

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.003

基于地表温度和植被指数特征空间的 泾河流域土壤水分监测

董国涛, 党素珍, 何宏谋, 蒋晓辉, 张文鸽

(黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州, 450003)

摘要: 与传统土壤水分监测方法相比, 遥感技术有明显的优势, 能够方便快捷地获取大范围的地表信息, 并能提高区域土壤水分监测的精确度。利用 MODIS 遥感产品和农业气象观测站点土壤水分数据, 建立基于温度植被指数的表层土壤水分遥感估算模型, 对泾河流域土壤水分进行模拟估算, 并分析研究区 2000 年- 2010 年 3 月- 10 月份表层土壤水分时空分布特征。研究结果证实, 基于地表温度和植被指数特征空间的方法能够较好地揭示泾河流域土壤水分的分布和变化特征。

关键词: 土壤水分; 地表温度; 植被指数; 干旱监测; 遥感; MODIS 数据; 泾河流域

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0011-05

Monitoring of Soil Moisture Based on Land Surface

Temperature and Vegetation Index Feature Space in the Jinghe Watershed

DONG Guo tao, DANG Su zhen, HE Hong mou, JIANG Xiao hui, ZHANG Wen ge

(Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Compared with the traditional soil moisture monitoring methods, remote sensing technology has apparent advantages to obtain the large scale land surface information rapidly and to improve the monitoring precision of regional soil moisture. In this paper, on the basis of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and observed soil moisture data at the agricultural meteorological monitoring stations, a remote sensing model of soil moisture based on temperature and vegetation index was developed and applied to estimate the soil moisture in the Jinghe Watershed and to analyze the spatial temporal distribution of soil moisture between March and October from 2000 to 2010. The results showed that the method based on vegetation temperature condition index (VTCI) can reflect the distribution and variation of soil moisture in the Jinghe Watershed.

Key words: soil moisture; land surface temperature; vegetation index; drought monitoring; remote sensing; MODIS data; Jinghe Watershed

土壤水分是气候、水文、生态和农业等领域的主要参数, 它在地表与大气界面的水分和能量交换中起重要作用^[1]。土壤水分的时空分布研究对干旱监测和农业墒情监测具有重要意义。测量土壤水分的方法有很多, 常用的如烘干称重法、介电特性法、 γ 射线法以及土壤水分传感器等方法, 虽然能够很好地监测点位上的土壤水分, 但由于土壤水分空间变异性大, 其应用存在很大局限性。而遥感技术能够方便快捷地获取大范围的地表信息, 在区域土壤水分监测方面具有较大优势。在遥感信息中, 植被指数反映了绿色植被的生

长状况和覆盖度信息, 而地表温度表征了土壤水分状况, 二者结合能够为区域土壤水分监测提供了支撑^[1]。国内外学者研究发现地表温度和植被指数之间存在明显的负相关性^[2-3]。Carlson 等^[2-3]、Moran 等^[4]、Ridd^[5]、Gillies 等^[6]研究发现植被盖度和土壤水分变化幅度大的区域, 以土壤水分和地表温度为横纵坐标的散点图呈三角形或梯形。目前为止, 研究者已开发出基于归一化植被指数 (NDVI) 的条件植被指数 (vegetation condition index, VCI)、基于 LST 的条件温度指数 (temperature condition index, TCI)、距平植被指数 (ar

收稿日期: 2013-11-25 修回日期: 2014-03-11 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.001.html>

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (HKY-JBYW-2013-22; HKY-JBYW-2013-23); 国家自然科学基金项目 (41301496; 41301030); “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAB02B0403)

作者简介: 董国涛 (1982-), 男, 山东青州人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源遥感方面研究。E-mail: dongguotao@hky.yrcc.gov.cn

通讯作者: 党素珍 (1983-), 女, 河南灵宝人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: dangsuozhen@gm ail. com

nomaly vegetation index, AVI)、温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)^[7]和条件植被温度指数法(vegetation temperature condition index, VTCI)等众多土壤水分监测方法^[8]。由于干旱发生存在时空变异性,上述 VCI、TCI、AVI 等三种指数法所使用的最大 NDVI 和平均 NDVI 均有可能不同,从而造成监测结果的可比性较差;而 VTCI 法综合考虑了区域内 NDVI 的变化和相同 NDVI 条件下地表温度的变化,应用于陕西关中地区干旱监测中,可更准确地反映区域土壤水分变化规律^[9-10]。

泾河流域位于黄土高原中部地区,降水较少,干旱缺水,春旱时常发生,应用遥感技术进行大范围的干旱监测对促进农业生产和区域的可持续发展具有重要的现实意义。本研究利用 MODIS 数据,基于 VTCI 法开展泾河流域土壤水分监测研究,进行特征空间建立、干湿边的斜率确定以及土壤水分估算,并结合农业气象站(10 cm)土壤水分实测数据进行验证,进而分析泾河流域表层土壤水分的时空变化特征,为研究干旱半干旱区的墒情变化特征提供科学依据。

1 研究区概况

泾河是渭河重要的支流,发源于宁夏泾源县六盘山东麓,由西北向东南流经宁夏、甘肃、陕西 3 省区,在陕西省高陵县陈家滩注入渭河。流域位于 106°14′ - 108°42′ E, 34°46′ 之间,全长 483 km,流域面积 45 421 km²,总体地势西北高,东南低。泾河流域水土流失比较严重,水土流失面积占总流域面积的 73.1%。流域属于大陆性气候,是半湿润-半干旱过渡带,气温南高北低,年平均气温 8℃~13℃,降水由东南向西北逐渐递减,年平均降水量 390~560 mm,降水主要集中在 7 月-9 月,多以暴雨形式出现,约占全年降水量的 50%~60%^[11]。泾河位于六盘山和子午岭森林分布区之间,流域的中上游主要为草地,中下游主要为农田,灌丛主要处于森林向农田和草地的过渡区,这 4 种土地利用类型占流域总面积的比例超过 90%^[12]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 遥感数据及处理

研究所用的遥感数据为 Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 2000 年-2010 年产品,其中归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) MOD13A2 为 16 d 合成数据,地表温度(Land Surface Temperature, LST) MOD11A2 为 8 d 合成数据,空间分辨率为 1 km (<https://wist.echo.nasa.gov/api>)。NDVI 产品是基于 MODIS 地表反射率得到,LST 产品由 MODIS 第 31、32 通道的红外发射率经裂窗算法计算获得。两种产品均经过几何校正、大气校正等处理,可以用于科学实验^[13]。将 NDVI 和 LST 数据分别进行投影转换,空间分辨率统一为 1 km,时间分辨率统一为 16 d。

2.1.2 土壤水分数据及处理

土壤水分数据为泾河流域内 10 个农业气象观测站点 2000 年-2010 年的 10 cm 土壤相对含水量数据见图 1,时间

为旬尺度。土壤实际含水量可通过下式计算:

$$SW_{\text{实际}} = SW_{\text{相对}} \times SW_{fc} \quad (1)$$

式中: $SW_{\text{实际}}$ 为土壤实际含水量, $SW_{\text{相对}}$ 为土壤相对含水量, SW_{fc} 为土壤田间持水量。

通过公式(1)可知,站点土壤实际含水量可根据土壤相对含水量与田间持水量计算得出。通过全球土壤数据库 HWSO (The harmonized world soil database) 查询获得表层土壤机械组成和有机碳含量,再用 SPAW 软件 (<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/index.htm>) 计算表层土壤的田间持水量。站点土壤实际含水量数据分为两组,一组(8 个站)用于模型计算,另一组(环县和泾川站)用于误差分析。



图 1 泾河流域农业气象站点分布

Fig. 1 Distribution of agror meteorological monitoring stations in Jinghe Watershed

2.2 计算方法和原理

土壤水分不足会影响植物正常生长而导致植被指数的下降,也会导致土壤表面和植被冠层温度升高,因此可通过植被指数和地表温度来反映土壤水分状况^[14]。Carlson 等^[3]发现,在一般气候条件和地表覆被条件下,NDVI、LST 与土壤含水量的关系相对稳定。应用 NDVI 和 LST 的特征空间监测土壤水分一般基于以下假设:研究区内土壤表层含水量为从萎蔫含水量到田间持水量,且地表覆盖条件为从裸土到植被完全覆盖^[6]。王鹏新等在 NDVI-Ts 构成三角形空间的基础上,提出了条件温度植被指数,可研究特定时期区域的相对干旱程度及其变化规律^[9],公式为:

$$VTCI = \frac{LST_{NDVI_i, \max} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_i, \max} - LST_{NDVI_i, \min}} \quad (2)$$

$$LST_{NDVI_i} = a + bNDVI_i \quad (3)$$

$$LST_{NDVI_i, \min} = a' + b'NDVI_i \quad (4)$$

式中: $LST_{NDVI_i, \min}$ 和 $LST_{NDVI_i, \max}$ 分别为研究区域内具有相同 NDVI 值的象元地表温度的最小值和最大值; LST_{NDVI_i} 为某一象元 NDVI 值为 $NDVI_i$ 时的地表温度; a 、 b 、 a' 、 b' 为确定区域“干边”和“湿边”的截距与斜率,通过绘制 NDVI 和 LST 散点图确定。VTCI 的取值范围为 [0, 1], VTCI 的值越小,相对干旱程度越严重,土壤水分相对较少;反之亦然^[15]。

利用泾河流域内农业气象观测站点的表层(0~10 cm)土壤相对含水量,计算出各站点的实际表层土壤水分,建立实际表层土壤水分与条件温度植被指数之间的线性关系模型,进而拟合得到泾河流域每年的线性关系式:

$$SW = c \times VTCl + d \quad (5)$$

式中: SW 为实际表层土壤水分; $VTCl$ 为条件温度植被指

数; c, d 为线性系数。泾河流域 2000 年-2010 年每年的线性系数 a, b 的取值见表 1。

表 1 泾河流域 2000 年-2010 年 $NDVI \sim LST$ 关系的线性系数

Table 1 Linear coefficients of $NDVI \sim LST$ equation in Jinghe Watershed from 2000 to 2010

线性系数	年份										
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
a	0.28	0.45	0.47	0.39	0.31	0.32	0.36	0.29	0.33	0.34	0.44
b	0.06	0.07	0.06	0.08	0.05	0.07	-0.02	0.08	0.07	0.05	0.03

3 结果与分析

3.1 土壤水分空间分布特征

对 2000 年-2010 年 3 月-10 月的表层土壤水分求平均值, 得到多年平均表层土壤水分和季度平均表层土壤水分分布见图 2。对表层土壤水分空间分布特征进行分析, 得出研究区土壤水分多年平均值为 12% (质量百分含量, 下同), 表层土壤水分大部分处于 10%~20% 之间, 占研究区总面积的 77.06%。这与胡良军等^[19]、王鸣程等^[14]对黄土高原地区的土壤水分研究结果基本一致。从不同季节的土壤水分分布图, 发现研究区春季土壤水分呈东西两侧山区高、南北区域较高、中部区域较低的趋势; 夏季的土壤水分东西两侧山区仍然处于高值, 中部区域则增加明显, 相对南北区域土壤水分较高; 秋季土壤水分东西两侧山区最高, 中部和北部区域次之, 南部流域下游区最低。

为分析泾河流域土壤水分的不同季节的变化规律, 分别

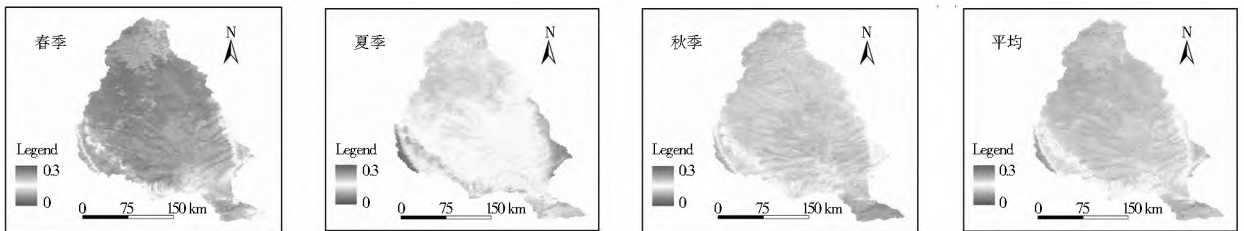


图 2 2000 年-2010 年年均和季度平均土壤水分空间分布

Fig. 2 Distribution of annual and quarterly average surface soil moisture from 2000 to 2010

3.2 土壤水分时间分布特征

对研究区内 2000 年-2010 年 3 月-10 月各月的表层土壤水分做多年平均处理, 进行月份间的表层土壤水分变化趋势分析, 探明表层土壤水分随时间变化的规律。图 3 为样区内的表层土壤水分月际变化图, 由图可知月土壤水分的总体趋势如下: 从 3 月起表层土壤水分逐渐升高, 8 月土壤水分达到最高值, 而后土壤水分呈下降趋势, 其中 3 月-5 月表层土壤水分增加幅度较小, 5 月-8 月土壤水分增加显著。

以 2000 年-2010 年 3 月-10 月份表层土壤水分为基础计算年均表层土壤水分, 进而计算出泾河流域 2000 年-2010 年期间的逐年表层土壤水分变化率, 结果见图 4, 可以看出大部分区域逐年变化都在 -50%~80% 之间。不同年份泾河流域土壤水分变化情况不同, 即: 2000 年-2001 年、2001 年-2002 年、2005 年-2006 年和 2009 年-2010 年研究区大部分区域表层土壤水分增加, 增加区域面积分别占总面积的 79.17%、90.22%、94.91% 和 86.85%; 2002 年-2003 年、2003 年-2004 年、2004 年-2005 年和 2008 年-2009 年大部分区域土壤水分呈现降低趋势, 减少区域面积分

别占总面积的 87.47%、76.23%、79.51% 和 89.73%。

计算区域内的春季、夏季和秋季的土壤水分均值和方差见表 2。结果表明: 不同季节土壤水分的均值变化较为明显, 夏季土壤水分含量是春季土壤水分含量的近两倍; 在夏季和秋季植被生长的季节土壤水分含量均在 10% 以上; 此外, 夏季土壤水分的方差最高, 说明夏季土壤水分含量的差异性较大。

表 2 研究区土壤水分统计值

Table 2 Statistics of soil moisture in study area

季节	春季	夏季	秋季	年均
均值 (%)	8	15	12	12
方差	0.04	0.07	0.06	0.06

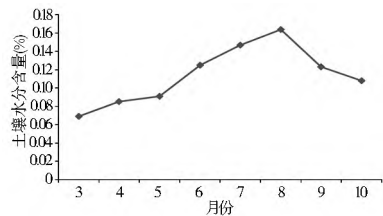


图 3 泾河流域土壤水分月际变化

Fig. 3 Monthly variation of soil moisture in Jinghe watershed

3.3 精度评价

选取研究区内环县和泾川农业气象站的表层土壤水分监测值与计算值进行比较, 通过平均绝对百分比误差 (MAPE) 和均方根误差 (RMSE) 对模型精度进行评价。MAPE 和 RMSE 的计算公式如下:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\omega_i - O_i|}{O_i} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_i - O_i)^2} \quad (7)$$

计算结果表明,每年的土壤水分 MAPE 基本都在 40% 以内, RMSE 大都处于 0.04~0.07 之间,说明基于地表温度和植被指数特征空间的流域干旱监测达到了较好的效果,能够较好地揭示土壤水分的分布和变化特征。

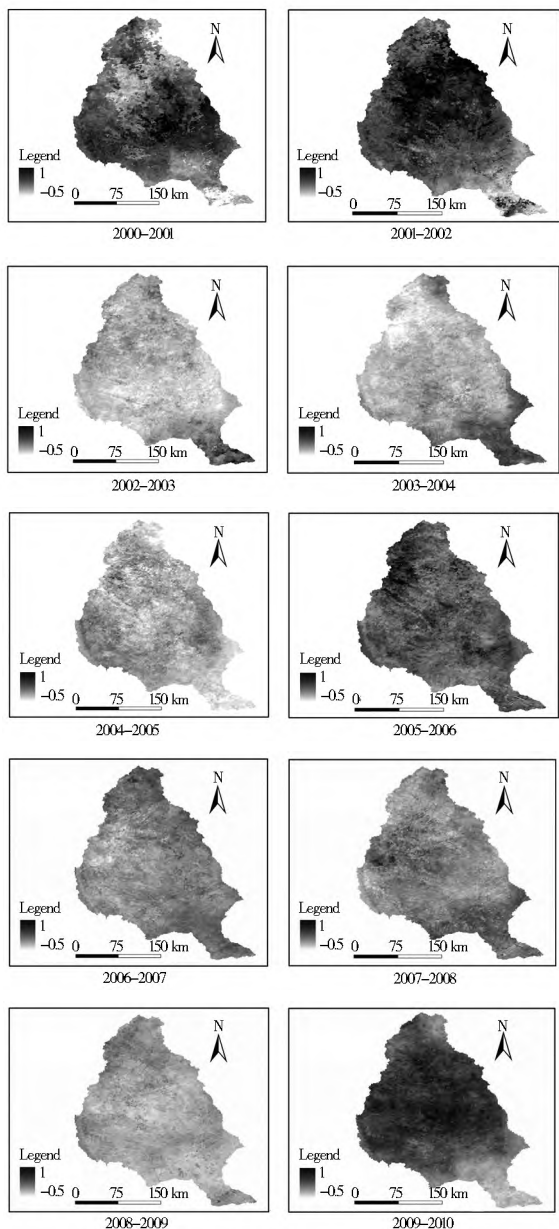


图 4 2000 年-2010 年各年份之间土壤水分变化率(100%)

Fig. 4 Variation rate of soil moisture between each year from 2000 to 2010

4 结论

基于 MODIS 遥感产品和农业气象观测站点土壤水分数据,建立了基于温度植被指数的表层土壤水分遥感估算模型,并对研究区进行模拟估算,分析研究区 2000 年-2010 年 3 月-10 月份表层土壤水分时空分布特征,得出如下结论。

(1) 研究区表层土壤水分多年平均值为 12%,表层土壤水分大部分处于 10%~20% 之间;土壤水分的季节变化非常显著,在植被生长季节均在 10% 以上;研究区月均土壤水分空间分布基本呈现“东西两侧山区高,中部区域低”的趋势。

(2) 3 月起表层土壤水分逐渐升高,8 月土壤水分达到最

高值,而后土壤水分呈下降趋势;2000 年-2001 年、2001 年-2002 年、2005 年-2006 年和 2009 年-2010 年研究区大部分区域表层土壤水分增加;2002 年-2003 年、2003 年-2004 年、2004 年-2005 年和 2008 年-2009 年大部分区域土壤水分呈现降低趋势。

(3) 每年的土壤水分 MAPE 基本都在 40% 以内, RMSE 大都处于 0.04~0.07 之间,表明基于地表温度和植被指数特征空间的方法能够较好的揭示泾河流域土壤水分的分布和变化特征。

计算过程中受到多因素的影响,难免给计算结果带来一定误差,因此进一步研究农业气象站的土壤水分点位数据和遥感影像元 1 km×1 km 栅格数据的空间尺度匹配问题,是下一步工作中研究的重点。

参考文献(References):

[1] 柳钦火,辛景峰,辛晓洲,等.基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法[J].科学导报,2007,25(6):12-18. (LIU Qir huo, XIN Jing feng, XIN Xiaozhou, et al. Monitoring Agricultural Drought by Vegetation Index and Remotely Sensed Temperature [J]. Science & Technology Review, 2007, 25(6): 12-18. (in Chinese))

[2] Carlson T N, Perry E M, Schmugge T J. Remote Estimation of Soil Moisture Availability and Fractional Vegetation Cover for Agriculture Fields [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, (52): 45-69.

[3] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A Method to Make Use of Thermal Infrared Temperature and NDVI Measurements to Infer Surface Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover [J]. Remote Sensing Review, 1994, (9): 161-173.

[4] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface Air Temperature and Spectral Vegetation Index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246-263.

[5] Ridd M. Exploring a V-FS (Vegetation impervious Surface soil) Model for Urban Ecosystem Analysis through Remote Sensing: Comparative Anatomy of Cities [J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, (16): 2165-2185.

[6] Gillies R R, Carlson T N, Cui J. et al. Verification of the 'triangle' Method for Obtaining Surface Soil Water Content and Energy Fluxes from Remote Measurements of the Normalized Difference Vegetation Index NDVI and Surface Radiant Temperature [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, (18): 3145-3166.

[7] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, (79): 213-224.

[8] Petropoulos G, Carlson T N, Wooster M J, et al. A Review of Ts/VI Remote Sensing Based Methods for the Retrieval of Land Surface Energy Fluxes and Soil Surface Moisture [J]. Progress in Physical Geography, 2009, 33(2): 224-250.

[9] 王鹏新,龚健雅,李小文.条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J].武汉大学学报 信息科学版,2001,26(5):412-418. (WANG Peng xin, GONG Jian ya, LI Xiaowen. Vegetation

- Temperature Condition Index and Its Application for Drought Monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5): 412-418. (in Chinese)
- [10] 孙威, 王鹏新, 韩丽娟, 等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22-26. (SUN Wei, WANG Peng xin, HAN Li juan, et al. Further Improvement of the Approach to Monitoring Drought using Vegetation and Temperature Condition Indexes from Multiyears' Remotely Sensed Data [J]. Transactions of CSAE, 2006, 22(2): 22-26. (in Chinese))
- [11] 毕晓丽, 周睿, 刘丽娟, 等. 泾河沿岸景观格局梯度变化及驱动力分析[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1041-1047. (BI Xiao li, ZHOU Rui, LIU Li juan, et al. Gradient Variations in Landscape Pattern along the Jinghe River and Their Driving Forces [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5): 1041-1047. (in Chinese))
- [12] 王辉, 咎国盛, 毕晓丽, 等. 基于 MODIS 的泾河流域植被动态年际变化[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 850-856. (WANG Hui, JIU Guo sheng, BI Xiao li, et al. MODIS Determined Inter Annual Vegetation Dynamics in Jinghe Watershed, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5): 850-856. (in Chinese))
- [13] Justice C O, Townshenda J R G, Vermotea E F, et al. An Overview of MODIS Land Data Processing and Product Status. Remote Sensing of Environment, 2002, (83): 3-15.
- [14] 王鸣程, 杨胜天, 董国涛, 等. 基于条件温度植被指数(VTCI)的中国北方地区土壤水分估算[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 446-455. (WANG Ming cheng, YANG Sheng tian, DONG Guo tao, et al. Estimating Soil Water in Northern China Based on Vegetation Temperature Condition Index (VTCI) [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 446-455. (in Chinese))
- [15] 杨胜天, 刘昌明, 王鹏新, 黄河流域土壤水分遥感估算[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 454-462. (YANG Sheng tian, LIU Chang ming, WANG Peng xin. The Method of Calculating Soil Water in Yellow River Basin by Remote Sensing [J]. Progress in Geography, 2003, 22(5): 454-462. (in Chinese))
- [16] 胡良军, 邵明安, 朱文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J]. 草业学报, 2004, 13(6): 14-20. (HU Liang jun, SHAO Ming an, ZHU Wen zhi. Relationship between Vegetation Spatial Collocations and Soil Moisture Spatial Heterogeneities in the Loess Plateau area [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(6): 14-20. (in Chinese))
- [16] 郭渠, 孙卫国, 程炳岩, 等. 重庆市气温变化趋势及其可能原因分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 646-656. (GUO Qu, SUN Wei guo, CHENG Bing yan, et al. The Trend of Temperature Variation and Its Possible Cause in Chongqing [J]. Climatic and Environmental Research. 2009, 14(6): 646-656. (in Chinese))
- [17] 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 772-779. (REN Guo yu, JIANG Tong, LI Wei jing, et al. An Integrated Assessment of Climate Change Impacts on China's Water Resources [J]. Advances in Water Science. 2008, 19(6): 772-779. (in Chinese))
- [18] LIU Ming liang, TIAN Har qin, CHEN Guang sheng, et al. Effects of Land Use and Land Cover Change on Evapotranspiration and Water Yield in China during 1900-2000 [J]. JAWRA, 2009, 44(5): 1193-1207.
- [19] 王云琦, 齐实, 孙阁, 等. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 5-58. (WANG Yur qi, QI Shi, SUN Ge, et al. Impacts of Climate and Land Use Change on Water Resources in a Watershed, A Case Study on the Trent River Basin in North Carolina, USA [J]. Advances in Water Science. 2011, 22(1): 51-58. (in Chinese))
- [20] Rosenbrock H H. An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function [J]. The Computer Journal, 1960, 3(3): 175-184.
- [21] Dickinson W T H Whiteley. Watershed Areas Contributing to Runoff [J]. IAHS Publ, 1970(96): 12-26.
- [22] 河南省水利厅. 1962-1965, 2007-2009 中华人民共和国水文年鉴. 淮河流域水文资料 [M/CD]. (Henan Huan Bao Ting. 1962-1965, 2007-2009 Annual Hydrological Report P. R. China. Hydrological Data of Huaihe River Basin [M/CD])
- [23] 胡巍巍. 蚌埠闸及上游闸坝对淮河自然水文情势的影响[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 1013-1019. (HU Wei wei. The Influence on the Natural Hydrologic Regimes of the Huaihe River Dams by Bengbu Sluice and Its Upstream Dams [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 1013-1019. (in Chinese))

(上接第10页)