

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.02.007

赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析

陈晓菲,任立良,江善虎,马明卫,刘 懿

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:基于 AVHRR 遥感数据和气象观测数据,将地表能量平衡系统 (surface energy balance system, SEBS) 模型应用于赣江上游流域,在不同气象条件下对日蒸散发量进行估算。结果表明,SEBS 模型对日蒸散发量的估算满足一定的精度,可以应用于此流域。通过遥感反演分析发现,赣江上游实际日蒸散发量受到净辐射、植被覆盖率、地表温度等因素的影响;反演参数与土地利用在空间上有良好的相关性和一致性,且在时间上有明显的年内分布规律。

关键词:日蒸散发量;SEBS 模型;植被归一化指数;土地覆被;赣江上游流域

中图分类号:S161.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2014)02-0033-05

RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang Basin

CHEN Xiaofei, REN Liliang, JIANG Shanhu, MA Mingwei, LIU Yi
(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on AVHRR remote sensing data and meteorological observations, evapotranspiration in the upstream region of the Ganjiang Basin under different meteorological conditions was estimated using the surface energy balance system (SEBS) model. The results show that the SEBS model has a certain amount of accuracy in estimating the evapotranspiration and can be applied to this basin. Remote sensing inversion analysis shows that the daily evapotranspiration in the upstream region of the Ganjiang Basin is influenced by net radiation, vegetation coverage, and surface temperature. In addition, the spatial distribution of inversion parameters is well correlated and consistent with that of land use, and all of these inversion parameters show significant regularities in intra-annual distribution.

Key words: evapotranspiration; SEBS model; normalized difference vegetation index (NDVI); land cover; upstream of Ganjiang Basin

陆面蒸散发包括土壤表面的蒸发和植被的蒸腾,它在地表水量平衡及能量平衡中极其重要^[1]。长期以来,关于陆面蒸散发量的研究一直是水文水资源、气象、农业和生态等相关领域关注的热点,已经成为一个多学科交叉的研究领域,并产生了许多估算蒸散发量的方法^[2]。

目前关于遥感估算区域蒸散发量的估算方法有很多^[3],相对于传统的方法,遥感技术更加经济、适用、有效,而且在非均匀下垫面的蒸散发量监测上有

明显的优越性。其中,地表能量平衡系统 (surface energy balance system, SEBS) 模型是 Su 等^[3-4]于 2002 年提出的一种单层蒸发模型,该模型适用于大区域尺度的地表能量通量估算,因而在区域蒸散发量估算中得到了较为广泛的应用^[5-10]。笔者对 2008 年赣江上游流域春、夏、秋、冬四个季节的晴空无云日的区域实际蒸散发量进行估算,并根据 FAO-Penman 模型计算的参考作物蒸散发量和实际观测数据对其精度进行检验^[11-12]。

1 研究区概况与资料

选取赣江上游峡山水文站以上的集水区域作为研究区域(图 1)。该区域位于北纬 25°00′~27°10′、东经 115°10′~116°40′,总集水面积为 19 506 km²,属亚热带丘陵山区湿润季风气候,年平均气温 18.9℃,多年平均降雨量为 1 607 mm,降水年内分布不均,多集中在 5—10 月。将 SEBS 模型对日蒸散发量的遥感估算应用于该湿润地区,分析影响该流域蒸散发量的主要因素^[13]。

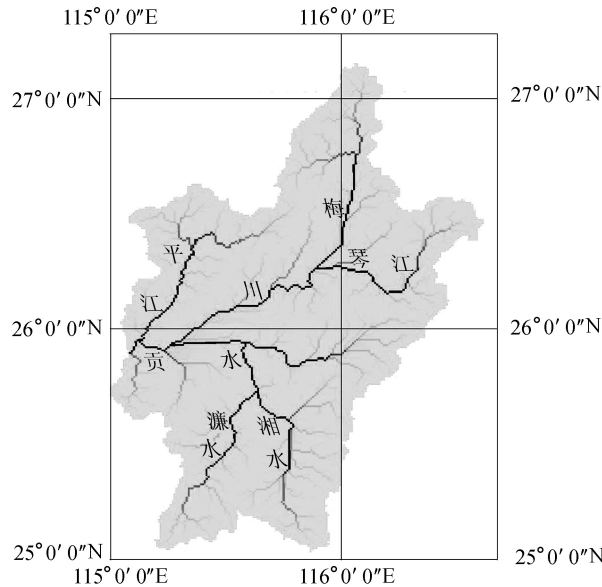


图 1 赣江上游流域水系

利用 1.1 km 空间分辨率的 NOAA/AVHRR 遥感数据 (NOAA-18 卫星)^[14],选取赣江上游流域 2008 年中的晴空无云日进行计算。为使数字高程模型 (DEM) 拥有与遥感数据相同的分辨率,将分辨率 90 m 的 STRM-DEM 数据处理成 1 km 分辨率的成品。实测降雨资料来源于中国水利部水文局发布的水文年鉴。

2 SEBS 模型

SEBS 模型是一种遥感模型,它通过对遥感数据处理与反演获取大量的地表物理信息(反照率、植被指数、地表温度等)^[15],并结合一定的气象资料进行地表蒸散发量估算。

2.1 模型基础

地表能量平衡和近地层的湍流热通量是遥感计算蒸散发量的出发点和主要依据。其中地表能量平衡方程可以表示为

R_n = λE + H + G₀ (1)

式中:R_n 为净辐射通量, W/m²; λ 为蒸发潜热, J/m³; E 为蒸散发量, m/s; H 为感热通量, W/m²; G₀ 为土壤热通量, W/m²。

2.2 净辐射通量

净辐射通量是地球表面所获得的各种辐射之和,为太阳辐射减去反射所剩的能量。地表净辐射是地球一切生命活动的能量来源,是各种气候变化及生态过程的驱动力。其计算公式如下:

R_n = (1 - α)R_{swd} + εR_{lwd} - εσt₀⁴ (2)

式中:R_n 为地表净辐射通量; α 是地表反射率; R_{swd} 为下行太阳辐射, W/m²; ε 为地表比辐射率; R_{lwd} 为下行长波辐射, W/m²; σ 为 Stefan-Bdzmman 常数 (σ = 5.67 × 10⁻⁸ W/(m²K⁴)); t₀ 为地表温度, °C。

2.3 日实际蒸散发量

日实际蒸散发量可用式(3)计算:

E_d = 8.64 × 10⁷ ∫₀²⁴ (R_n - G₀) / λρ_w (3)

式中: E_d 为实际蒸散发量, mm/d; ∫₀²⁴ 为日平均蒸发比, 由于蒸发比守恒, 所以可以通过 SEBS 模型进行近似估算; R_n 为日净辐射通量, W/m²; G₀ 为土壤热通量, W/m²; λ 为汽化潜热, J/kg; ρ_w 为水的密度, 取 ρ_w = 1 000 kg/m³。

由于白天的下行通量和夜间的上行通量大概平衡, 所以日土壤热通量接近于零, 日蒸发主要取决于每天的净辐射, 即

R_n = (1 - α)K₂₄[↓] + εL₂₄ (4)

式中: K₂₄[↓] 为每天入射的总辐射量, W/m²; L₂₄ 为每天的净长波辐射, W/m²。

3 结果分析与讨论

3.1 验证与校核

为了检验 SEBS 模型计算结果的精度, 采用参考作物系数法, 依据 FAO-Penman 模型计算参考作物蒸散发量, 将其与 SEBS 模型计算结果进行对比。计算公式如下:

E_{ET} = K_cE_{Tr} (5)

式中: E_{ET} 为日蒸散发量, mm; E_{Tr} 为由 FAO-Penman 模型计算的蒸散发量^[16]; K_c 为作物系数, 可根据

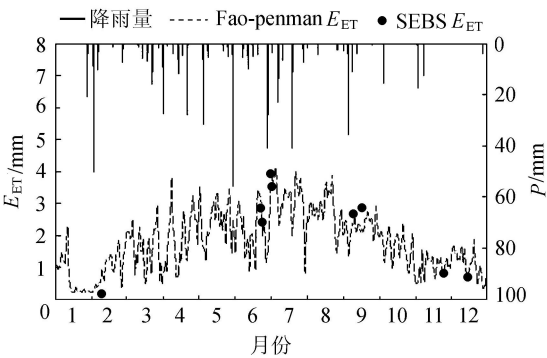


图 2 两种方法计算的日蒸散发量(2008 年)

FAO-56 推荐的 84 种作物的标准作物系数,利用单值作物系数法进行计算。

图 2 展示了流域参考作物系数法估算蒸散发与 SEBS 模型计算结果的比较。从图 2 可知,两者较为接近,部分 SEBS 模型计算结果与参考作物法估算的蒸散发值有偏差,但总体吻合较好,可认为 SEBS 模型模拟的结果基本合理。

3.2 反演结果的时空分布

3.2.1 总辐射量及净辐射通量

研究区 2008 年 9 月 8 日卫星过境时刻的平均太阳总辐射量为 1114 W/m^2 。从当日的地表净辐射通量的空间分布特征(图 3)中可以看出,对应于土地利用/土地覆被情况(图 4),常绿阔叶林和针叶林地区所获得的净辐射最大;净辐射随海拔高度的增

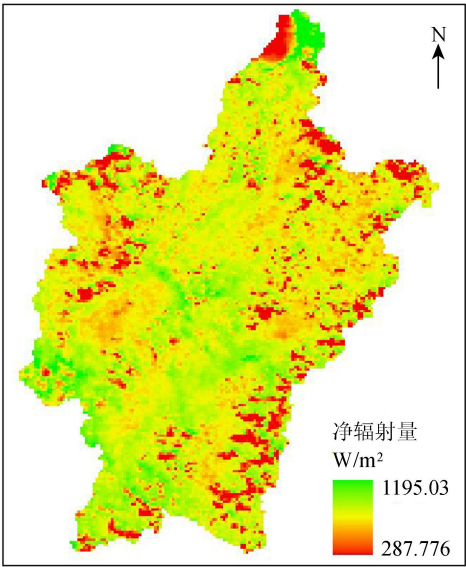


图 3 2008 年 9 月 8 日赣江上游流域净辐射量的空间分布

加而增大,在一些山间盆地及谷地,净辐射量较低。经过计算,净辐射平均值为 855 W/m^2 。

计算结果显示,净辐射量在 2008 年四季中的分布规律较为明显,且与总辐射量有良好的一致性。净辐射总量的最小值出现在 1 月份和 12 月份,夏季 7 月 3 号的净辐射总量最大(图 5)。净辐射量年内分布规律为:1 月、2 月和 12 月的冬季净辐射总量水平是全年最低的时期,而夏季是净辐射最大的时期,春季和秋季位于两者之间。

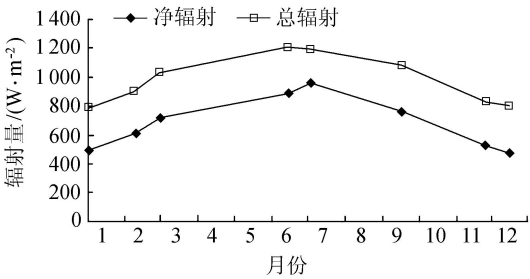


图 5 净辐射量和总辐射量的年内分布

3.2.2 归一化植被指数

计算表明,地表温度与地物类型有很好的相关性;温度较高的主要分布在农田和灌木丛或者植被稀疏的草甸地区,而地表温度较低地区一般位于植被较好或水体区域。

植被指数是指能较好地反映植被的生长状况及空间分布,反映植被生物量和覆盖度等生物物理特征的量^[17]。其中归一化植被指数 I_{NDVI} 定义为

$$I_{NDVI} = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red}) \quad (6)$$

式中: R_{NIR} 为近红外波段的反射率; R_{Red} 为红光波段的反射率。

由式(6)可以判别, I_{NDVI} 的取值范围为 $-1.0 \sim 1.0$ 。

2008 年 9 月 8 日赣江上游流域的 I_{NDVI} 空间分布特征如图 6 所示,该流域的 I_{NDVI} 平均值在 0.30 左右。林地的植被归一化指数最高,流域各支流的上游即山顶区域植被较好, I_{NDVI} 值最高可达到 0.6 以上;而水域、耕地(多分布在水体周围)、灌木及少数高山草甸区域相对较低,某些地区为零;同样山谷及河流周围植被稀疏, I_{NDVI} 值相对较低,与土地覆被(图 4)调查数据对比,一致性较好。

3.2.3 日蒸散发量

2008 年 9 月 8 日赣江上游流域蒸散发量空间分布见图 7。由图 7 可以发现,林区的蒸散发量相对较大,而耕地、河流地区的蒸散发量相对较小。计算得到该流域 9 月 8 日的平均蒸散发量为 2.96 mm 。

受气温年周期变化的影响,该地区的蒸散发量也呈现年周期的变化趋势。在 1 月、2 月、3 月、6 月、7 月、9 月、11 月和 12 月几个代表日中,由于冬

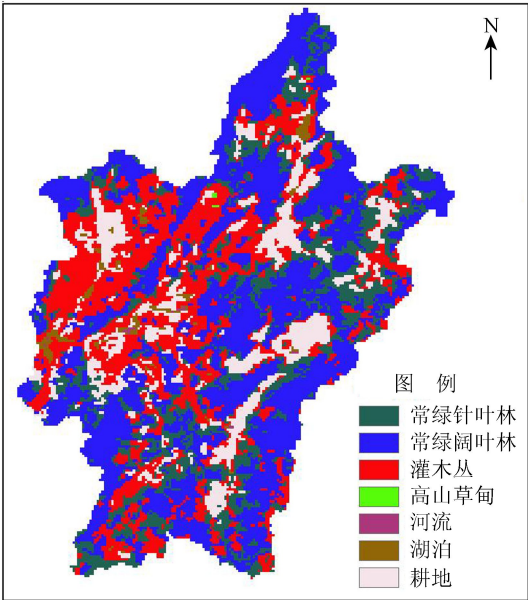


图 4 赣江上游流域土地覆被分布

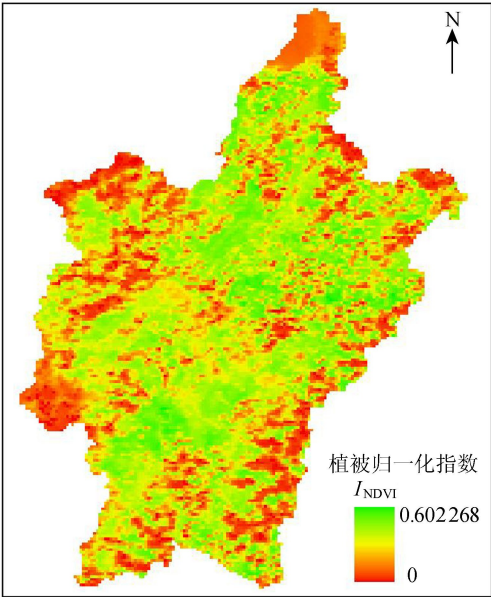


图 6 2008 年 9 月 8 日赣江上游流域 I_{NDVI} 的空间分布

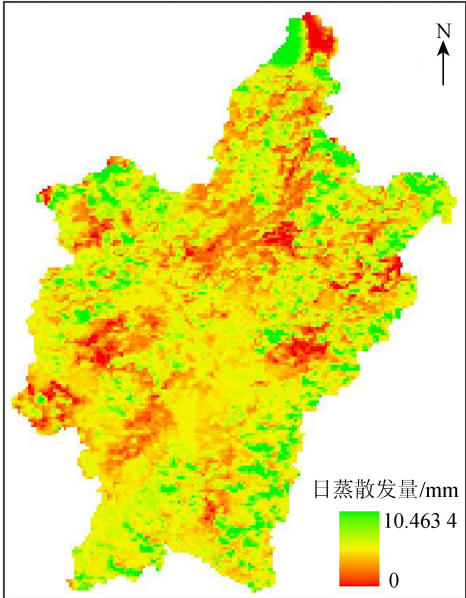


图 7 2008 年 9 月 8 日赣江上游流域蒸散发量的空间分布
季气温较低, 植被覆盖相对较少, 不利于陆面蒸散发, 所以 1 月蒸散发量最小; 而 7 月气温达到最大值, 降雨也比较多, 所以蒸散发量也最大。总而言之, 日蒸散发量夏秋较大, 冬季较小, 夏季是全年蒸散发量最大的季节, 如图 8 所示。

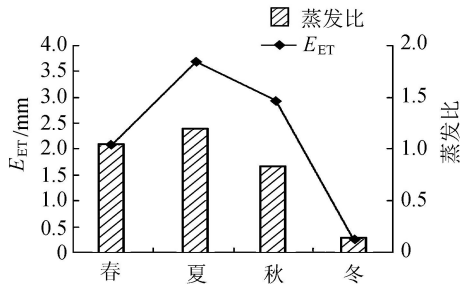


图 8 赣江上游流域蒸散发量与蒸发比的年内变化

3.3 土地覆被与反演结果的关系

土地覆被类型是指经过长期演变或人类活动等原因形成的不同地物覆盖的地表。不同地表覆盖具有不同的下垫面物理特性, 如太阳辐射的吸收能力、地表反射率等, 而能量的不均性必然导致地表蒸散发量的不均。从表 1 可以看出, 研究流域基本以林地和灌木为主。对于不同地表覆盖, 蒸散发量空间分布会受到较大影响, 其中, 林地>灌木丛>耕地, 水体和草甸的面积较小, 不参与对比。

表 1 赣江上游流域不同地表覆盖的反演参数

土地覆被	I_{DNVI}	净辐射量/ ($W \cdot m^{-2}$)	日蒸发量/ mm	面积 比率/%
常绿阔叶林	0.2846	859.69	3.10	18.63
常绿针叶林	0.3048	855.21	3.00	41.56
灌木丛	0.2949	852.21	2.91	26.08
高山草甸	0.3875	868.86	2.51	0.03
河流	0.2987	868.51	2.54	0.07
湖泊	0.2892	846.98	2.71	1.31
耕地	0.3239	844.57	2.58	12.32
均值	0.2961	854.87	2.96	100

3.4 植被指数与蒸散发量关系

地表植被在近红外波段有较高的反射率, 叶绿素在红光波段的吸收强, 因此在该波段具有较低的反射率, 并且植被越好, 植被覆盖率越高, I_{NDVI} 值越大。水体在红光波段的反射率比近红外波段的反射率大, 其 I_{NDVI} 值小于 0。 I_{NDVI} 是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子, 而不同植被覆盖度对下垫面的水热交换影响亦不同^[18]。

蒸散发量具有随着植被盖度增加而增大的趋势。表 2 是 2008 年赣江上游流域季节代表日各种土地覆被类型的日蒸散发量比较, 结果显示森林地区日均蒸散发量最大, 水体的日均蒸发量最小, 说明森林具有促进水文循环的功能。植被较好的地区, 持水能力强, 地下水含量也较大, 这些地区可以通过植被根系将包气带水、甚至地下潜水带到地表, 以植被蒸腾的方式进入大气, 地表蒸散发量往往相对较大。耕地的日均蒸散发量在夏季比林地还高, 说明此时人类活动的影响比较剧烈。

表 2 2008 年赣江上游流域季节代表日各种土地覆被类型日蒸散发量的比较 mm

土地覆被	E_{ET}			
	春	夏	秋	冬
常绿阔叶林	3.17	3.86	3.10	0.75
常绿针叶林	2.92	3.97	3.00	0.70
灌木丛	3.01	3.88	2.91	0.59
高山草甸	2.24	3.90	2.51	0.57
河 流	2.55	3.30	2.54	0.51
湖 泊	2.82	3.54	2.71	0.58
耕 地	2.87	3.98	2.58	0.52

对 2008 年 6 月 23 日的日蒸散发量与 I_{NDVI} 关系进行统计, 并将 I_{NDVI} 值按 0.1 为间隔求取平均值进行统计, 结果见图 9。由图 9 可知, 植被指数小于 0.14 左右时, 蒸散发量随 I_{NDVI} 的增加而急剧下降, 当植被指数大于 0.14 时, 地表蒸散发量又有逐渐增大的趋势。这主要是因为地表水体的植被同样较差, 其蒸散发量基本等于该地区的潜在蒸散发量。但是当 I_{NDVI} 值达到 0.3 后, 日蒸散发量随着 I_{NDVI} 的变化趋于稳定^[19]。

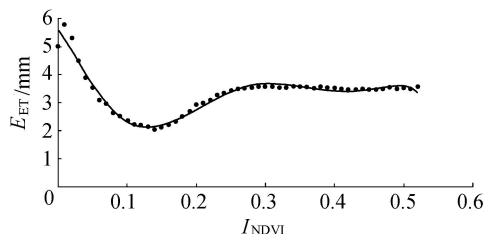


图 9 2008 年 6 月 23 日赣江上游流域
日蒸散发量与 I_{NDVI} 变化关系

4 结论与展望

本研究中应用的 SEBS 模型原理清晰, 易于实现, 模拟的地表蒸散发量在较合理的范围内, 与结合 FAO-Penman 模型和参考作物系数法计算的日蒸散发量结果吻合较好, 可应用于湿润地区地表蒸散发量的估算。计算结果表明, 流域的蒸散发量年内分布与太阳辐射一致, 夏季较高, 冬季最小; 空间上与土地利用/土地覆盖情况具有较高的相关性, 其中林地最高, 灌木次之, 耕地最小; 流域蒸散发量与 I_{NDVI} 具有正相关性。

SEBS 模型所应用的能量平衡法原理需要将遥感数据与气象观测数据相结合, 气象数据是单点连续时间观测, 而遥感数据是空间范围瞬时获取, 所以在资料缺乏地区或者气象观测站点分布不均匀的地区的应用仍存在局限^[20]。笔者所用土地利用/土地覆盖数据为全年平均数据, 无法体现土地覆盖年内变化情况, 对模拟结果有影响, 而且遥感影像是一个瞬间的状态, 这就使得计算结果具有一定的不确定性, 有待今后进一步探讨。

参考文献:

[1] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307. (ZHANG Ronghua, DU Junping, SUN Rui. Review of estimation and validation of regional evapotranspiration based on remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(12): 1295-1307. (in Chinese))

[2] 张晓涛, 康绍忠, 王鹏新, 等. 估算区域蒸腾量的遥感模型对比分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 6-13. (ZHANG Xiaotao, KANG Shaozhong, WANG Pengxin, et

al. Comparative analysis of regional evapotranspiration estimation models using remotely sensed data [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 6-13. (in Chinese))

[3] SU Zhongbo, JACOBS J. Advanced earth observation land surface climate[R]. Netherlands: Publications of National Remote Sensing Board, 2001: 91-108.

[4] SU Zhongbo. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2002, 6(1): 85-99.

[5] 杨永民, 冯兆东, 周剑. 基于 SEBS 模型的黑河流域蒸散发[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 1-6. (YANG Yongmin, FENG Zhaodong, ZHOU Jian. Evapotranspiration in Heihe River Basin based on SEBS model [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2008, 44(5): 1-6. (in Chinese))

[6] 宋文献, 江善虎, 杨春生, 等. 基于 SEBS 模型的老哈河流域蒸散发研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 115-118. (SONG Wenxian, JIANG Shanhu, YANG Chunsheng, et al. Evapotranspiration estimation in Laohahe Basin based on SEBS model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(5): 115-118. (in Chinese))

[7] 占车生, 李玲, 王会肖, 等. 台湾地区蒸散发的遥感估算与时空分析[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 405-412. (ZHAN Chesheng, LI Ling, WANG Huixiao, et al. Estimation and time-space analysis of the regional evapotranspiration using quantitative remote sensing in Taiwan Area [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(4): 405-412. (in Chinese))

[8] 何延波, SU Zhongbo, LI Jia, 等. SEBS 模型在黄淮海地区能量通量估算中的应用[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1092-1100. (HE Yanbo, Su Zhongbo, LI Jia, et al. Estimation of surface energy flux using surface energy balance system (SEBS) in the Yellow-Huaihe-Haihe River Regions, China [J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(6): 1092-1100. (in Chinese))

[9] LI Jia, SU Zhongbo, HURK B, et al. Estimation of sensible heat flux using the surface energy balance system (SEBS) and ATSR measurements [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(3): 75-88.

[10] 周剑, 程国栋, 李新, 等. 应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 679-687. (ZHOU Jian, CHENG Guodong, LI Xin, et al. Application of remote sensing technology to estimate river basin evapotranspiration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 679-687. (in Chinese))

[11] 刘健, 张奇, 许崇育, 等. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 139-145. (LIU Jian, ZHANG Qi, XU Chongyu, et al. Change of actual evapotranspiration of Poyang Lake Watershed and associated influencing factors in the past 50 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(2): 139-145. (in Chinese))

(下转第 66 页)

参考文献:

[1] 董艳萍,王欣,李治明,等. 城镇污水处理厂污泥处理技术探讨[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷). 北京:中国环境科学出版社,2013:5481-5483.

[2] 高欣,马鹏飞. 工业废水对城市污水处理厂设计及运行的影响[J]. 环境科学与管理, 2006,31(3):72-78. (GAO Xin, MA Pengfei. The influence on design and operation of sewage treatment plant by industrial sewage [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(3): 72-78. (in Chinese))

[3] 余杰,田宁宁,陈同斌,等. 污泥农用在我国污泥处置中的应用前景分析[J]. 给水排水,2010,36(增刊1): 113-115. (YU Jie, TIAN Ningning, CHEN Tongbin, et al. Analysis and Prospects of sludge in agriculture on sludge disposal in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010,36(S1):113-115. (in Chinese))

[4] 徐兴华. 城市污泥农用的农学和环境效应研究[D]. 北京:中国农业科学院,2008.

[5] 宋秀兰,周美娜. 污泥预处理技术的研究现状和前景[J]. 水资源保护,2011,27(6):70-74. (SONG Xiulan, ZHOU Meina. Research progress and prospect of sludge pretreatment technology[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(6): 70-74. (in Chinese))

[6] 王世杰. 污泥处理与处置技术研究[J]. 中国环境管理干部学院学报,2005,15(4):67-70. (WANG Shijie. Approach to techniques of sludge disposal[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2005, 15(4): 67-70. (in Chinese))

[7] 李鸿江,顾莹莹,赵由才. 污泥资源化利用[M]. 北京:冶金工业出版社,2011:1-10.

[8] MACNICOL R D, BECKETT P H T. The distribution of heavy metals between the principal components of digested sewage sludge[J]. Water Research, 1989, 23(2): 199-206.

[9] 周立祥,沈其荣,陈同斌,等. 重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态[J]. 环境科学学报,2000, 20(3): 269-274. (ZHOU Lixiang, SHEN Qirong, CHEN Tongbin, et al. Distribution and chemical form of heavy metals in the principal components of undigested sludge [J]. ACTA Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(3): 269-274. (in Chinese))

[10] 岩井重久,申丘澈,名取真. 污水污泥处理[M]. 吴自迈,译. 北京:中国建筑工业出版社,1981:10-14.

[11] 何品晶,顾国维,李笃中,等. 城市污泥处理与应用[M]. 北京:科学出版社,2003:28-32.

[12] 孙颖,陈玲,赵建夫,等. 测定城市生活污泥中重金属的酸消解方法研究[J]. 环境污染与防治,2004,26(3):170-172. (SUN Ying, CHEN Lin, ZHAO Jianfu, et al. Comparison of acid digestion methods for the determination of heavy metals in municipal sludge[J]. Environmental Pollution and Control, 2004, 26(3): 170-172. (in Chinese))

(收稿日期:2013-12-03 编辑:高渭文)

+++++

(上接第 37 页)

[12] 裴超重,钱开铸,吕京京,等. 长江源区蒸散量变化规律及其影响因素[J]. 现代地质,2010,24(2):362-368. (PEI Chaozhong, QIAN Kaizhu, LYU Jingjing, et al. The variation of evapotranspiration and the impacts on it in the source region of the Yangtze River[J]. Geoscience, 2010, 24(2):362-368. (in Chinese))

[13] 周瑜佳,袁飞,任立良,等. 赣江上游土地覆被变化的水文响应研究[J]. 水电能源科学,2012,30(1):12-37. (ZHOU Yujia, YUAN Fei, REN Liliang, et al. Hydrologic responses of land cover change in upper reaches of Ganjiang River[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1):12-37. (in Chinese))

[14] 杨春杰. 海流兔流域地表蒸散量估算及空间分布研究[D]. 北京:中国地质大学,2011.

[15] SU Zhongbo, PELGRUM H, MENENTI M. Aggregation effects of surface heterogeneity in land surface processes [J]. Hydrol Earth Sys Sci, 1999, 3(4): 549-563.

[16] 焦醒,刘广全,匡尚福,等. Penman-Monteith 模型在森林植被蒸散研究中的应用[J]. 水利学报,2010,41(2): 245-252. (JIAO Xing, LIU Guangquan, KUANG Shangfu, et al. Review on application of Penman-Monteith equation to studying forest vegetation evapotranspiration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 245-252. (in Chinese))

[17] 魏伟,赵军,王旭峰. 天祝高寒草原区 NDVI, DEM 与地表覆盖的空间关系[J]. 干旱区研究,2008,25(3):394-401. (WEI Wei, ZHAO Jun, WANG Xufeng. Study on the spatial relationships between NDVI, DEM and vegetation cover in the Tianzhu Alpine Grasslands based on TM/ETM[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 394-401. (in Chinese))

[18] LIN Yupin, VERBURG P H, CHANG Chiru, et al. Developing and comparing optimal and empirical land-use models for the development of an urbanized watershed forest in Taiwan [J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(4): 242-254.

[19] 高洋洋,左其亭. 植被覆盖变化对流域总蒸散发量的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(2):26-31. (GAO Yangyang, ZUO Qiting. Impact research of vegetation cover change on the total evapotranspiration in a watershed[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(2): 26-31. (in Chinese))

[20] 白娟,杨胜天,董国涛,等. 基于多源遥感数据的三江平原日蒸散量估算[J]. 水土保持研究,2013,20(3): 190-195. (BAI Juan, YANG Shengtian, DONG Guotao, et al. Estimation of daily evapotranspiration based on the multi-source remote sensing data in the Sanjiang Plain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 190-195. (in Chinese))

(收稿日期:2013-12-18 编辑:徐娟)