

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2012.05.008

遥感估算蒸散发及其在中国盘山风景区水资源保护中的应用

姚立英^{1,2}, 马 喆¹, 陈 璐¹, 吉 晟³

(1. 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191; 2. 河北工业大学经济管理学院, 天津 300130;
3. 天津市联合环保工程设计有限公司, 天津 300191)

摘要:基于 2006—2007 年中巴资源卫星(ZY01/ZY02)影像数据,采用统计经验法估算盘山风景名胜区的蒸散发量为 3 273.1 万 m³,在此基础上建立区域水平衡模型。结果表明:地下水补给量 1 111 m³的保证率为 60%,反推入渗系数为 0.2,区域地下水资源利用量占补给水量的 56.6%,其中农业用水量占总用水量的 55.5% 以上,水资源利用效率低,且农业面源污染对地下水水质构成威胁。指出该地区的地下水资源保护应强化大气降水的节流,增加地下水补给量;降低农业用水量,提高用水效率;解决农业面源污染和工业点源污染。

关键词:盘山风景名胜区;遥感;蒸散发;地下水

中图分类号:TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2012)05-0038-05

Evapotranspiration estimation based on remote sensing and its application to water resources protection in Panshan scenic spots of China

YAO Li-ying^{1,2}, MA Zhe¹, CHEN Lu¹, JI Sheng³

(1. Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China;
2. School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
3. Tianjin United Environmental Protection Engineering Design Co., Ltd., Tianjin 300191, China)

Abstract: Based on ZY01/ZY02 series images from 2006 and 2007, the evapotranspiration in the Panshan scenic spots was evaluated to be 32.731 million m³ using the statistical empirical method, and a regional water balance model was established. The results show that the assurance rate for groundwater recharge of 11.11 million m³ was 60%, the derived infiltration coefficient was 0.2, the consumption of regional groundwater accounted for 56.6% of the recharge, of which the agricultural water consumption accounted for more than 55.5% of the total water consumption, and agricultural non-point source pollution was a threat to the quality of groundwater. Therefore, to protect groundwater in the region, focuses should be placed on strengthening precipitation throttling for the increase of groundwater recharge, reduction of agricultural water consumption, improvement of water utilization efficiency, and control of agricultural non-point source pollution and industrial point source pollution.

Key words: Panshan scenic spots; remote sensing; evapotranspiration; groundwater

水资源作为一种重要的自然资源与社会、经济、生态环境构成水资源复合系统^[1],是国家、地区,甚至工业项目发展必须考虑的综合问题。天津盘山风景名胜区水资源以地下水为主,由于特殊的岩体和断层结构,地下水和地表水为相对闭合的流域系统。

但是由于缺少可利用地下水资源数据,导致该区域存在盲目开发利用水资源的问题。

天津盘山风景名胜区的水资源补给主要是大气降水,在已知水资源补给和储排条件下,合理估算蒸散发量 E 对于确定区域地下水资源利用至关重要。

作者简介:姚立英(1975—),女,高级工程师,博士研究生,研究方向为环境管理。E-mail:lavender_yao@foxmail.com

笔者利用遥感影响数据分析区域内的植被蒸散发量,建立地下水平衡图,指导中国天津盘山风景名胜区水资源利用。

1 植被蒸散发量估算模型

对蒸散发量的估算国际上已有 200 a 的历史,20 世纪 80 年代以前基于 Dalton 理论建立了一系列的经验公式,80 年代以后主要是应用改进的彭曼公式^[2]。目前,确定作物蒸散发量的主要方法有空气动力学法、波文比能量平衡法、遥感法、水量平衡法^[3]。应用遥感技术估算区域蒸散发量是经济可行的方法。

应用遥感技术研究区域蒸散发量中,地表能量平衡方程和 Penman-Monteith 阻力模型是物理基础坚实且应用最广的方法^[4],具体模型有 SEBAL 模型、植被指数-温度梯度模型、半经验模型、瞬时蒸散发量时间尺度扩展等^[5]。

笔者采用统计经验法进行分析,该法是由 Jackson 等^[6]于 1977 年提出,由 Seguin 等^[7-8]改进的用遥感的冠层辐射表面温度估算农田蒸散发量的回归模型,模型所需输入的参数较少,但可以很好地模拟有不同植被覆盖度的各种下垫面的复杂蒸发蒸腾机理,利用该模型可以估算出合理的蒸散发量。

笔者利用美国 Idaho 大学设计的 Ref-et 软件包计算区域蒸散发量。模型及参数如下:

$$R_n - L_e = B(T_r - T_o)^n \tag{1}$$

式中: R_n 为日辐射量; L_e 为潜热通量; B 为日感热通量的平均总传导率; T_r 为地方时 13:00 时的地表温度; T_o 为地表上 50 m 处气温; n 为非中性层结净力稳定度修正系数。

计算 B 、 n 的值时需要引入归一化植被指数 I 。

$$N^* = \frac{I - I_0}{I_{100} - I_0} \tag{2}$$

式中: N^* 为观测角度,受传感器飘移及大气校正的不确定性的影响较小; I_{100} 为植被覆盖度为 100% 的 I 值; I_0 为裸土的 I 值。

$$B = 0.0109 + 0.051N^* \\ n = 1.067 - 0.372N^* \tag{3}$$

在已知潜热通量 L_e 时,可以根据下式可以计算出瞬时的蒸散发量 E_{inst} 。

$$E_{inst} = 3600 \frac{L_e}{\lambda} \tag{4}$$

式中, λ 为蒸发潜热($2.4 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{mm}$)。

$$f = \frac{E_{inst}}{E_r} \tag{5}$$

式中: f 为潜在蒸散发系数,定义为每个像元的瞬时

蒸散发与由气象数据计算的潜在蒸散值的比值; E_r 为日水面蒸发量。

最后,1 d 的蒸散发量 E_{day} 可由下式来计算。

$$E_{day} = fE_{r24} \tag{6}$$

式中: E_{r24} 为影像获得当天的蒸散发量。

2 研究区域概况

2.1 自然环境概况

中国盘山风景名胜区位于天津北部蓟县,规划面积 106 km²,地势北高南低,主峰挂月峰海拔 864.4 m,最低处在官庄镇南部边缘,海拔高度仅有 17 m。地貌类型为山地和平原两种基本形态。

主要植被类型是针叶林、针阔混交林、阔叶林和灌草丛。针叶林主要分布在 360 ~ 800 m 以上地区,其中油松林在盘山分布广泛,常见于海拔 360 ~ 800 m 之间的山地阴坡及半阴坡。群落覆盖度达 90% 左右,林下伴生多种灌木和草本植物,具有原始油松林的特点;侧柏林呈片状分布在海拔 400 ~ 600 m 的阳坡及半阴坡。针阔叶混交林分布在 300 ~ 500 m 的半阴坡,常有小片的油松林、侧柏林与栓皮栎林、麻栎林呈镶嵌分布,形成天津市及华北地区少见的针阔叶混交林群落。总覆盖度 80% ~ 90%。落叶阔叶林广泛分布在低山丘陵区,从 100 ~ 700 m 的阳坡和半阴坡。以壳斗科的栓皮栎林、麻栎林、槲栎林、槲树林最为常见,是水源涵养林的主要植被类型,也是华北暖温带落叶阔叶林地带性植被类型的典型代表。除森林植被之外,大面积低山丘陵区均为灌草丛植被类型所覆盖,该植被类型由灌木、草本植物所组成^[9]。

2.2 社会经济概况

盘山风景名胜区规划面积 106 km²,其中许家台乡占地约 28 km²,官庄镇占地约 78 km²,39 个村庄有 32 088 人,目前风景区内居民产业结构以农业为主,外出务工为辅,农民年平均收入 7 500 元左右。

2007 年盘山风景名胜区接待游客 51 万人次,实现旅游收入 2 734 万元。游客平均年增长率为 10% 左右,人均消费平均年增长率为 15% 左右。

2.3 水资源概况

2.3.1 大气降水

根据蓟县统计年鉴,1957—2006 年蓟县地区多年平均降水量为 655.6 mm,年内降水量分配极不均匀,6—9 月降水量约占全年降水量的 80%。盘山风景名胜区内汇水区面积为 84.73 km²,按年平均降水量 655.6 mm 计算,折合降水量为 5 554.9 万 m³/a。

2.3.2 河流

盘山地区河流属 沟河水系,主要河流有漳河和

秃尾巴河。因盘山与华北大平原以断层接触,缺少过渡的丘陵地区,加之盘山地区地势北高南低,高差大,多地形雨,故河流自北向南流,且源短流急。

根据蓟县多年统计资料,区域内降水时空分布不均,河流径流与降水分布相一致,规划区径流折合水量为1 170.8 万 m³/a。

2.3.3 地下水

地下水的补径排条件受地貌、构造、含水介质、埋藏特征和边界条件的控制。从宏观上看,盘山主体为中生界盘山花岗岩体,分布面积为60 km²,为印支期侵入岩,结构致密坚硬,本身为不透水隔水岩层,然而花岗岩节理发育,球状风化明显,大气降水极易渗入风化层,富含碎屑岩孔隙潜水。特别是山间小盆地、河谷地带、山麓地区为厚层第四纪松散堆积物,赋水条件较好,为松散地层孔隙水分布区,是区域的地下水补给区。

岩体和岩脉对地下水导向作用明显。盘山地区北后子峪辉长辉绿岩脉和许家台辉长辉绿岩脉,分布在盘山花岗岩体的东西两侧,与盘山花岗岩体呈弧形展布,恰好成为盘山地区地下水运移的天然挡水坝,使盘山花岗岩体与两侧岩脉之间以及盘山南麓白云岩地层的地下水十分富集。

盘山地区南部分布着一条横亘东西的蓟县大断层,是蓟县境内规模最大的压扭性断裂。该断层由于受区域性地壳应力的持续作用,局部地带形成糜棱岩化,该断层在很大程度上控制了北部基岩地下水对南部平原的补给,而在此一线汇集,因而沿断层线北侧有不少泉水出露,形成一条东西向分布的泉群带。

山前平原区地下水补给接受来自山区的侧向径流补给,是地下水的排泄区,排泄方式为开采和潜水蒸发。

3 基础资料收集

3.1 遥感数据

研究数据来源为2006—2007年中巴资源卫星(ZY01/ZY02)数据,中巴资源卫星轨道号373/55,地图投影UTM,地球坐标WGS_84,传感器CCD,中巴资源卫星的其他数据见表1。对影像的处理包括几何校正、辐射校正和地面参数的提取。

表 1 中巴资源卫星参数

影像时间	中心纬度/(°)	中心经度/(°)	地图投影	角度/(°)
2006 年 12 月	39.95	117.47	UTM	5.10
2007 年 3 月	39.97	117.33	UTM	5.66
2007 年 6 月	39.93	117.47	UTM	0
2007 年 9 月	39.93	117.47	UTM	7.86

3.2 气象数据

气象参数见表2^[10]。

表 2 气象参数

时间	日最高温度/F	风速/(m·s ⁻¹)	日照百分率/%	辐射/(kcal·cm ⁻²)
2006 年 12 月	36	2.1	67	5.7
2007 年 3 月	51	2.5	65	11.6
2007 年 6 月	86	2.4	61	15.0
2007 年 9 月	78	1.7	66	11.0

4 数据分析

4.1 植被类型遥感分析

采用监督分类和非监督分类相结合的办法,即依据波谱统计特征,判别像元的类别归属,在监督分类的基础上给定自然集群的数目,由计算机自动进行分类,之后根据先前建立的模板来判读地物的类别归属,以此提高分类的精度。该区域的5大类LULC(土地利用/土地覆盖)类型分别为无植被覆盖地表、水体、阔叶植物、针叶植物、农田及草地类。

为了增强图像信息,减少数据冗余,提高地表覆盖信息特征的监测能力,对各图像进行主成分分析(KL变换),KL变换的算法为:计算多波段图像数据的统计特征参数,得到反映各波段间关系的协方差矩阵,然后求其特征值和特征向量。KL变换中前3个主分量包含了图像数据99.23%的信息,其余主分量几乎全是噪声。经过变换后,得出3个波段(第一、二、三主分量),在红、绿、蓝彩色组合中,生长旺盛的农作物(包括草地)呈现亮紫色,阔叶林呈深绿色,林地呈黄色。然后采用I指数(归一化植被指数)对主成分进行修正,以提高对植被的判别的精度^[11],I指数介于-1到1之间。负值表示地面覆盖为云、水、雪等;0表示有岩石或裸土;正值表示有植被覆盖,且随覆盖度增大而增大。

遥感影像中,归一化植被指数值为近红外波段的反射值与红光波段的反射值之差比上两者之和,见图1。

$$I = \frac{N_{ir} - R}{N_{ir} + R}$$

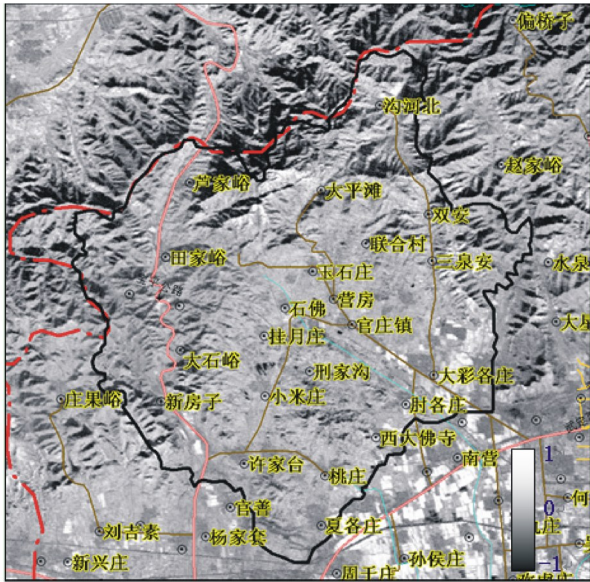
(7)

式中: N_{ir} 为近红外波段的反射值; R 为红光波段的反射值。

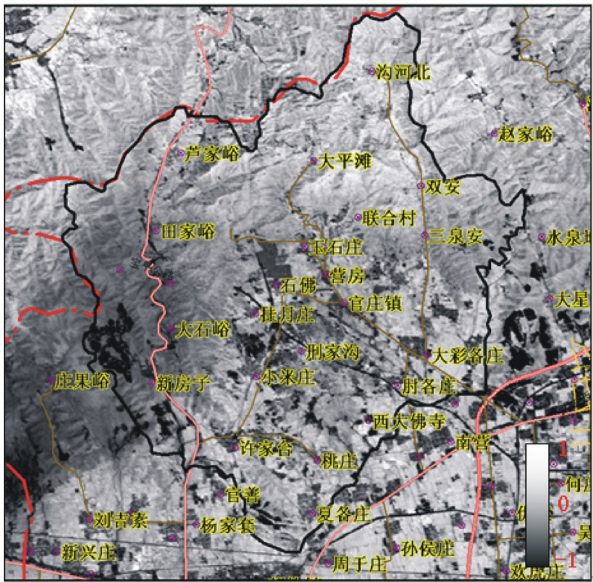
将I值作为一个重要的参考量对项目区地表植被进行识别,同时利用归一化植被指数(表3)计算日感热通量的平均总传导率和非中性层结净力稳定度修正系数。

表 3 归一化植被指数值

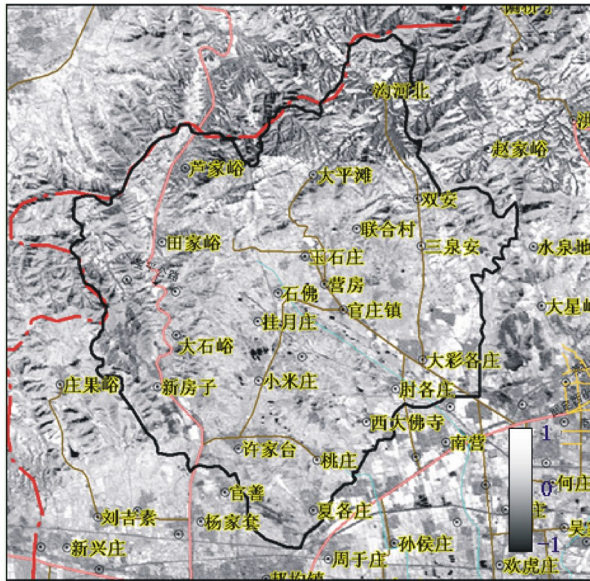
影像时间	最小值	最大值	平均值
2006 年 12 月	-0.533	0.244	-0.062
2007 年 3 月	-0.667	0.316	0.016
2007 年 6 月	-0.278	0.591	0.387
2007 年 9 月	-0.278	0.591	0.387



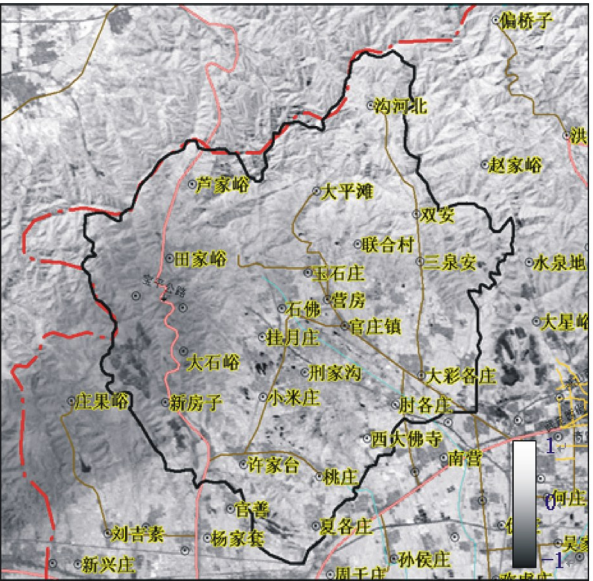
(a) 2006年12月



(c) 2007年6月



(b) 2007年3月



(d) 2007年9月

图1 归一化植被指数

使用 ENVI 软件对主成分分析得到的结果进行最大似然法监督分类,从分类图像中收集本项目各种地物类型的纯样本信息,结合土地利用类型图,确定归属,对样本进行分类。监督分类统计结果见表4。

表4 监督分类统计结果 km²

时间	面积					
	无植被覆盖地表	水体	阔叶植物	针叶植物	农田及草地	植被
2006年12月	79.25	2.75	0.00	15.39	8.60	24.00
2007年3月	27.73	0.97	1.53	16.11	59.66	77.92
2007年6月	21.01	0.02	52.50	19.50	12.97	84.97
2007年9月	8.98	0.02	43.75	17.13	36.12	97.00

4.2 蒸散发量计算分析

经计算,盘山地区 2007 年度蒸散发量为 3 273.1 m³。

4.3 地下水可开采量

盘山风景名胜区的水源补给主要来自大气降水,在相对封闭的流域内,地下水补给量为大气降水量与多年平均径流量、蒸散发量和地表水储水变化的差值,而地下水多年平均补给量相当于地下水多年平均可开采量。

$$Q = P - R - E - \alpha \quad (8)$$

式中: Q 为地下水补给量; P 为大气降水量; R 为多年平均径流量; E 为蒸散发量; α 为地表水储水变化。

盘山风景名胜区内大气降水量为 5 554.9 万 m³/a,地表径流量为 1 170.8 万 m³/a,蒸散发量为 3 273.1 万 m³/a,地表储水变化为 0,则可补给量为 1 111.0 万 m³/a。

根据大气降水入渗水补给量公式反推入渗系

数,以验证上述结果,公式如下:

$$Q = AKP_{rec} \tag{9}$$

式中: Q 为地下水补给量; A 为汇水区面积; K 为降雨平均入渗系数; P_{rec} 为多年平均降雨量。

盘山地区汇水面积为 84.73 km²,多年平均降雨 655.6 mm,根据入渗量反推入渗系数为 0.2,符合该地区入渗系数介于 0.14~0.26 之间的经验值^[12],证明通过遥感手段获取的地下水入渗量可靠。

5 盘山地区水资源利用分析

5.1 区域水资源利用现状

盘山风景名胜区内现状生产和生活用水主要以开采地下水为主,仅有少量农业灌溉采用地表水。大规模集中开采地下水主要集中在官庄镇和许家台乡人口密集处:官庄镇盘山供水站现状供水能力为 8 000 m³/d,共有 3 眼井,井深 200 m 左右,开采深层地下水,供官庄镇内的企业和居民及规划区使用。许家台乡目前已建成日供水能力为 10 000 m³ 的供水站 1 座,共 6 眼井,井深 200~280 m,开采深层地下水,配套工程尚在建设过程中。

a. 常住人口用水量。盘山风景名胜区内人员包括常住人口和管理人员,2007 年常住人口为 33 028 人,管理人员为 360 人,总用水量为 121.9 万 m³/a。

b. 游客用水量。2007 年盘山风景名胜区内游客数量约 51 万人,散客用水量为 1.5 万 m³/a,住宿游客用水量为 3.8 万 m³/a,游客总用水量为 5.3 万 m³/a。

c. 工业用水量。盘山风景名胜区内工业企业主要有盘山啤酒厂、雀巢矿泉水厂、今晚润天矿泉水厂、吉华化工厂、7 家小矿泉水厂、10 家小食品厂、10 家疗养院等。以上企业用水均取用地下水,总用水量为 189.6 万 m³/a,新鲜用水量为 152.1 万 m³/a。

d. 农灌用水量。盘山风景名胜区内农业用水主要为农田灌溉用水,2007 年官庄镇当年实灌面积为 676.2 hm²,许家台乡当年实灌面积为 153.3 hm²,平均灌水定额按 4 200 m³/hm² 计,灌溉用水量为 348.4 万 m³/a。

综上所述,盘山风景名胜区内工业、居民、农灌、旅游等使用地下水的水量为 627.7 万 m³/a。地下水年均补给量为 1 111.0 万 m³/a,现状开采地下水水量占地下年均补给量的 56.6%,区域水平衡见图 2。

5.2 地下水利用问题分析

盘山地区降水量年际变化大,年降水量大于 200 mm 的保证率为 100%,大于 400 mm 的保证率为 96%,大于 600 mm 的保证率为 60%,大于 800 mm

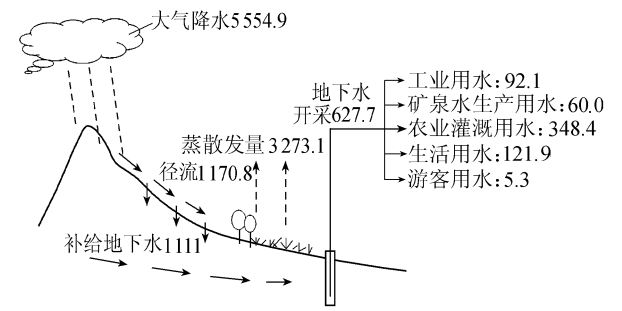


图 2 区域水平衡(单位:万 m³)

的保证率为 25%。则盘山地区年补给量能达到 1 111.0 m³ 的保证率仅为 60% 左右。盘山地下水补给周期长,由于开采量逐年加大和降水量分布不均,盘山地区出现了地下水水位下降、水景消失的现象。

目前盘山风景名胜区内不分用水水质要求、一概使用地下水的做法,如高水质的地下水被用作低水质要求的农灌等,造成优质地下水资源的浪费,尤其是深层地下水的补给需要相当漫长的时间。农灌用水占总用水量的 55.5%,普遍采取大水浸灌的浇灌方式,地下水资源的有效利用率不足 50%^[13]。

该地区农业不仅用水量大,大量施用氮肥污染地下水水质,以食品加工企业为主的乡镇企业废水直接排入沟渠或沙坑,对地下水水质构成较大威胁,区内地下水水质 NO₃⁻、NO₂⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 等组分均有不同程度的增高^[14]。而盘山被称为矿泉水田,其水质是两项达标的优质饮用天然矿泉水,作为宝贵的地下矿产资源,应该根据市场的需求进行有指导的统一规划开发。

6 结 语

盘山风景名胜区内地下水为优质矿泉水,面临水量和水质的双重威胁。地下水年均补给为 1 111.0 m³ 的保证率为 60% 左右,入渗系数为 0.2,年均开采量占年均补给量的 56.6%,农业灌溉占水资源利用量的 55.5%,大量开采导致地下水水位下降,景区内水景枯竭。对水质的污染主要来自农业氮肥施用导致的三氮面源污染和以食品加工业为主的点源污染。

因此,盘山风景名胜区内水资源保护对策为:涵养水源,加强对雨季强降水的节流,增加地下水资源补给量;发展设施农业和观光农业,提高农业用水效率,降低农业用水量,减少农业面源污染;对区域内的食品加工企业废水集中治理后排放。

参考文献:

[1] 程乖梅,何士华,邹进. 水资源可持续利用动态识别研究[J]. 水文,2010,30(5):53-56. (下转第 70 页)

- 究[J]. 水资源保护,2007,23(2):81-83.
- [14] 罗德芳,邵孝侯. 微生物絮凝剂及其在水处理中的应用[J]. 水资源保护,2009,25(S1):130-133.
- [15] 张春菊,邱廷省,匡敬忠,等. 白钨选矿废水的处理工艺及回用技术研究[J]. 水资源保护,2009,25(S1):137-139.
- [16] 贾大伟,张国珍,田秉晖. 复合絮凝剂去除册田水库污染物实验[J]. 水资源保护,2011,27(3):58-60.
- [17] 万俊杰,梁耀开,邓毛程. A3 菌产絮凝剂培养动力学及靛蓝废水脱色研究[J]. 水资源保护,2011,27(2):67-69.
- [18] ANASTAS P T, WARNER J C. Green chemistry: theory and practice [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [19] 朱洪涛. 绿色水处理剂的研究进展[J]. 工业安全与环保,2009,35(6):26-27.
- [20] 金一萍. PAFSS-PAM 复合絮凝剂处理造纸废液的研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(23):10159-10160.
- [21] 谢娟,王新强. 聚硅酸铝铁絮凝剂处理造纸黑液研究[J]. 工业用水与废水,2005,36(4):24-28.
- [22] 董君英,李丽峰,黄灵芝. 絮凝剂 PFS 和铁粉联合投加对含铅废水的吸附研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(33):10804-10805.
- [23] 蔡河山,刘国光,吕文英. 纳米 TiO_2 光催化剂可见光响应的改性研究[J]. 水资源保护,2008,24(2):86-88.
- [24] 胡涛,吴洁,何其中. 纳米 TiO_2 光催化在废水治理中的研究与应用[J]. 水资源保护,2007,23(4):77-81.
- [25] 刘泊良,张玉军,王蒲芳,等. 改性碳纳米管对水中铜离子的去除作用[J]. 应用化工,2011,40(1):68-70.
- [26] 韩晶,张小燕,余中. 我国水处理剂的研究与应用现状展望[J]. 精细石油化工,2001(3):38-42.
- [27] 葛胜祥,尹先清. 油田水处理药剂研究进展[J]. 内蒙古石油化工,2007(12):154-156.
- [28] 武春艳,柴涛,林凡聪,等. 降解六硝基芪废水用复合型微生物絮凝剂产生菌的筛选及应用[J]. 水处理技术,2011,37(1):58-61.
- [29] 郭旭辉,梁宗琦,周文霞. 1 株产絮凝剂的棉生枝孢菌株的筛选及絮凝效果研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(7):3336-3337.

(收稿日期:2011-08-01 编辑:彭桃英)

(上接第 42 页)

- [2] 张薇,蔺文静,王贵玲. 基于遥感反演河套平原区域蒸散发量研究[J]. 遥感应用,2009(6):28-31.
- [3] 康燕霞,蔡焕杰,王健,等. 夏日玉米蒸散发量计算方法的实验研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):10-15.
- [4] LI Fu-qin, LYONS T J. Estimation of regional evapotranspiration through remote sensing[J]. Journal of Applied Meteorology,1999,38:1644-1654.
- [5] 张晓涛. 区域蒸发蒸腾量的遥感估算:以民勤绿洲为例[D]. 陕西:西北农林科技大学,2006.
- [6] JACKSON R D, REGINATO R J, IDSO S B. Wheat canopy temperature: a practical requirements [J]. Water Resour Res,1997,13(3):651-656.
- [7] SEGUIN B, ITIER B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation data[J]. International Journal of Remote Sensing,1983(4):371-383.
- [8] HURTADO E, CASELLES V, ARTIGAO M. Estimating corn evapotranspiration from N Albacetearea [J]. International Journal of Remote Sensing,1995(10):202-207.
- [9] 天津市地方志编修委员会办公室,天津市蓟县盘山志编修委员会. 天津市盘山志[M]. 天津:天津社会科学院出版社,2006.
- [10] 蓟县志编修委员会. 蓟县志[M]. 天津:南开大学出版社,天津社会科学院出版社,1999.
- [11] 邱庆伦,赵鸿燕,郭剑,等. 遥感植被指数在农业生态环境监测中的应用[J]. 农机化研究,2004(7):215-217.
- [12] 马广杰. 天津蓟县山前地区采砂坑对生态环境影响调

查研究[D]. 北京:中国地质大学,2007.

- [13] 张连会,王茂悦,朱小兵,等. 蓟县地下水资源综合利用问题研究[J]. 中国水运,2009,9(5):35-36.
- [14] 李学美,赵子军,崔亚莉,等. 盘山山前地下水与矿泉水污染成因分析[J]. 水文地质工程地质,2008(1):112-116.

(收稿日期:2011-11-28 编辑:徐娟)

