

文章编号: 1007-6301 (2003) 05-0454-09

黄河流域土壤水分遥感估算

杨胜天¹, 刘昌明^{1, 2}, 王鹏新³

(1. 北京师范大学环境科学研究所 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100877;

3. 北京师范大学资源与环境科学系 100875)

摘 要: 利用 1982~ 1998 年 AVHRR 的 pathfinder 遥感数据, 以及相同时段黄河流域 29 个农业气象观测站土壤水分观测资料和 263 个气象台站降水、蒸发资料, 建立基于遥感条件温度植被指数和气象观测数据基础上的黄河流域厚层土体 (0~ 1m) 土壤水分遥感估算方法, 计算出 1982~ 1998 年黄河全流域 1m 土体各层土壤水分。计算结果检验表明该方法适合进行大区域、连续时间段、厚层土体土壤水分估算, 并为黄河流域水循环研究提供了丰富的土壤水分数据。

关 键 词: 黄河; 土壤水分; 遥感; 水循环

中图分类号: P935.1; P426.6

土壤水分是生态环境中水分存在的主要形式之一, 是水循环的重要因素, 土壤水分监测是研究区域水循环的基础性问题^[1~ 2]。目前监测土壤水分的方法很多^[3], 主要有: 从气象和地形因素通过经验公式和数理统计方法计算土壤水分; 应用微气象学方法 (能量平衡、空气动力能量平衡和空气动力涡度相关等) 计算土壤水分; 从土壤水本身的运动规律出发研究土壤水分 (土壤水量平衡计算、零通量面、测渗学法和土壤水动力学等)。应用以上方法在田间尺度范围内计算土壤水已取得了很大的进展^[4~ 5], 但是在在大尺度范围内, 由于参数空间变异性大, 获取比较困难, 目前应用这些方法进行大尺度范围土壤水分监测还有待进一步研究。遥感技术的发展, 已经能应用高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间频度数据反演地表物质、能量因子及其转换过程, 遥感技术是获取非均匀下垫面、非均匀介质参数最有效、最经济的方法, 是监测大尺度区域土壤水分的有力武器^[6]。目前已经进行了大量的土壤水分遥感实验研究^[7~ 8]。本文利用 AVHRR 的 pathfinder 遥感数据, 以及黄河流域 1982~ 1998 年土壤水分观测资料和降水、蒸发资料, 建立了大区域、连续时间段、厚层土体土壤水分遥感估算方法及其框架, 计算了 1982~ 1998 年黄河全流域 1m 土体各层土壤水分。

1 研究区域及数据资料

1.1 研究区域特征

研究区域为黄河全流域, 位于 96°~ 119°E, 32°~ 42°N 之间, 东西长 1 900km, 南北宽

收稿日期: 2003-06; 修订日期: 2003-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043601)

作者简介: 杨胜天 (1965-), 男, 副教授, 博士, 从事土壤遥感研究。E-mail: yangshengtian@263.net

1 100km, 流域面积 752 443km²。黄河是我国第二大河, 作为北方地区最大的供水水源, 以仅占全国河川 2% 的有限水量, 承担着本流域和下游引黄灌区占全国 15% 耕地面积和 12% 人口的供水任务。黄河流域降水比较少, 空间分布不均, 下游地区年降水在 600mm 左右, 中上游地区年降水在 500mm 左右, 部分地区小于 400mm^[9]。然而, 黄河流域蒸发却远远大于降水, 黄河流域年可能蒸发量在 1 200mm 左右^[10], 是年降水量的 2.5 倍, 所以干旱是黄河流域的基本特征。

气候干旱造成黄河流域水资源条件先天不足, 黄河流域大部分地区地下水位有数十米深, 土壤水供给不足, 土壤水资源十分匮乏, 因此土壤水分状况成为影响黄河流域农业生产的重要因素, 也是影响黄河流域水资源循环的重要环节。所以, 研究黄河流域水循环机制不仅需要了解黄河流域一时一地的土壤水分, 更重要的是要认识清楚黄河全流域长时间阶段的土壤水分状况及其变化规律。

1.2 数据资料处理

1.2.1 遥感数据处理

遥感资料选取 1982 年至 1998 年 AVHRR—pathfinder 中的 NDV I 和第 4、5 通道亮温数据, 该遥感数据空间分辨率为 8km × 8km, 已用旬 NDV I 最大值进行了检云处理。为了进一步去掉云的影响, 获得黄河流域 1982~1998 年各月 NDV I 和第 4、5 通道亮温, 以月为单位, 对每月 3 旬的 NDV I 和亮温数据进行进一步的最大值检云处理, 去掉局部区域云覆盖影响, 保证 NDV I 和第 4、5 通道亮温反映的是实际地面状况。并将各月遥感资料转换为 ablers 投影数据 (第一标准纬线 47°N, 第二标准纬线 25°N, 中央经线 105°E, krassvsky 椭球体)。

1.2.2 气象与土壤观测数据与处理

选取 1982 年至 1998 年黄河流域及周边地区 236 个气象台站月降水和蒸发资料 (站点分布见图 1), 利用 kringing 方法进行空间插值, 空间分辨率为 8km × 8km, 空间投影为中国 ablers 投影。

选取 1982 年至 1998 年黄河流域内 29 个全国农业气象观测数据中的土壤湿度数据集 (站点分布见图 1), 计算出 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~40cm、40~50cm、50~60cm、60~70cm、70~80cm、80~90cm、90~100cm 各层月平均土壤含水量。

2 土壤水分计算方法

2.1 计算原理和流程

植被指数的时空变化与土壤水分状况有一定的相关性。目前, 国内外的研究者已开发出了条件植被指数 (Vegetation Condition Index, VCI)^[11]、条件温度指数 (Temperature Condition Index, TCI)^[12]、距平植被指数 (Anomaly Vegetation Index, AVI)^[13]等用于干旱条件下土壤水分相对状况的遥感监测, 并取得了比较好的效果。然而, 由于干旱发生的时间和地点存在着时空变异, 所以上述三种指数法所使用的最大 NDV I 和平均 NDV I 有可能不同, 造成监测结果的可比性较差。同时, 土壤水分变化既反映在植被的叶面积指数变化上, 又反映在植被冠层的温度变化上; 长时间的土壤水分缺乏会影响植被生长, 导致植被叶面积指数下降, 短时间的土壤水分缺乏会引起植被叶片气孔关闭, 植被冠层温度上升,

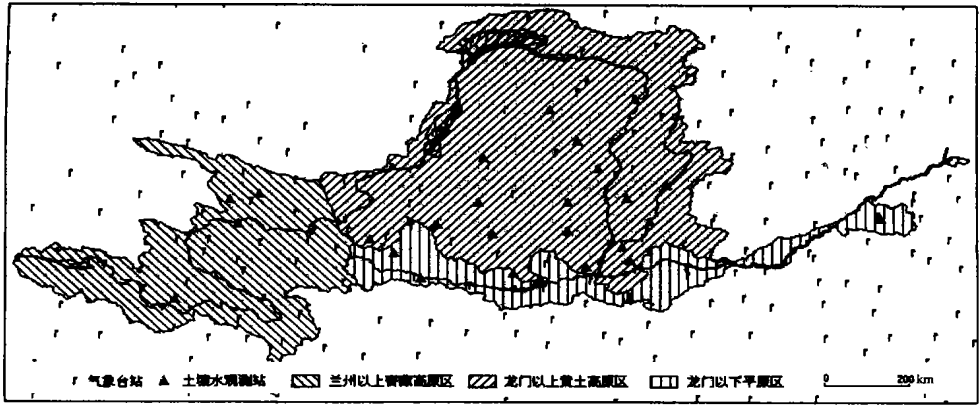


图 1 气象台站、土壤水观测点和计算分区图

Fig. 1 The map of weather station, soil water monitoring and calculating regions

所以植被叶面积和冠层温度对土壤水分都比较敏感，而前面的三种指标只监测了植被叶面积状况，没有监测植被冠层温度。为此，本文利用条件植被温度指数 (Vegetation- Temperature Condition Index, VTCI) 进行土壤水分状况的监测^[14]。条件温度植被指数综合地面植被和温度状况，研究一特定年内某一时期整个区域相对干旱的程度及其变化规律，表示为^[15]：

$$VTCI = \frac{LST_{NDVI_{i,max}} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_{i,max}} - LST_{NDVI_{i,min}}} \tag{1}$$

(1) 式中: LST_{NDVI_i} 根据 $NDVI$ 和 LST 散点图的 “干边” 和 “湿边” 确定 (见图 2)。

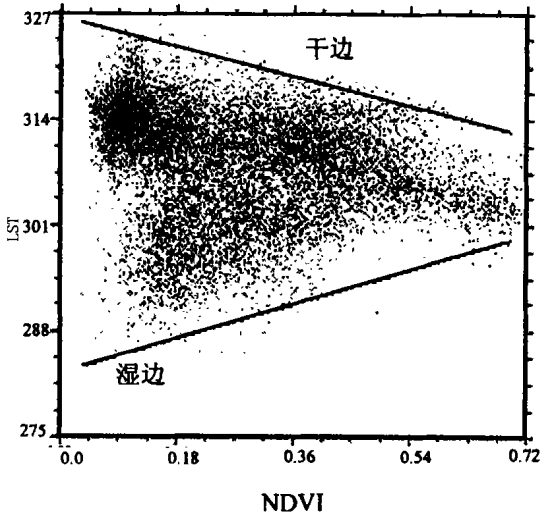


图 2 条件温度植被指数计算

Fig. 2 Calculating VTCI

“干边” 和 “湿边” 的计算公式分别为:

$$LST_{NDVI_{i,max}} = a + bNDVI_i \quad LST_{NDVI_{i,min}} = a + bNDVI_i \quad (2)$$

(2) 式中: $LST_{NDVI_{i,max}}$ 、 $LST_{NDVI_{i,min}}$ 分别表示在研究区域内, 当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时的地表温度的最大值和最小值, LST_{NDVI_i} 表示某一像素 $NDVI$ 值为 $NDVI_i$ 时的地表面温度, a 、 b 、 a 、 b 为确定区域“干边”和“湿边”的截距与斜率。式 (1) 中的分母表示在研究区域内, 当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时, 像素的地表温度的最大值和最小值之差, 分子表示 $NDVI_i$ 值等于这一特定值时的地表温度的最大值与该条件下某一像素土地表面温度值之差。因此, $VTCI$ 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, 则相对干旱程度较轻, 土壤水分相对较多。由于条件温度植被指数通过植被来监测土壤水分, 其应用结果表明条件温度植被指数对土壤表层水分状况比较敏感^[16]。

土壤水分状况一方面反映在植被生长状况上, 另一方面还受到气候条件的影响, 特别是象黄河流域这样大面积的流域, 降水和蒸发的影响更是明显。所以本文采取的黄河流域土壤水估算流程是: 首先通过遥感条件温度植被指数和降水与蒸发数据建立估算黄河流域土壤表层土壤水分的模型, 然后利用黄河流域多年土壤水分各层观测数据, 建立从表层逐层向下反演土体土壤水分, 计算出黄河流域土壤水分状况。计算流程见图 3。

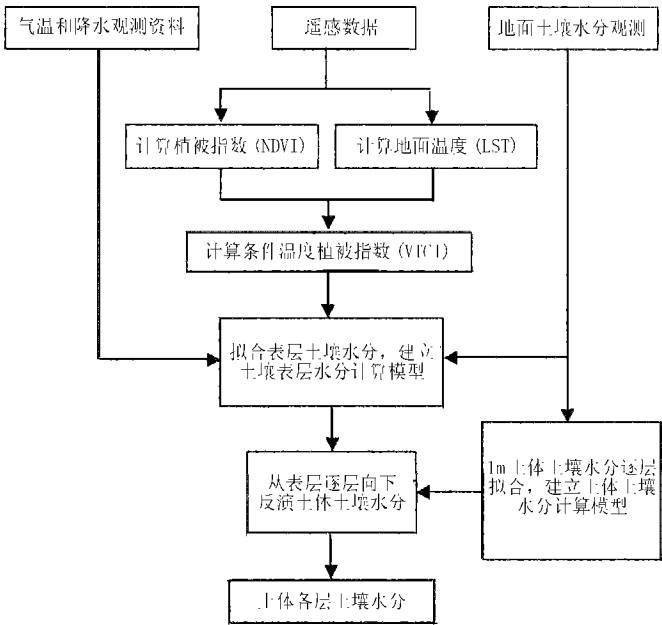


图 3 土壤水计算流程

Fig. 3 The flow chart of calculating soil water

2.2 土壤水分计算模型的实现

在土壤水分的具体计算中, 首先用AVHRR 的NDVI 第 4、5 通道数据计算地面温度, 以及条件温度植被指数, 然后将黄河分为兰州以上青藏高原区、 龙门以上黄土高原区和龙门以下平原区 (见图 1), 分别按月建立土壤表层水分值与条件温度植被指数、 降水和蒸发

间相关模型, 最后再利用地面土壤水分观测资料建立从表层逐层向下各层土壤水分相关模型, 并根据已计算出的土壤表层土壤水分, 逐层向下计算出各层土壤水分, 最后完成黄河流域 1m 土体土壤水分的计算。由于黄河流域冬季植被冠层叶片稀少, 地面 NDVI 不敏感; 同时在冬季土壤水分基本上处于季节性冻结状态, 可以忽视土壤水分月变化, 所以在实际计算中仅考虑一年中 3~10 月的情况。

2.2.1 植被指数

植被指数使用归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 为近红外波段与可见光波段数值之差和这两个波段数值之和^[17]:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3)$$

(3) 式中: ρ_1 、 ρ_2 为 AVHRR 数据中第 1、2 波段反射率。在 AVHRR 的 pathfinder 数据中直接提供 NDVI 数据。

2.2.2 地面温度

地表温度 (Land surface temperature LST) 的提取利用劈窗算法^[18]。根据气象卫星 NOAA/AVHRR 的第 4、5 波段亮温和比辐射率计算:

$$LST = T_4 + [1.34 + 0.39 \times (T_4 - T_5)] \times (T_4 - T_5) + 0.56 + \alpha \times (1 - \epsilon) - \beta \times \Delta\epsilon \quad (4)$$

(4) 式中: LST 是地面温度, T_4 、 T_5 是第 4、5 波段亮温, 其它参数计算如下:

$$\alpha = W^3 - 8 \times W^2 + 17 \times W + 40; \beta = 150 \times (1 - W/4.5) \quad (5)$$

(5) 式中: W 为大气水汽压 g/cm^2 , 计算中用中纬度大陆性气候均值

$$\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2; \Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5 \quad (6)$$

(6) 式中: ϵ_4 、 ϵ_5 分别为地物在第 4、5 波段的比辐射率, 其计算公式为:

$$\epsilon = \epsilon_v P_v + \epsilon_g \times (1 - P_v) + 4 \times w \times P_v (1 - P_v) \quad (7)$$

(7) 式中: ϵ 为植被比辐射率, 计算中取 0.985 ± 0.007 , ϵ_g 为土壤比辐射率, 取 0.960 ± 0.01 , w 为第 4、5 通道参数; 分别取 0.02 和 0.01, P_v 为植被覆盖度。用公式计算:

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (8)$$

(8) 式中: $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$ 为区域中最大和最小 NDVI 值。

2.2.3 条件温度植被指数

利用公式 (1)、(2) 计算黄河流域条件温度植被指数时, 分别在黄河流域各分区中, 按月建立以 NDVI 和 LST 为坐标的空间散点图, 根据 NDVI 和 LST 组成的梯形确定各月“干边”和“湿边”的截距与斜率 (见表 1), 计算出各区的条件温度植被指数。

2.2.4 土壤表层水分计算模型

利用地面观测土壤表层土壤水分与条件温度植被指数、降水和蒸发间建立的相关模型是:

$$\theta = p_1 + p_2 \times e^{-VGCI/p_3} + p_4 \times e^{-MI/p_5} \quad (9)$$

(9) 式中: P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 和 P_5 为区域和月份参数,

$$MI = \frac{P}{E} \quad (10)$$

(10) 式中 P 为月降水量, E 为月蒸发皿蒸发量。以上建立的各区域中各月相关模型相关显著检验均在一般显著性以上 (见表 2), 说明具有较好的相关效果。

表 1 黄河流域条件温度植被指数参数
Tab. 1 The parameters of VTCI in Yellow River Basin

月 份	a	b	a	b
3	325.52	- 19.77	178.60	77.76
4	393.29	- 39.16	197.42	90.95
5	385.57	- 21.11	263.13	6.67
6	412.63	- 63.87	264.80	29.31
7	405.56	- 50.82	245.00	21.77
8	376.95	- 35.94	247.84	28.54
9	366.04	- 45.45	286.47	7.23
10	332.02	- 20.70	207.03	66.32

表 2 土壤表层水分计算模型显著性检验
Tab. 2 The condition of inspecting the model calculating soil water in the top soil

月 份	兰州以上青藏高原区			龙门以上黄土高原区			龙门以下平原区		
	样本数	相关系数	显著性	样本数	相关系数	显著性	样本数	相关系数	显著性
3	25	0.59	*	152	0.62	**	54	0.57	*
4	36	0.72	**	173	0.58	*	52	0.55	*
5	35	0.64	**	171	0.58	*	66	0.64	**
6	27	0.62	**	146	0.69	**	58	0.58	*
7	36	0.63	**	155	0.62	**	66	0.69	**
8	37	0.68	**	179	0.62	**	54	0.86	***
9	34	0.81	***	166	0.69	**	59	0.58	*
10	21	0.89	***	162	0.67	**	60	0.62	**

* 一般性显著; ** 比较显著; *** 极显著

2.2.5 各层土壤水分计算模型

利用黄河流域 1982~ 1998 年各土壤水分观测点 0~ 1m 土层土壤水分观测值, 分析从表层逐层向下各层间土壤水分相关性 (见图 4), 分析结果表明从表层逐层向下各层间土壤水分相关系数均在 0.95 以上, 有很好的线性相关性, 由此建立了从表层逐层向下各层土壤水分相关模型。

3 计算结果与检验

通过以上土壤水分遥感估算方法计算, 获得黄河流域 1m 土体各层土壤水分值, 为了与有关土壤水分资料^[10]进行对比, 统计黄河流域 3~ 10 月 0~ 50cm 土壤水多年平均值 (图

版 II, 图 5)。

从图 5 中可以看出, 计算值和有关资料数据吻合比较好, 仅在极端干旱地区偏差较大, 主要是因为建立土壤表层水分与条件温度植被指数、降水和蒸发相关模型时缺少极端干旱地区观测资料所至。同时, 根据水量平衡方程, 一个地区多年平均土壤水分增量等于零的规律。按照这一原理进一步检验计算结果, 分别统计黄河流域 1m 土体 1982~ 1998 年各月土壤水分总量, 计算黄河全流域 17 年平均土壤水分增量为-0.017mm, 土壤水分增量基本上等于零, 检验结果符合水量平衡原理。从以上两种检验的结果, 可以认为本文估算出的黄河流域土壤水分状况精度基本达到要求。

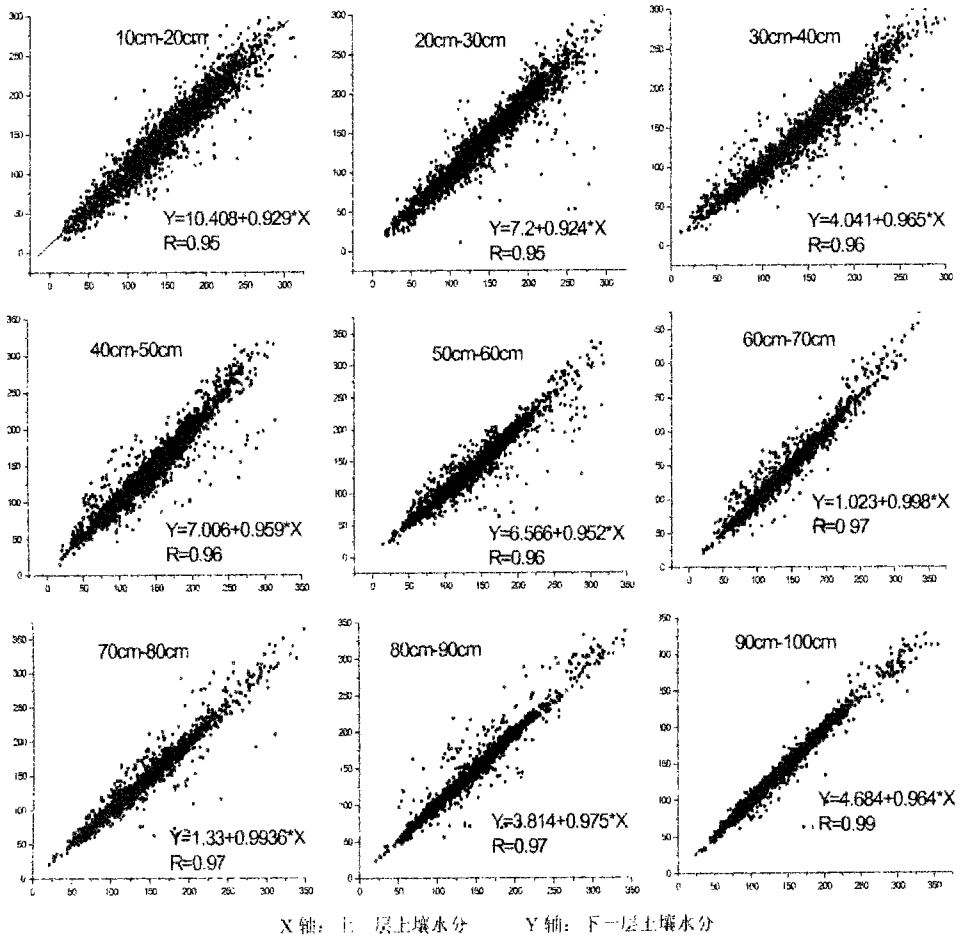


图 4 0~ 1m 土体各层土壤水分相关模型

Fig. 4 The correlative model among soil water of lays in 0~ 1m profile

4 结论

综上所述, 土壤水分是水循环机制研究中的重要因素, 土壤水分监测对农业生产和生态环境建设具有十分重要的意义。遥感技术是监测土壤水分的重要手段, 但是目前遥感技术在土壤水分监测中的应用主要集中在一时一地的土壤水分计算中。黄河流域面积广大, 认

识清楚黄河全流域土壤水分状况及其时间动态和空间分异规律是研究黄河水循环机制的重要内容, 所以建立大区域、连续时间段、厚层土体土壤水分计算方法十分重要。

在遥感信息和地面观测数据支持下, 我们首先通过遥感条件温度植被指数、降水与蒸发数据计算黄河流域土壤表层土壤水分, 然后利用黄河流域多年土壤水分各层观测数据, 建立从表层逐层向下各层土壤水分相关模型, 最后计算出黄河流域土壤水分状况。通过有关观测资料和水量平衡原理检验表明, 建立的大区域、连续时间段、厚层土体土壤水分遥感估算方法及其框架是可行的, 计算结果为黄河流域水循环研究提供了丰富的土壤水分数据。

参考文献

- [1] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341~ 348.
- [2] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79~ 86.
- [3] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤- 植被- 大气系统水分能量平衡研究进展. 水科学进展, 1999, 10(3): 251~ 259.
- [4] 李保国, 龚元右, 左强. 农田土壤水动态模型及应用. 科学出版社, 2000.
- [5] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述. 水科学进展, 1999, 10(3).
- [6] 陈怀亮, 毛留喜, 冯定元. 遥感监测土壤水分的理论、方法及进展. 遥感技术与应用, 1999, 14(2).
- [7] 申广荣, 田国良. 作物缺水指数监测旱情方法研究. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 123~ 128.
- [8] 张仁华, 孙晓敏等. 定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异. 中国科学(D 辑), 2001, 31(11): 959~ 968.
- [9] Zhang RenHua, Su Hongbo, Li ZhaoLiang, et al, The potential information in the temperature difference between shadow and sunlit of surfaces and a new way of retrieving the soil moisture. Science in China (Series D), 2001, 44(2): 112~ 123.
- [10] 郭建平, 高素华, 王广河等. 中国云水资源和土壤水资源. 北京: 气象出版社, 2001.
- [11] Kogan F N. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Non-homogeneous Areas. Int. J. of Remote Sensing, 1990, 11: 1405~ 1420.
- [12] Kogan F N. Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection. Advances in Space Research, 1995, 15: 91~ 100.
- [13] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用. 环境遥感, 1994, 9: 106~ 112.
- [14] Gillies, R. R., Carlson, T. N., Cui, J., Kustas, W. P., and Humes, K. S., A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurement of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18, 3145~ 3166.
- [15] Wang, P. - X., Li, X. - W., Gong, J. - Y., and Song, C. - H., Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. Proceedings of IGARSS 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 9~ 14 2001 (Sydney, Australia).
- [16] 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件温度植被指数及其在干旱监测中的应用. 武汉大学学报, 2001, 26(5): 412~ 418.
- [17] Jensen, J. R.. Introductory Digital Image Processing, Prentice-Hall, New Jersey, 1986, P379.
- [18] Price J. C. Land surface temperature measurements from split-window channels of the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 7231~ 7237.

The Method of Calculating Soil Water in Yellow River Basin by Remote Sensing

YANG Shengtian¹, L U Changming^{1,2}, WANG Pengxing³

- (1 The Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University 100875;
2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS 100877;
3 The Department of Environment and Resource, Beijing Normal University 100875)

Abstract: Soil water is a type of water resource. Although there are many methods to monitor the soil water in field, to effectually obtain data of the soil water in macro scale region is a difficult problem when evaluating water cycle. Yellow River is the second river in China, which covers an area of $752\,443\text{km}^2$, so it is important for the water management to calculate the soil water. On the basis of AVHRR-pathfinder data, we employed the Vegetation-Temperature Condition Index (VTCI) to monitor the land surface condition. After checking up the remote sensing data with soil water in the field, we found that VTCI is sensible to the soil water in top soil in Yellow River Basin, which agrees with other achievement. Besides, the data of soil water in field expresses obvious relation of soil water between up layer soil and down layer soil. Therefore, we set up a model to calculate soil water in soil profile (0~1m) in Yellow River Basin by combining meteorological information and remote sensing data. The data used in the research includes AVHRR-pathfinder data during 1982~1998 and soil water, precipitation and evaporation information, which were respectively monitored by 29 agriculture weather stations and 263 national weather stations. Finally, the calculated soil water was compared with survey data and checked up by the method of water balance, and the results are satisfied. It is concluded that our method can be applied in surveying soil water for soil profile in macro scale region during long time and the calculated soil water can be supplied to the research of water cycle in Yellow River Basin.

Key words: Yellow River; soil water; remote sensing; water cycle