高, 蒸发量最小, $\lambda E = 0$, $H = R_n - G$)和“湿点”(植被覆盖率最大区, 温度最低, 蒸发量最大, 无潜热通量, 即 $H = 0$, $\lambda E = R_n - G$)的方法来确定温度梯度和空气动力学阻抗, 然后直接根据式(2)求出显热通量, 并可利用余项法求出 λET 。因此, SEBAL 模型适合计算下垫面较为单一的土地类型的蒸散发量。然而此模型在确定显热通量时需要人为确定, 主观因素可能会引入误差, 而且此模型不适合湿地复杂地形的蒸散量计算。TSEB 模型将植被和土地看作是二个蒸发源, 因此被称为双源模型。它是通过引入植被覆盖率^[6]将地面的辐射温度分解为植被温度和地表温度两层组分温度的。下面给出部分参数的计算公式:

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_r}{R_s} \quad (3)$$

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_r}{R_s + R_A} \quad (4)$$

$$f_c(\theta) = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^p \quad (5)$$

$$T_r^4(\theta_1) = f_c(\theta_1)T_c^4 + [1 - f_c(\theta_1)]T_s^4 \quad (6)$$

式中, H_s 和 H_c 分别为土壤和植被的显热通量, T_s 、 T_c 和 T_r 分别为土壤温度、植被温度和地面辐射温度, θ_1 为卫星接收地面辐射的角度, R_s 为土壤热阻抗, f_c 和 $NDVI$ 分别为植被覆盖率和归一化植被指数。 T_s 和 T_c 的反演需要至少两个角度的辐射信息, 然而有些遥感图像只提供了单角度的辐射温度, 因此不能直接求出 T_c 和 T_s , 而需要使用 Priestly-taylor 公

式将射入植被中的净辐射能分为植被潜热通量和植被散发量。植被散发量的公式为

$$\lambda ET_C = a_{PT} \cdot f_G \frac{S}{S + \gamma} R_{nc} \quad (7)$$

$$R_{nc} = \left[1 - \exp \left(-k \frac{LAI}{\sqrt{2 \cos \theta}} \right) \right] \cdot R_n \quad (8)$$

$$R_{ns} = H_s + \lambda ET_s + G \quad (9)$$

$$R_{nc} = H_c + \lambda ET_c \quad (10)$$

式中, a_{PT} 为 Priestly-taylor, 一般取 1.26; f_G 为绿叶面积占叶面积指数中的部分; S 为饱和水气压; γ 为干湿球常数; R_{nc} 为植被区的净辐射能, 可通过叶面积指数求得式 (8)。通过式 (4) 可以求出初始 T_c 。根据式 (6) 可以求出初始 T_s , 得到初始的 λET_s (若为正值, 计算结束; 若有负值出现, 则先将初值置零)。根据式 (9) 得到 H_s , 式 (3) 得到 T_s , 式 (6) 得到 T_c , 式 (4) 得到 H_c 。最后根据式 (10) 计算 λET_c 。若 λET_c 为正值, 计算结束; 否则通过式 (3)、式 (4)、式 (6)、式 (8)、式 (9) 和式 (10) 循环求解, 直至 λET_c 和 λET_s 无负值为止。因此, TSEB 模型适合计算具有植被层的双层下垫面的土地类型的蒸散发量, 尤其是在需要区分蒸发量和散发量的时候。

在已有的研究中, SEBAL 模型和 TSEB 模型一般用于计算地形较为均一的农田的蒸散发量。对于地形复杂的湿地的蒸散发量, 单一地使用 SEBAL 模型和 TSEB 模型并不能起到很好的效果。自然界中的植被区域在大多数情况下并非均匀单一, 而且当地表为部分植被覆盖时, 土壤和植被的水热传输不在同一高度上, 单层模型的假设也就不再成立。另外, SEBAL 模型不能区分蒸发和散发, 而且不能单独考虑植被散发对水量支出的影响。对于裸土和净水域等无植被区域来说, 它们只有一个蒸发源, 适合建立单层模型。对于只有一个角度辐射信息的遥感图像, 我们不能通过循环求解的方式来解决, 因此单纯使用 TSEB 模型也是不可行的。

2 湿地蒸散发量计算遥感集成模型

本文针对地物类型复杂的湿地的蒸散发量计算进行研究, 首先通过地物分类对不同地物的下垫面进行分析, 然后为不同的下垫面选择合适的模型 (称之为集成模型), 再根据地物分

类对模型中的参数进行重新设置, 并利用实验区数据对模型的有效性进行数据分析。

2.1 下垫面分析

湿地一般具有复杂的土地利用类型, 其主要的植物组成部分是成片的芦苇、大片水域、成片的农田和稀疏的村庄。其中, 芦苇有陆生的和水生的, 两者面积相当。芦苇地的蒸散发源包括芦苇的散发和芦苇棵间土地或水面的蒸发, 其下垫面为芦苇和土地或水面。水域蒸发源自水面蒸发, 其下垫面为水。大片的农田分布较为均匀, 其主要的蒸发源为土地。还有部分农田比较湿润, 其温度较低, 然而它也属于均一的土地蒸发源。村庄的蒸发源也是土地, 因此其下垫面都是土地。

2.2 集成模型与地物分类的结合

根据对定量遥感计算蒸散发量模型与不同地物类型的下垫面类型以及蒸发源的综合分析, 不同芦苇地区的芦苇长势不同, 会使芦苇地地表不均匀, 而且有两个蒸散发源。芦苇面积较大, 因此宜使用 TSEB 双源模型分别计算蒸发量和散发量。农田包括水田、村庄和水域的土地类型相对比较单一, 而且只有一个蒸发源, 因此宜使用单源 SEBAL 模型计算蒸发量。图 1 为结合地物类型分类的定量遥感蒸散发量集成模型的流程图。

2.3 模型中参数与地物分类的结合

2.3.1 比辐射率的计算

不同地物类型的比辐射率不尽相同, 其计算公式为

$$\varepsilon = 0.985, NDVI < 0$$

$$\varepsilon = 0.96, 0 < NDVI < 0.16$$

$$\varepsilon = 1.009 + 0.047 \ln NDVI, 0.16 \leq NDVI \leq 0.74$$

$$\varepsilon = 0.985, 0.74 \leq NDVI \leq 1 \quad (11)$$

式中, ε 为比辐射率。当植被指数 (NDVI) 大于 0 时, 地物为陆面, 比辐射率与植被指数相关; 当植被指数小于 0 时, 地物为水, 此时比辐射率为 0.985。

2.3.2 土壤热通量的计算

模型中的陆面土壤热通量可根据地面辐射温度、地面反照率、植被指数以及净辐射能的经

白洋淀湿地位于河北省保定市东部,是河北平原与滨海平原交接地带的湖积冲积洼地。研究中选取 2008 年 5 月 30 日获取的 Landsat5 TM 遥感图像,太阳高度角为 64° ,除热红外波段外,其余波段的空间分辨率均为 30 m,热红外波段的空间分辨率为 120 m。白洋淀湿地的土地利用类型以芦苇地为主,还有大块水域和耕地。图 2 为根据遥感图像光谱数据特征并结合实际地物情况进行土地利用分类的结果图。其中,芦苇是湿地的主要植物代表。我们将绿色植物部分统称为芦苇部分。表 1 列出了研究区的土地利用情况。模型中所用气象数据(包括日平均最高气温、风速和相对湿度等)均由河北保定站(54602)提供,测量的参考高度为 2 m。湿地代表地物水和水生芦苇的日蒸散发量均通过实际测量得到。实验设备为具有国家专利权的湿地蒸散发量测量仪器^[16]。该仪器被安装在白洋淀湿地气象站处,用于分别对自由水面和不同密度的水生

芦苇的蒸散发量进行测量。实验装置的名称为三筒补偿式蒸渗仪。实验测量从 2008 年 4 月一直持续到 10 月,每天昼夜 24 h 通过测量每小时的水位变化来确定各个筒的日蒸散发量,并选取与遥感图像获得时间相对应的蒸散发量数据(实际数据见表 2)。

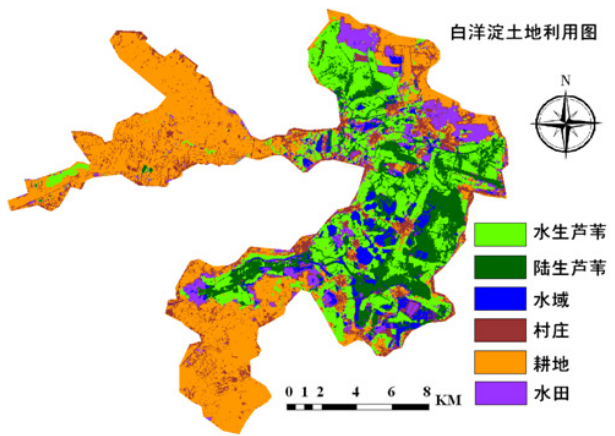


图 2 2008 年 5 月 30 日的白洋淀土地利用分类

表 1 2008 年 5 月 30 日研究区的土地利用情况

土地利用类型	陆生芦苇	水生芦苇	水域	村庄	耕地	水田
像元个数	52782	35308	12074	28917	91678	18883
所占百分比	22.03	14.73	5.04	12.07	38.26	7.88

表 2 2008 年 5 月 30 日的白洋淀实测数据

属性	日最高气温 / $^{\circ}\text{C}$	相对湿度	风速 / m/s	水域日蒸发量 / mm/日	水生芦苇日蒸散量 / mm/日
数据	27.7	0.1	2.8	5.6	10.7

3 实验结果分析

3.1 蒸散发量的计算结果

通过结合地物分类的蒸散发量集成模型计算出了 2008 年 5 月 30 日白洋淀湿地的日蒸散发量(结果以图的形式给出,见图 3),并对各类地

物类型的数据分别按照分类样本的平均蒸散发量以及全淀区的各类平均蒸散发量进行了分类统计(结果见表 3)。考虑到芦苇为湿地的主要植被,分别对样区芦苇的蒸发量和散发量进行了统计(结果见表 4)。

表 3 各地物类样本及白洋淀区的平均蒸散发量

土地利用类型	陆生芦苇	水生芦苇	水域	耕地	水田
样本平均 ET/ mm/日	6.598	8.068	5.593	2.237	4.5
全区平均 ET/ mm/日	5.285	7.758	2.889	1.638	6.165

3.2 结果分析

3.2.1 土地分类结果的影响

首先,对淀区进行土地分类,并利用土地分类结果分别反演不同地物的蒸散发量,从理论上说明了集成模型的适应性。根据模型的特点以及对不同地物的适应性选择合适的蒸散发量计算模型能够实现更好的蒸散发量反演。其次,白洋淀湿地存在自由水面,使得原始的 SEBAL 模型并不适用,其主要原因在于土壤热通量的计算影响了计算结果。TESB 模型在分别计算蒸发和散发的同时需要输入气温,然而气象站所提供的气温为全区的最高和最低气温。利用它进行计算必然会出现很大的误差,甚至会造成计算数据不合理,为此我们选择每类地物的最小地表辐射温度值作为该类型地物的气温值。这样做是基于辐射值的像元具有零值潜热通量以及最大蒸散发量的假设的,因为湿地植被区具有较高的蒸散发值,除了可忽略的光合作用之外,剩余能量几乎全部用于蒸散发了。

表 4 样区芦苇的蒸发与散发统计

样区芦苇类型	陆生芦苇	水生芦苇
蒸发量 E/mm/day	2.827	1.223
散发量 T/mm/day	5.241	5.375
蒸散发总量 ET/mm/day	8.068	6.598

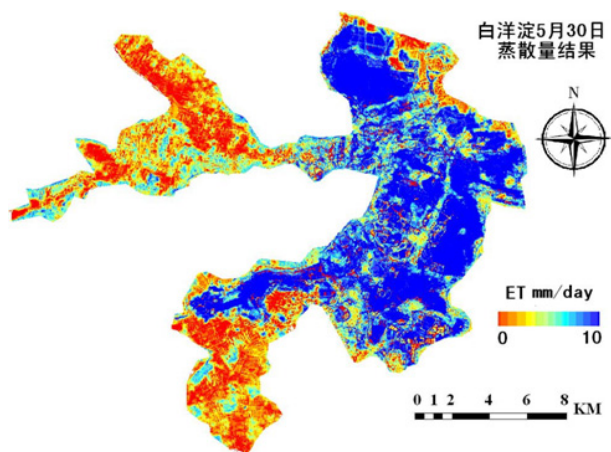


图 3 2008 年 5 月 30 日白洋淀蒸散发量的计算结果

土地分类主要是依靠遥感图像的多光谱数据进行的。在利用 ERDAS 软件进行地物分类时,

难免会引入一些误差,但由于两种模型计算具有相似性,这些误差可以忽略不计。土地分类的主要问题在于每个像元并不都是纯净的。Landsat TM 遥感图像的光谱空间分辨率为 30 m,像元尺度较大,每个像元可能同时存在两种以上的地物。比如水生芦苇本身就是一种混合像元,当密度较大时会被分为芦苇类;当密度较小时,可能会被分为自由水面类。所以在验证和评价水生芦苇的蒸散发量时,不能较好地进行匹配,但是实际测量数据仍会具有较好的参考价值。

3.2.2 白洋淀蒸散发量的计算结果

白洋淀湿地的总平均蒸散发量为 4.075 mm/日,由此可以计算出整个淀区的日蒸散发总量约为 88 万立方米。其中大部分的蒸散发量来自于芦苇和水域的蒸散发。水生芦苇的平均蒸散发量比陆生芦苇的大,因为水生芦苇有充足的水分。芦苇散发量是芦苇区域蒸散发量总量的主要组成部分。陆生芦苇和水生芦苇的蒸散发量区别主要在于其棵间分别为土地和水,而水的蒸发比土壤的大得多。在 30 m 级遥感图像中,像元中的对应的水生芦苇类中包含很大一块水面,因而湿地中水生芦苇的密度较小。因此,水生芦苇的蒸散发量与与实测数据中小密度水生芦苇的蒸散发量相对应。表 2 中,水生芦苇的样区日平均蒸散发量为 8.086 mm/日,最大蒸散发量为 10 mm/日,与实测数据中水生芦苇的蒸散发量 10.7 mm/日相符合,而且比水域的日平均蒸散发量大。其原因在于芦苇有充足的水分供蒸散发,而且水生芦苇的温度表面要稍高于水域。水域的样区蒸散发量 5.593 mm/日与实测当日水的蒸散发量 5.6 mm/日极其相近。水田的平均日蒸散发量高于耕地,因为水田的土壤水分含量较高,水分充足。

4 结论

本文利用 Landsat5 TM 遥感图像以及一些气象数据和蒸散发量计算模型得到了湿地的日蒸散发量结果以及各类地物类型的日平均蒸散发量。复杂地形条件下蒸散发量的遥感估算一直是区域定量遥感估算中的难点问题,尤其是对于有很多水面的复杂地形的湿地。实验中通过对

遥感图像的分类明确了淀区的土地利用情况, 然后根据湿地的实际复杂地形、各类地物的不同蒸散发源和不同的水热机制选择不同的模型及模型参数, 建立结合地物类型的蒸散发量计算集成模型。各地物类的平均蒸散发量结果也符合实际情况, 芦苇的散发量占蒸散发总量中的一大部分。该模型计算出的白洋淀湿地的日平均蒸散发量为 4.075 mm/日, 由此可以得到整个白洋淀区由蒸散发产生的耗水量约为 88 万立方米。该结果可以为湿地的保护提供数据支持。

参考文献

- [1] Sun Zhong-Ping, Wei Bin, Su Wei, et al. Evapotranspiration Estimation Based on the SEBAL Model in the Nansi Lake Wetland of China [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, **11**(39): 1–7.
- [2] 孙敏章, 刘作新, 吴炳方, 等. 卫星遥感监测方法及其在水管理方面的应用 [J]. *水科学进展*, 2005, **16**(3): 468–474.
- [3] 乔平林, 张继贤, 王翠华, 等. 区域蒸散发量的遥感模型方法研究 [J]. *测绘科学*, 2006, **31**(3): 45–47.
- [4] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). Part 1: Formulation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **212–213**: 198–212.
- [5] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, et al. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). Part 2: Validation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **212–213**: 213–229.
- [6] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source Approach for Estimating Soil and Vegetation Energy Fluxes in Observations of Directional Radiometric Surface Temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, **77**(3–4): 263–293.
- [7] French A N, Jacob F, Anderson M C, et al. Surface Energy Fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX (USA) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **99**(1–2): 55–65.
- [8] Stisen S, Sandholt I, Norgaard A, et al. Combining the Triangle Method with Thermal Inertia to Estimate Regional Evapotranspiration – Applied to MSG-SEVIRI Data in the Senegal River Basin [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(3): 1242–1255.
- [9] Moran M S, Rahman A F, Washburne J C, et al. Combining the Penman-Monteith Equation with Measurements of Surface Temperature and Reflectance to Estimate Evaporation Rates of Semiarid Grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **80**(2–4): 87–109.
- [10] Roerink G J, Su Z, Menenti M. S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. Physics and Chemistry of the Earth, Part B [J]. *Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2000, **25**(2): 147–157.
- [11] Liu Wen-Juan, Hong Yang, Khan S L, et al. Actual Evapotranspiration Estimation for Different Land Use and Land Cover in Urban Regions Using Landsat 5 Data [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, **4**(4): 1–14.
- [12] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展 [J]. *遥感学报*, 2008, **12**(3): 515–528.
- [13] Timmermans W J, Kustas W P, Anderson M C, et al. An Intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) Modeling Schemes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **108**(4): 369–384.
- [14] 张长春, 王光谦, 魏加华, 等. 联合 TM 和 NOAA 数据研究黄河三角洲地表蒸(散)发量 [J]. *清华大学学报*, 2005, **45**(9): 1184–1188.
- [15] Hoedjes J C B, Chehbouni A, Jacob F, et al. Deriving Daily Evapotranspiration from Remotely Sensed Instantaneous Evaporative Fraction over Olive Orchard in Semi-arid Morocco [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **354**(1–4): 53–64.
- [16] 许士国, 王昊. 测量芦苇沼泽蒸散发量的渗流补偿方法 [J]. *水科学进展*, 2007, **118**(14): 496–503.