

建筑日照分析中太阳位置计算公式的改进研究

徐 丰, 王 波, 张海龙

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

摘要:指出现有太阳高度角和方位角计算公式的使用在建筑物日照分析中存在的便与不足。构建辐射历计时系统,并重新定义太阳高度角和方位角的取值范围,使其随时角的日变化和年变化具备单值性从而改进了现有计算公式。根据改进后的计算公式绘制不同纬度处太阳高度角和方位角随时角的变化曲线,讨论了这些曲线的数学特征所描述的天文学和地理学现象,验证了改进后公式的正确性和通用性,对建筑、空调、结构设计人员进行建筑日照分析都具有一定的参考价值。

关键词:太阳高度角;太阳方位角;建筑日照分析

中图分类号:TK51 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)05-0130-05

Improvement upon the Formulas for Solar Position in Analysis of Sunlight Distribution in Buildings

XU Feng, WANG Bo, ZHANG Hai-long

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: The application of existing formulas to determine solar altitude and azimuth angles is inconvenient and inadequate. To improve the existing formulas, a new timing system named the Radiation Calendar was established. In this system the angles' ranges were redefined, making the angles calculated from the improved formulas single-valued and varying with hour angle. Representative curves of solar altitude and azimuth angles varying with hour angle were plotted. The mathematical distinctions of these curves astronomically and geographically describe some rules of solar position varying with time, which proves the validity and generality of the improved formulas. The results calculated using the improved formulas show simply and clearly the daily and annual variation of solar altitude and azimuth angles, which are valuable in the work of sunlight distribution analysis related to the design of buildings, air-conditioning systems and structures.

Key words: solar altitude angle; solar azimuth angle; building sunlight distribution analysis

太阳高度角和方位角是表征太阳位置的参数,确定了阳光对于地球表面任意一点的来向。如图1所示,太阳高度角是太阳(视为一质点O)与地球表面任意一点P的连线与过P点的法平面之间的夹角,记为 β ;太阳方位角是上述连线在过P点的法平面上的投影线与法平面上过P点正南方位线的夹角,记为 α 。

建筑设计中的采光方案和避光措施的选取^[1-3],空调系统设计中建筑物表面所接受太阳辐射强度的计算^[4-5],乃至结构物日照温差引起的内力计算^[6-8]等工作都可能需要把握这两个角度随时间变化的规律。这两个角度的常用计算公式为^[9]:

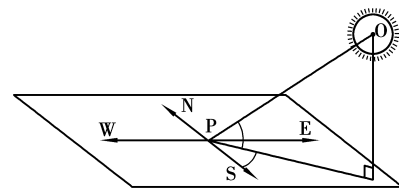


图1 太阳高度角 β 与方位角 α 的空间视图

$$\sin(A\beta) = \sin(A\varphi)\sin(A\delta) + \cos(A\varphi)\cos(A\delta)\cos(At) \quad (1)$$

$$\cos(A\alpha) = \frac{\sin(A\beta)\sin(A\varphi) - \sin(A\delta)}{\cos(A\beta)\cos(A\varphi)} \quad (2)$$

* 收稿日期:2008-05-15

基金项目:建设部研究开发项目(06-K3-14)

作者简介:徐丰(1979-),男,华中科技大学博士研究生,主要从事结构物温度效应研究。(E-mail)xufeng1979917@163.com

张海龙(联系人),男,教授,博士生导师。(E-mail)bridge113@163.com

以上式子中的 $A = \frac{\pi}{180}$, 为由弧度制向角度制转换的乘数因子(该文中所有角量均采用角度制, 单位为度($^{\circ}$))。 φ 、 δ 、 t 分别表示地表点的纬度、赤纬和时角。时角的计算式为:

$$t = \left(t_s \pm \frac{L - L_s}{15} + \frac{e}{60} - 12 \right) \times 15 \quad (3)$$

其中, t_s 为以小时为单位的地方标准时, L 为所在地点的经度, L_s 为地方标准太阳时的基准经度, e 为以分钟为单位的时差。正负号分别适用于所在地点位于东半球时和西半球的情形。

式(1)和式(2)在工程实践中存在着以下运用上的不便:1)计算时角时既要考虑地方标准时与世界标准时的差值,还要计入时差的影响。地方标准时在全球的 24 个时区各不相同,须区别选取,东西两个半球的正负号也须加以区分,而时差效应在建筑物的日照分析中可以忽略不计;2)太阳赤纬随时间的变化没有体现在公式之中,因而不能显示出太阳位置参数日变化与年变化的整体关联;3)未能直接给出角度值,只是给出了角度的三角函数值。即使根据反三角函数求得了角度值,也被限于相应的反三角函数的值域内。针对以上不足本文提出了改进公式的方法,并对改进后的公式进行了图像化研究。

1 改进公式前的准备工作

1.1 建立辐射历计时系统

地球表面任意一点的太阳高度角和方位角随时间变化的规律只与其纬度有关,与经度无关。例如,同处一个纬度上的上海和开罗太阳高度角和方位角随时间变化的规律就是相同的,只是存在一个相位的差别,即开罗的日照角度随时间的变化总是滞后上海一段时间(约 6 h)。因此,在研究地球表面任意一点太阳位置参数随时间变化的日周期和年周期规律前,不妨将这些任意点沿着其纬度圈移动到一根固定的经线上。弄清了该经线上的任意一点日照的时程变化情况,也就弄清了与该点同纬度的所有地点的日照时程变化情况。这根固定的经线在下文将定义的辐射历记时系统中被称为元经。如图 2 所示,上海和开罗的地理坐标点经平移后在元经上同属一个点 P。

本文定义,在赤纬 δ 由赤道以南变动到赤道以北的那个时间点(春分点),设定通过阳光直射点的经线为元经,从该时间点起算,用该元经绕地轴旋转过的角度计时的计时系统即称为辐射历(后文简称辐历)。规定在辐历中的年周期和日周期的长度为 365 日与 24 h。根据辐历的定义,元经绕地轴旋转过的角度 t (辐

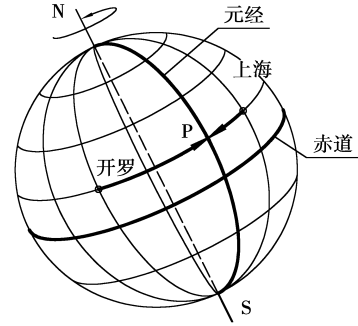


图 2 元经与同纬异经点关系图

历时角)与以辐历记录的时间存在着一一对应的关系,图 3 举例说明了这种对应关系。辐历起始时刻为 1 日 0 时(元经处于初始位置),终止时刻为 365 日 24 时(此时的元经绕地轴旋转了的角度为 $365 \times 360 = 131\ 400$),故辐历时角的取值范围是 $t \in [0, 131\ 400]$ 。

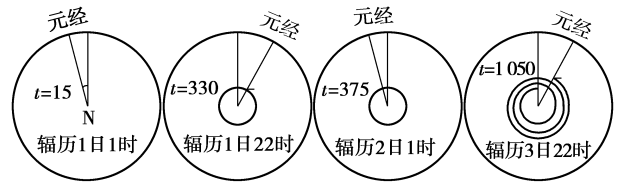


图 3 辐历时角与辐历时间的对应关系

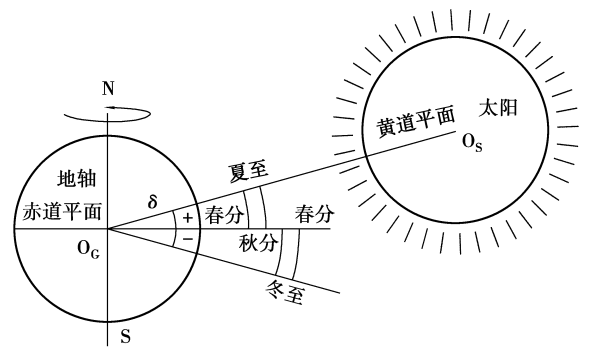


图 4 日地系统的运动关系示意图

另外,图 4 可以表明,地球在绕地轴作自转的同时,赤纬 δ 从春分到夏至,再从夏至到秋分,又从秋分到冬至,最后从冬至回到次年春分,以年为周期作着 $0 \rightarrow 23.5 \rightarrow 0 \rightarrow -23.5 \rightarrow 0$ 的变化。这种变化可以被近似视为以年为周期的简谐式波动,在上述辐历计时系统中可用下式描述:

$$\delta = 23.5 \sin\left(\frac{At}{356}\right) \quad (4)$$

1.2 重新界定太阳位置角度的取值范围

按照传统规定, $\beta \in [0, 90]$, 日出或日落时取 0, 太阳直射地面时取 90 ; $\alpha \in [-180, 180]$, 偏东时取负, 偏西时取正。该文对 β 和 α 的取值范围重新进行了界定: $\beta \in [-90, 90]$, $\alpha \in [0, 360]$ (如图 5 所示)。新界定

的优点是使得 β 在整日内都有意义:当 $\beta \in (0, 90]$ 时, 太阳在地平面以上, 表明当地处于白昼; 当 $\beta \in [-90, 0)$ 时, 太阳在地平面以下, 表明当地处于夜晚; 另外, $\alpha \in [0, 360]$ 的规定也使得 α 不小于 0, 无须根据东西偏向分出正负。

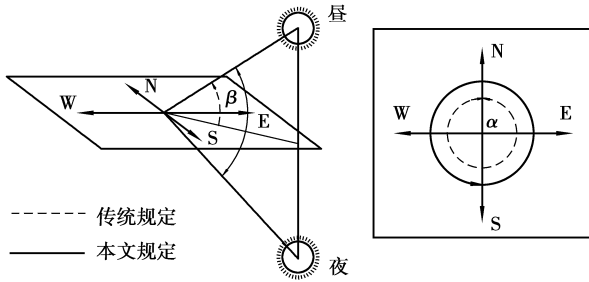


图5 该文太阳高度角和方位角取值范围与传统规定取值范围对比

2 对公式的改进

2.1 对式(1)的改进

将式(4)代入式(1), 可得:

$$\alpha = \begin{cases} 360 - \frac{1}{A} \arccos \left\{ \frac{\sin(A\beta) \sin(A\varphi) - \sin[23.5A \sin(\frac{At}{365})]}{\cos(A\beta) \cos(A\varphi)} \right\} & 360k < t < 360k + 180 \\ \frac{1}{A} \arccos \left\{ \frac{\sin(A\beta) \sin(A\varphi) - \sin[23.5A \sin(\frac{At}{365})]}{\cos(A\beta) \cos(A\varphi)} \right\} & 360k + 180 \leq t < 360k + 360 \end{cases} \quad k = 0, 1, 2 \dots 364 \quad (8)$$

3 对改进后公式的图像化研究

3.1 对式(6)的研究

根据式(6)可绘制任意纬度 ($\varphi \in [-90, 90]$) 处太阳高度角 β 随辐历时角 t 变化曲线。在有限页面内以真实坐标比例绘制的 $\beta-t$ 曲线会因线条过密而无法清晰地显示式(6)所能描述的规律, 该文采用等比例缩小年周期和放大横坐标的办法克服了 this 弊端。图 6~8 是在上述比例因子分别取 $\frac{365}{365}, \frac{60}{365}, \frac{40}{365}$ 时绘制的北纬 15 度 ($\varphi=15$) 处的 $\beta-t$ 曲线。由图可见, 比例因子越小, 曲线越疏。图 7 和图 8 中的曲线分别起伏 60 次和 40 次, 虽不能如同图 6 中的曲线那样通过起伏 365 次来反映 1 年包含 365 日的实际情况, 却能清晰地显示高度角的年变化规律与日变化规律的整体关联。研究表明, 在纬度一定的情况下, 根据任何比例因子作出的曲线都有相同的上、下包络线。

从图 9 可以看出各 $\beta-t$ 曲线的包络线性质与地理现象之间的联系: 1、回归线处 $\beta-t$ 曲线的包络线与 $\beta =$

$$\sin(A\beta) = \sin(A\varphi) \sin[23.5A \sin(\frac{At}{365} + \cos(A\varphi) \cos[23.5A \sin(\frac{At}{365})] \cos(At)) \quad (5)$$

由于 $\beta \in [-90, 90]$, 恰是反正弦函数的定义域, 故可直接对式(5)等号两边作反函数变换, 得到 β 随辐历时角 t 变化的单值函数:

$$\beta = \frac{1}{A} \arcsin \left\{ \sin(A\varphi) \sin[23.5A \sin(\frac{At}{365})] + \cos(A\varphi) \cos[23.5A \sin(\frac{At}{365})] \cos(At) \right\} \quad (6)$$

2.2 对式(2)的改进

将式(4)代入式(2), 可得:

$$\cos(A\alpha) = \frac{\sin(A\beta) \sin(A\varphi) - \sin[23.5A \sin(\frac{At}{365})]}{\cos(A\beta) \cos(A\varphi)} \quad (7)$$

上式中 β 由式(6)确定。但由于 $\alpha \in [0, 360]$, 该范围大于反余弦函数的定义域 $[0, 180]$, 故 α 随辐历时角 t 变化的单值函数必须分段表达:

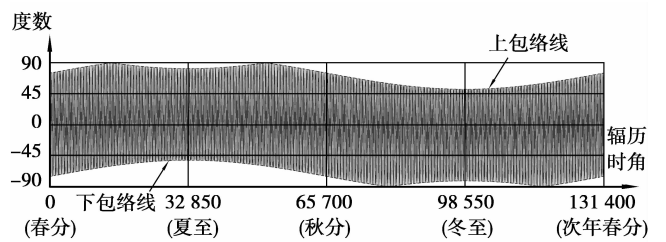


图6 比例因子取 $\frac{365}{365}$ 时北纬 15 度处 $\beta-t$ 曲线

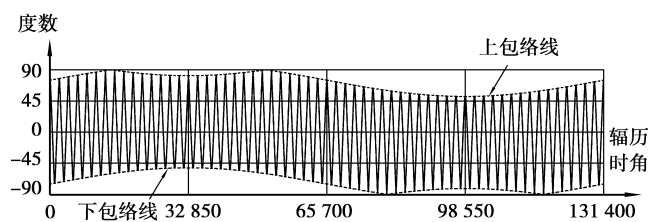


图7 比例因子取 $\frac{60}{365}$ 时北纬 15 度处 $\beta-t$ 曲线

± 90 的纵坐标线相切一点, 低于此纬度处 $\beta-t$ 曲线的包络线与 $\beta = \pm 90$ 的纵坐标线相交于两点, 高于此纬度处 $\beta-t$ 曲线的包络线与 $\beta = \pm 90$ 的纵坐标线没有交

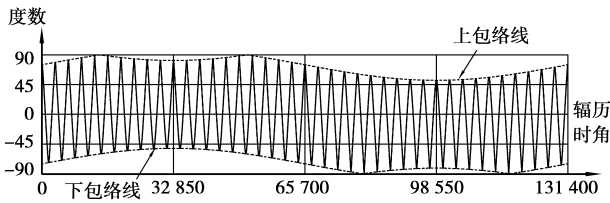


图 8 比例因子取 $\frac{40}{365}$ 时北纬 15 度处 $\beta-t$ 曲线

点,这说明回归线是地球上有无太阳直射现象的分界线。2、极圈处 $\beta-t$ 曲线的上、下包络线分别与 $\beta=0$ 的纵坐标线相切,高于此纬度处 $\beta-t$ 曲线的包络线与 $\beta=0$ 的纵坐标线相交于两点,低于此纬度处 曲线的包络线与 的纵坐标线没交点,这说明极圈是地球上有无极昼或极夜现象的分界线。3、极点处 $\beta-t$ 曲线的上、下包络线合二为一,也正是 $\beta-t$ 曲线自身,这说明极点处的太阳高度角只有年起伏,没有日起伏。

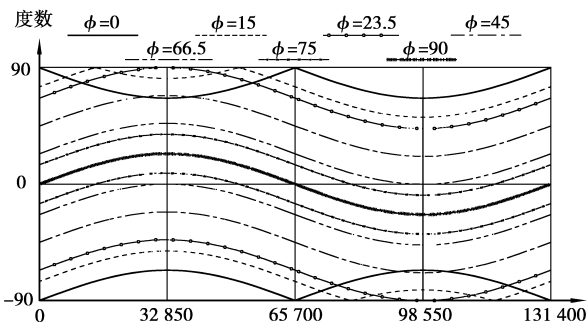


图 9 北纬 0、15、23.5、45、66.5、75、90 度处 $\beta-t$ 曲线包络线

3.2 对式(8)的研究

根据式(8)可绘制任意纬度($\varphi \in (-90, 90)$)处太阳方位角 α 随辐历时角 t 变化曲线。纬度在此处的讨论范围不含极点,因为式(8)在 $\varphi = \pm 90$ 时有分母为零的现象(事实上,极点处无方位角定义)。为使图像清晰起见,以下 αt 曲线也做了缩放处理,比例因子取为 $\frac{60}{365}$ 。图 10 依次显示了北纬 0、7.5、15、23.5、45、89.5 处的 αt 曲线。

与 $\beta-t$ 曲线不同, αt 曲线有间断现象出现。本文称在 $t=180k(k=0, 1, 2, \dots, 364)$ 处间断的曲线段为日内间断段,在 $t=360k(k=0, 1, 2, \dots, 364)$ 处间断的曲线段为日际间断段,其余为日际连续段。图 10 说明: 1、当 $\varphi \in [0, 23.5]$ 时, αt 曲线的日际连续段对称地分布在夏至前后,日内间断段对称地分布在冬至前后,其余的为日际间断段,而且纬度 φ 越小,日际连续段和日内间断段就越长。作为特殊的情况,在赤道上($\varphi=0$),日际连续段和日内间断段分别占据整个上半年和整个下半年。2、当 $\varphi \in [23.5, 90]$ 时, αt 曲线都呈现出全年日际间断的性质,但不同纬度处的曲线形状也不相同,即纬度越低,曲线的非线性特征越显著;纬度越高,曲线在每日区间内越呈现出直线特征(纬度无限趋近

90,则曲线在每日区间内无限趋近直线特征)。

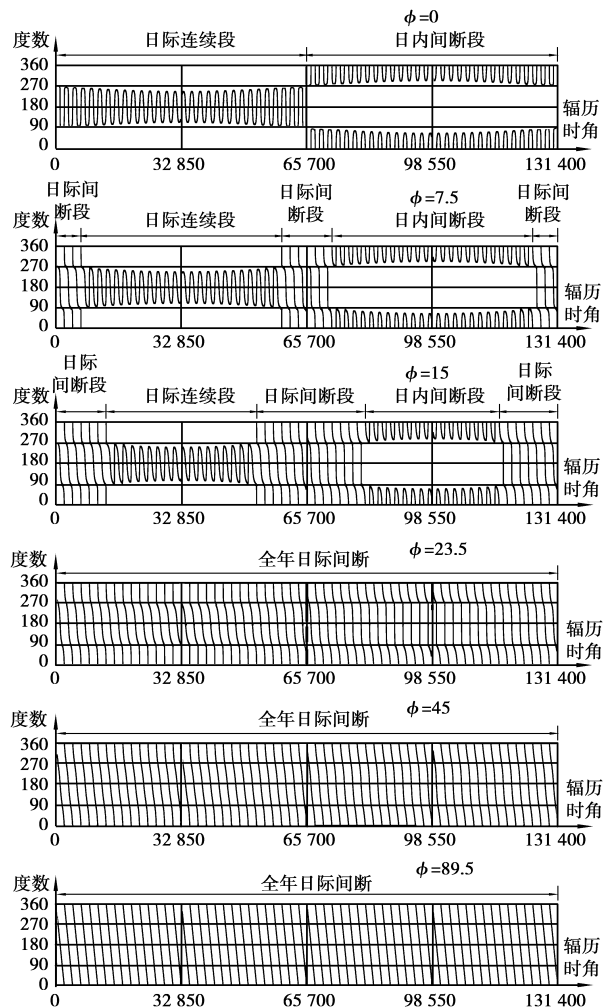


图 10 北纬 0、7.5、15、23.5、45、89.5 度处 αt 曲线

4 结 语

该文将计算太阳高度角的式(1)和计算太阳方位角的式(2)分别改进为式(6)和式(8),该研究工作的本质是在建筑日照分析精度允许的范围内,在年周期中单值地显式化了隐含在三角函数中的这两个角度。图像化分析表明,改进后的公式能够方便地显示太阳位置随时间变化的规律,对分析人员计算日照角度,把握日照规律具有参考作用。需要指出,本文探讨的都是北半球的情形,纬度为正数,若在纬度前添上负号再作探讨则反映的是南半球的情形(文章未予赘述),这也证实了改进后公式的通用性。

参考文献:

[1] 王诒,张笑. 建筑日照计算的新概念[J]. 建筑学报,2001, (2): 48-50.
WANG Gu, ZHANG Xiao. A new concept on calculation of sunshine distribution[J]. Journal of Architecture, 2001, (2): 48-50.

- [2] 黄农,姚金宝,瞿伟. 确定住宅建筑日照间距的棒影图综合分析法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2001, 24(2):217-221.
HUANG Nong, YAO Jin-bao, QU Wei. General analytical method to get the residential buildings insolation interval by using stick sunlight shadow chart[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science edition), 2001, 24(2): 217-221.
- [3] 王建平. 住宅单元日照环境的研究[J]. 建筑科学, 2005, 21(5):30-36.
WANG Jian-ping. Study on sunshine environment of residence unit[J]. Building Science, 2007, 23(3): 23-25.
- [4] 木村建一. 空气调节的科学基础[M]. 单寄平译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [5] 付祥钊. 夏热冬冷地区建筑节能技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
FU Xiang-zhao. Building energy-saving techniques for the areas hot in summer and cold in winter [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [6] F 凯尔别克. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法译.
北京: 中国铁道出版社, 1981.
- [7] 孙国晨, 关荣财, 姜英民, 等. 钢-混凝土叠合梁横截面日照温度分布研究[J]. 工程力学, 2006, 23(11):122-127.
SUN Guo-chen, GUAN Rong-cai, JIANG Ying-min, et al. Sunshine-induced temperature distribution on cross section of steel-concrete composite beams [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 122-127.
- [8] 陈衡治, 谢旭. 混凝土箱梁温度场和应力场研究[C]. 2004年全国桥梁学术会议. 北京: 人民交通出版社, 2004: 706-713.
CHEN Heng-zhi, XIE Xu. Research on temperature field and thermal stress field of concrete box girder [C]. Proceedings of the National Conference on the Academy of Bridge Engineering(2004). Beijing: China Communications Press, 2004: 706-713.
- [9] 苗永宽. 球面天文学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- (编辑 王秀玲)
-
- (上接第 129 页)
- [9] 北京市水务局. 北京市水资源公报 [EB/OL]. 2005. <http://www.bjwater.gov.cn/Portals/flfg/files/szygb.pdf>.
Beijing Water Authority. Beijing Water Resources Report [EB/OL]. 2005. <http://www.bjwater.gov.cn/Portals/flfg/files/szygb.pdf>.
- [10] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7):1 041-1 049.
SHI Pei-Jun, YUAN Yi, CHEN Jin. The effect of land use on run off in Shenzhen City of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7):1041-1049.
- [11] 李恒鹏, 杨桂山, 刘晓玫, 等. 流域土地利用变化的长周期水文效应及管理策略——以太湖上游地区蠡河流域为例[J]. 长江流域与环境, 2005, 14(4):450-455.
LI Heng-peng, YANG Gui-shan, LIU Xiao-mei, et al. The long-term hydrologic impacts of land use change and management strategy for the watershed of Taihu Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(4):450-455.
- [12] BERNARD ENGEL. Long-Term Hydrologic Impact Assessment and Non Point Source Pollutant Model (manual) [EB/OL]. <http://www.ecn.purdue.edu/runoff>.
- [13] 北京市测绘院编制. 北京地图集[M]. 北京: 测绘出版社, 1994. 226-227.
- [14] 张时煌, 彭公炳, 黄枚. 基于地理信息系统技术的土壤质地分类特征提取与数据融合[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(1):65-79.
ZHANG Shi-huang, PENG Gong-bing, HUANG Mei. The feature extraction and data fusion of regional soil textures based on GIS techniques [J]. Climatic and Environmental Research, 2004, 9(1):65-79.
- [15] 中国地图出版社. 中国自然地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1998.
- [16] 水利部. 中国水资源公报[EB/OL]. 2001, 2002. http://www.chinawater.net.cn/database_center/index.asp.
- [17] 水利部海河水利委员会. 海河流域水资源公报[EB/OL]. 2005. <http://www.hwcc.com.cn/haiwei/static/szygb.asp>.
- [18] 车武, 刘燕, 李俊奇. 北京城区面源污染特征及其控制对策[J]. 北京建筑工程学院学报, 2002, 18(4):5-9.
CHE Wu, LIU Yan, LI Jun-qi. Characteristics of urban non-point pollution and control strategies in Beijing [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2002, 18(4):5-9.
- [19] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 北京市城市非点源污染特征的研究[J]. 中国环境监测, 2005, 21(6):63-65.
HAN Bing, WANG Xiao-ke, OU'YANG Zhi-yun. Study on characterization of urban runoff pollution in Beijing [J]. Environmental Monitoring in China. 2005, 21(6):63-65.
- (编辑 王秀玲)