

利用遥感光谱法进行农田土壤水分遥感动态监测

李建龙¹, 蒋平^{1*}, 刘培君², 赵德华¹, 朱明¹, 徐胜¹

(1. 南京大学生命科学学院, 南京 210093; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:自 1997 年 4 月至 1998 年 10 月, 在甘肃省定西县进行了大面积 0~50cm 土层农田土壤水分按每 15d 本底资料实际观测, 对此间收到的 5 幅 TM 与 7 幅 NOAA 卫片数据资料进行了加工处理, 并对地面光谱资料也进行了观测。在光谱反演与光谱和土壤水分相关性分析基础上, 利用遥感技术和地理信息系统, 初步建立了典型试验区(3×3 km²)遥感信息与土壤含水量之间的遥感光谱相关监测模型, 做出了观测区土壤水分含量分布图和得到了大面积农田土壤水分宏观动态监测结果, 并同地面实测土壤水分进行了精度校正。研究结果表明, 文中提出的“光学植被盖度”概念, 对土壤水分遥感监测研究是有益的, 利用遥感光谱法和数学统计方法求出了有关物理参数, 初步建立了 TM 与 NOAA 光谱水分监测模型, 其模型监测 0~20cm 土层含水量的精度达到 90% 以上, 实际监测土壤水分精度达到 72.3%; 在遥感监测 20~50cm 土层土壤含水量中, 利用遥感模型监测土壤水分精度达到 80% 以上, 实际遥感监测精度达到 60% 左右, 其结果可有效指导干旱半干旱雨养农业区春耕时间和动态监测大面积土壤墒情, 可为农业生产提供科学依据。另外, 经地面大量观测表明, 一般来说, 当土壤含水量为田间最大持水量的 55%~85% 时, 从生长状况和经济产量上看农作物生长最佳; 当土壤含水量低于 6.4% 时, 作物生长停止, 开始出现萎蔫现象, 应适时灌溉。

关键词:土壤水分遥感监测; 遥感光谱法; 3S 技术; 光学植被盖度; TM 和 NOAA 资料; 农业生态学

The study on dynamic monitoring soil water contents using remote sensing optical method

LI Jian-Long¹, JIANG Ping^{1*}, LIU Pei-Jun², ZHAO De-Hua¹, ZHU Ming¹, XU Sheng¹

(1. Department of Biology Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Xinjiang Institute of Ecological and Geographical Research, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1498~1504.

Abstract: Remote sensing provides information on the land surface. Therefore, linkages must be established if these data are to be used in ground water and recharge analyses. Keys to this process are the use of remote sensing techniques that provide information on soil moisture and water-balance models that tie these observations to the recharge. The soil water content, variational law and utilization rate of soil water for crop were studied from our experiments in 1997~1998. Soil water in 0~50cm, spectral and TM/NOAA data were observed from 1997 to 1998 in DingXi county, Gansu. Based on remote sensing

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目(30070432)

收稿日期: 2002-04-06; 修订日期: 2003-04-30

作者简介: 李建龙(1962~), 男, 长春市人, 博士, 教授, 主要从事农业生态学和生态学研究。

* 通讯作者 Author for correspondence

Foundation item: Post-doctor Research Foundation of China; National Natural Science Foundation of China (No. 30070432)

Received date: 2002-04-06; **Accepted date:** 2003-04-30

Biography: Li Jian-Long, Ph. D., Professor, main research field: agricultural ecology and ecological information.

data and field soil moisture, a study on dynamic monitoring soil water contents had been done with the help of remote sensing optimal methods. As the vegetation interferes with estimating soil water content, the vegetation information is necessary for estimating the yield of crop. The vegetation coverage can reflect crop yields, but its precision is low because it can not reflect not only the canopy density of branches and leaves, but also one on top of another. Considering the needs for removing the interference of vegetation with soil water contents and extracting soil water information and estimating crop yield, we were put forward a new concept of optical vegetation coverage and set up a let of remote sensing estimating soil water models and calculated related parameters using TM/NOAA data.

The correlative spectral models and soil water content distributed maps were made between remote sensing data and soil water from ground by RS and GIS in the paper. The results showed that there existed an obvious correlation between the soil moistures and spectral vegetation indices of TM and NOAA/AVHRR ($p<0.05$), when the vegetation interfered with soil moisture by RS were discarded from mixed data, and remote sensing monitoring models of soil moisture were made by remote sensing optical method. In 0~20cm soil, the estimating soil moisture accuracy was above 90% by the models and the actual estimating accuracy was above 72.3% from the ground. In 20~50cm soil, the estimating soil moisture accuracy was above 80% by the models and the actual estimating accuracy was 60% observed from the ground by the optical vegetation coverage models.

Key words: remote sensing monitoring of soil moisture; remote sensing optical method; 3S (RS-GIS-GPS); optical vegetation coverage; TM and NOAA data; agricultural ecology

文章编号:1000-0933(2003)08-1498-07 中图分类号:S812.8 文献标识码:A

农田土壤水分遥感监测,是一项十分引人注目的研究课题,也是国际上生态学、水资源等学科研究的前沿领域,其中利用遥感技术进行农田土壤水分大面积动态监测与预报研究,目前还不多见,因此它是一项世界性研究难题之一^[1~6]。但由于土壤水分是农作物生长发育的基本条件,它是指示土壤墒情,确定农业生产春耕时间,补偿灌溉管理和评价产量高低的重要参数。加之,甘肃省河东地区地域辽阔(仅陇中就包括20个县市),农田分散,天然植被稀疏,土类变异小,用遥感技术对雨养农业区土壤水分进行宏观、快速、动态、准确监测和确定水肥补偿点是十分重要的,也是可行的,有必要从事这方面的研究。

自20世纪60年代末,美国学者就开始研究了土壤水分对光谱反射率的影响,发现干燥土壤有较高的反射率^[1]。1973年日本学者在札幌研究了5种土壤的反射率,建立了蓝波段和绿波段的胶片密度和含水量的多元回归方程^[2,3]。印度国家遥感局则利用1984年和1985年的MSS和TM资料的NDVI指数评价了安得拉那邦的土壤干旱程度。后来,加拿大、英国和美国等学者都曾进行土壤水分监测和旱情方面的遥感研究,取得了一些阶段性研究成果^[4,5]。我国学者自20世纪80年代以来,也开始了这方面研究如张仁华、田国良、魏文秋、卢志光、赵华昌等分别利用热惯量法,冠层温差法,作物缺水指数法,土层温差法等方法作了一些试验,取得了许多有益经验,但在监测精度和动态效果等方面还有许多不足^[2~7]。也有学者(田国良、金亚秋等)用微波进行试验,用散射系数法监测土壤水分,但该方法也受地表粗糙度和植被覆盖的影响及资料成本高的限制,给大范围应用带来的很大困难^[3~5]。由于土壤水分受多种因素的影响,因不同时空条件而发生剧烈变化,又受植被覆盖的干扰,因此使土壤水分遥感监测研究难度加大,其研究方法及途径的选择都要根据土壤类型、传感器性能,信息源以及工作目的等因素综合分析后确定。而利用刘培君、李建龙、张琳等承担新疆“八五”科技攻关项目“土壤水分遥感监测研究”项目成果研制成的土壤遥感光谱法,则简单、实用,可克服以上方法的不足^[1]。

本文旨在利用刘培君、李建龙、张琳等研制的遥感光谱法,在甘肃省定西县进行农田土壤水分的遥感动态监测,建立土壤水分遥感模型,进而做出0~50cm土层大面积土壤水分分布图,实现准确快速监测农田土壤水分动态变化,为干旱半干旱雨养农业区农业生产开展,提供科学指导和为农业生态学研

究也提供了一种新方法。

1 研究地、内容与方法

1.1 研究地

位于甘肃省河东地区定西县团结乡境内,介于东经 104.531°~104.567°,北纬 35.367°~35.417°,样地面积 9.168km²,海拔 2056~2447m。气候属温带半干旱区,年均气温 6.2℃,年均蒸发量 1318mm,年均降水量 415.2mm。该区属于典型的黄土高原农业耕作雨养区域,主要土壤类型为灰钙土,一般天然植被覆盖度低于 5%,植被稀疏和样地农田广阔平坦。

1.2 研究内容与方法

1.2.1 利用遥感光谱法监测农田土壤水分的技术原理和工作流程 由于本研究区域较大,植被覆盖度相对较低,土类单一,土表光谱反射明显和宏观动态性强等特点,本研究选择了刘培君、张琳等人研制的土壤水分遥感光谱法和运行程序^[1]。因该方法比起其它方法更着眼于土壤水分与光谱的直接关系。对植被的影响,则拟采用遥感估算光学植被盖度,分解象元排除法,参照热惯量法和水分亏缺植物指数法,来提取土壤水分光谱信息。具体过程为利用近红外波段和低波长波段的光谱反射率差值可以提取植被信息,差值较大的为作物,差值较小的是裸土,负值可能是水体或湿土。地物的纯植被信息用 TM 二、三波段和四波段(相当于 NOAA 的一、二波段)数据表示为: $V=B_4-B_{23}-r_s$,式中 V 为纯差值植被指数, B_4 、 B_{23} 分别为 TM 四、二、三波段光谱亮度值, r_s 为物理参数,它反映裸土的作物产量本底,与光学植被盖度(C_{VO})有关, $C_{VO}=1-(r_s/r_{so})$,其中 r_{so} 为裸土的植被指数本底,当光学植被盖度为 0 时(无作物), $r_s=r_{so}$,而当 C_{VO} 为 1 时, r_s 则为 0,裸土的纯植被指数 V_{IO} 为 0,利用 20 个裸土样点的野外测量光谱数据和对应的卫星 TM 与 NOAA 数据进行回归分析,建立了 $B_{23}=1.03 R_{23}+32.2$ 和 $B_4=1.01 R_4+42.2$ 相关方程,其相关系数为 0.97。由于 NOAA 卫星的一、二通道和陆地卫星 TM 的二、三和四通道波段范围相近,其模型可作为 NOAA 数据建立土壤水分遥感估测的桥梁,进而采用文献 1 的方法,从 TM 2、3、4 波段和 NOAA 1、2 通道数据入手,建立土壤水分遥感监测模型,以此为桥梁,采用参数反演模型与地面实测相结合方法,建立土壤水分遥感动态监测系统(图 1)。利用这个遥感监测系统,可以大面积监测土壤水分动态变化和开展遥感估测和旱情预报工作,为水肥补偿调控,确定作物补偿点,提供科学依据,同时,也为农业生态学研究提供一种新方法。进而结合地面土壤水分实测工作,定量确定水肥亏缺临界值和补偿点,以便指导雨养农业区农业水肥补偿调控技术的实施及抗旱夺取农业生产稳产丰收。

1.2.2 信息收集与加工处理 从 1997~1998 年,定期收集了大量有关甘肃省定西县主要生育期的土壤含水量(地面 0~50cm)动态资料,水文数据,作物产量和主要气候资料及相关图片。

自 1997 年 4 月至 1998 年 5 月每隔半月分 5 层用土钻法取 20 个点观测土样,使用烘干称重法动态测定了 3km×3km 典型样区的土壤含水量和小麦产量(用 1m×1m 样方,重复测 4 次)等数据。对 1997 年 4 月至 1998 年 10 月收集到的 7 幅 NOAA(1997 年 4、5、7、9、10 月份和 1998 年 6、8 月份中旬收集 NOAA 卫片)和 5 幅 TM(1997 年 4、5、9 月份和 1998 年 7、10 月份收集到了样地上空 TM 卫片资料)卫片资料,进行了卫片图象处理,加工和信息提取及地面土表光谱和土壤蒸发量的观测。配合卫星数据进行同步地面光谱测量,利用 PM-12A 型光谱仪按观测样点 20 个定点定期观测地物光谱,作物盖度等数据,以便进行相关分析,求算有关参量,为建立土壤水分遥感监测模型提供条件。

利用中国科学院生物沙漠所刘培君、张琳等提供的遥感监测程序,参考 TM 信息,建立了 NOAA 卫片资料,土壤含水量,作物产量和气候因子等信息数据库和遥感动态监测和预报土壤水分的综合信息系统。进而建立了遥感信息与土壤含水量和植被指数的相关模型,本研究抓住土壤光谱反射率与土壤水分含量的相关关系,采用刘培君、李建龙等人的方法^[1]先排除植被的干扰,以样地象元为单位建立了土壤水分含量的 TM 二、三、四波段亮度模型和 NOAA 一、二波段的亮度模型,经过计算机程序运行,求算出宏观的遥感监测土壤水分分布图和提取出数字水分值,并同地面样区实测土壤水分进行精度与效果检验。经研究初步做出了试算土壤水分分布图(图 2)和根据田间土壤水分测定与作物经济产量状况确定了水肥补偿点等。

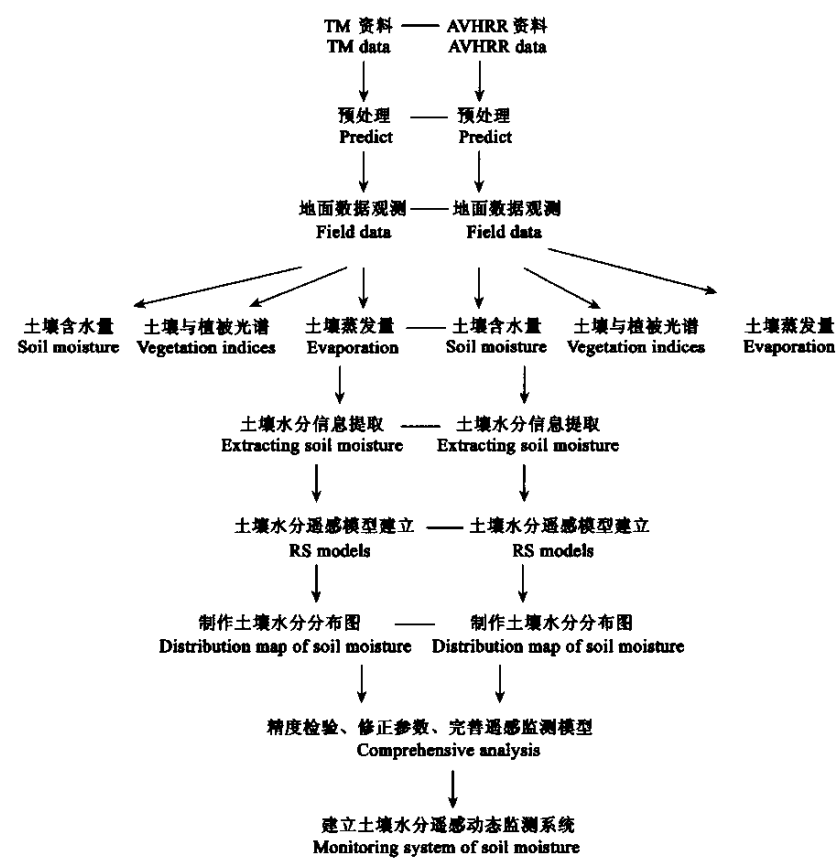


图 1 农田土壤水分遥感动态监测技术路线图

Fig.1 The remote sensing dynamic monitoring sketch map on soil moistures

利用文献 1 遥感光谱法及光谱反演模型,并参考其他理论和试验方法,初步建立了土壤水分遥感监测 AVHRR 和 TM 数学模型,其两种观测方法同步进行,经分析两种遥感模型取得了一致的观测结果,其两种光谱模型间可互为校对,基本实现了用卫星遥感资料快速、宏观、准确监测大面积农田土壤含水量和作物生长状况的目的。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤含水量遥感监测过程中提出了光学植被盖度概念

光学植被盖度概念是指反映植被的光学信息量占观测范围内全部为植被信息量的比^[1]。观测区内实际的光学植被信息跟该区理想为全植被覆盖时光学植被信息的比。如果用 TM 数据的光谱亮度表达,则

$$C_{VO} = (B_4 - B_{23} - r_s) / (B_4 - B_{23})_{\max} \tag{1}$$

其中, $(B_4 - B_{23})_{\max}$ 为理想的全植被覆盖时(无裸土面)4 波段和 2、3 波段(平均)光谱亮度的差值(也是极大值)。按照这种定义方法,裸土的光学植被盖度应为 0,全植被覆盖时光学植被盖度为 1。出现负值时,一般为水体,为此光学植被盖度反映了植被盖度的高低。从光谱分析可知,光学植被盖度反映绿色植物叶绿素的含量,表示绿色植物营养体物质的多少,能更好地表达生物量,因此,它更有利于估测作物产量和草地产草量。

2.2 光学植被盖度的计算模型建立

植被覆盖对土壤水分含量干扰的程度与植被盖度有关。但植被盖度是一个粗略的量。而光学植被盖度

是掩盖土壤水分信息的一个比较精确的量度。利用样本统计和相关分析相结合的方法,建立了光学植被盖度的 TM 模型:

$$C_{VO} = 0.004632B_4 - 0.002646B_2 - 0.001986B_3 - 0.07124$$

(2)

其中, C_{VO} 为光学植被盖度, B_4, B_2, B_3 分别为 TM 4、2、3 波段的光谱亮度。

利用理论和试验相结合的方法,建立了 NOV/AVHRR 土壤水分监测模型:

$$C_{VO} = 0.004956B_{A2} - 0.002447B_{A1} - 0.07124$$

(3)

式中, B_{A2}, B_{A1} 分别为 AVHRR 2、1 通道的光谱亮度。

2.3 排除植被干扰,提取农田土壤水分遥感光谱信息

根据分解复合象元的原理,可排除植被的光谱信息,提取土壤水分的光谱信息。建立 TM 的土壤水分监测模型如下:

$$B_{4\pm} = \frac{0.5597B_2 + 0.4199B_3 - 0.1797B_4 + 15.06}{0.8712 - 0.00463B_4 + 0.002646B_2 + 0.001956B_3}$$

(4)

$$B_{23\pm} = \frac{0.5190B_2 + 0.3894B_3 - 0.1084B_4 + 1.667}{0.8712 - 0.00463B_4 + 0.002646B_2 + 0.001956B_3}$$

(5)

(4)、(5)两式分别是用 TM 4、2 波段表达的土壤水分含量的定性公式,它可用于监测土壤含水量的多少。而利用 NOAA/AVHRR 遥感信息建立的土壤水分监测模型为:

$$P_{A1} = 42.51 - 31.42\lg\left(\frac{0.4657B_{A1} - 0.1126B_{A2} + 7.6}{0.8712 - 0.004956B_{A2} + 0.002447B_{A1} + 0.04} - 2.4\right)$$

(6)

$$P_{A2} = 45.25 - 34.33\lg\left(\frac{0.5155B_{A1} - 0.1915B_{A2} + 21.2}{0.8712 - 0.004956B_{A2} + 0.002447B_{A1} + 0.04} - 14.4\right)$$

(7)

(6)、(7)式分别是用 AVHRR 1、2 通道数据为主,建立的土壤水分遥感监测模型。

2.4 甘肃省定西县农区典型试验区土壤水分遥感动态监测结果

遥感图象处理与信息提取,是开展土壤含水量遥感监测过程中的一项重要内容,本研究主要是利用数字图象处理技术,模式识别理论以及其它理论,对 1B 数据集的 AVHRR 数据进行再加工,根据本课题要求,进行了多种信息复合,降低信息维数,提取水分信息特征,并形成模型和水分分布图,确定 10~50cm 平均土壤含水量遥感监测模式(表 1)和 0~20cm 土表层回归数学公式(表 2),在亮度值图像上覆盖线划和文字符号注解的二值基础上,对不同波段不同时相的亮度值图象直接叠合成加权组合,从中提取土壤含水量数据,经分级后画出土壤水分遥感监测分布图(图 2),从图 2 可见,一般雨养农区土壤含水量多分布在 10%~15%与 15%~25%两级内,与降水曲线成有规律分布。

利用以上土壤水分遥感监测模型和图 1 运行系统,初步实现了 0~20cm 土层土壤含水量遥感监测,其

表 1 0~50 cm 平均土层土壤含水量遥感监测模式

Table 1 The remote sensing monitoring models of soil moisture in 0~50 cm($n=20$)

| 因子 Factor | 模型 Model | R | F |
|-------------------|---------------------------------------|-------|------|
| 反射率 Reflection | $S_m = -38.33 - 202.100V1 + 310.42V2$ | 0.835 | 9.24 |
| 比值植被指数 RVI | $S_m = 4.78 + 9.03RVI$ | 0.783 | 14.2 |
| 归一化差值植被指数 NDVI | $S_m = 2.54 + 60.86NDVI$ | 0.777 | 13.7 |
| 差值植被指数 DVI | $S_m = -10.12 + 209.70DVI$ | 0.819 | 18.3 |

万方数据

* S_m 平均土壤含水量 Average of soil moisture

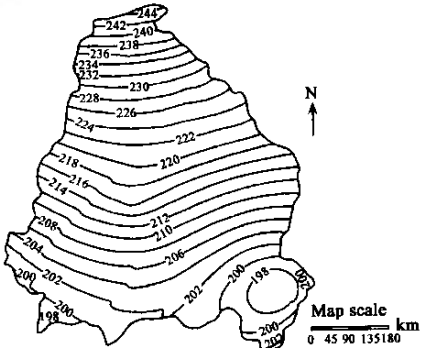


图 2 甘肃省定西县农区土壤水分亏缺量遥感监测空间分布图(0~50cm 平均值)

Fig. 2 The spatial distributed map for remote sensing monitoring of agricultural soil moistures in Dingxi (average in 0~50cm)

模型监测精度到 90% 以上,典型样区实际监测精度达到 72.3%;在 20~50cm 土层土壤含水量遥感监测中,其模型估测精度达到 80% 以上,实际监测精度达到 60%。

表 2 不同深度土壤水分与遥感绿度指数之间的回归模型($n=20$)

| Table 2 Correlation models between soil moistures and vegetation indices in different soil depths (0~20 cm) | | | | | | | | | |
|---|--|--|---------------------------------|--|-----------------------------------|--|----------------------------------|--|--|
| 土壤深度(cm) Soil depths | V1 V2 | | RVI | | DVI | | NDVI | | |
| 0~5 | $y=-50.203-370.450V1-435.191V2$ $r=0.795$ | | $y=-7.582+16.666X$ $r=0.782$ | | $y=-33.035+375.403X$ $r=0.793$ | | $y=-11.344+111.45X$ $r=0.770$ | | |
| | $F=6.9$ | | $F=14.2$ | | $F=15.3$ | | $F=13.1$ | | |
| 5~10 | $y=-54.406-309.927V1-420.090V2$ $r=0.883$ | | $y=0.185+13.283X$ $r=0.810$ | | $y=-23.592+318.359X$ $r=0.874$ | | $y=-4.102+91.905X$ $r=0.825$ | | |
| | $F=14.2$ | | $F=17.1$ | | $F=29.0$ | | $F=19.2$ | | |
| 10~20 | $y=-31.787-201.146V1+286.172V2$ $r=0.829$ | | $y=8.082+8.515X$ $r=0.744$ | | $y=-7.813+207.635X$ $r=0.817$ | | $y=4.888+59.973X$ $r=0.772$ | | |
| | $F=2.9$ | | $F=11.1$ | | $F=18.0$ | | $F=13.2$ | | |

2.5 甘肃省定西县农区典型试验区土壤水分实际含量与小麦产量关系分析结果

从表 3 可见,春小麦自 3 月中旬播种,当年 7 月中、下旬收割,一般需要 130d 左右的生长期,全生育期有效降雨量为 100~140mm,水分亏缺量达 210~300mm,其水分亏缺规律在各生育期表现不同,一般在播种-拔节期,水分亏缺逐渐增大,但相对较少,而到拔节-抽穗期小麦生长的关键期间,土壤水分含量亏缺达到最大,其次是抽穗-成熟期,这两个时期的水分亏缺量占全小麦生长期的 70% 以上。

据高世铭在 1992 年和 1994 年进行的水分补偿小麦生长研究表明,春小麦生长需水关键期补偿供水效应是以幼苗生长发育状态为前提条件的,苗期水分严重亏缺是不可补偿的,水分亏缺成为后期产量高低的限制因子^[8,9]。研究还指出,旱地土壤墒情状况对春小麦后期产量形成具有重要作用。另外,经李锋瑞 1993 年,魏虹 1995 年和武天山 1995 年等的研究结果表明,从整个作物生育期看,小麦水分错位和亏缺最严重的时期是拔节-抽穗期,这一时期降水正处于 5~6 月份的低谷期,而需水量却达到高峰期,供需不协调,造成水分亏缺影响小麦产量成为一种常见现象。经初步分析认为,春小麦在土壤底墒不足,苗期土壤含水量低于 13% (为补偿点)时需进行有限供水,否则严重影响小麦产量^[8~10](表 2)。

表 3 不同生育期春小麦需水量、实测土壤含水量、水分亏缺量和产量结果(1997~1998 年平均值)

| Table 3 The water requirements, soil moistures, shortage water and yields of Spring Wheat in 1997~1998 | | | | | |
|--|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 生育期 Growthhages | 播种-出苗 Sowing-seedling | 出苗-分蘖 Seedling-tillering | 分蘖-拔节 Tillering-jointing | 拔节-抽穗 Jointing-heading | 抽穗-成熟 Heading-maturing |
| 理论需水量 ET _m (mm) | 18.5 | 19.3 | 52.8 | 132.4 | 134.6 |
| 实测(0~30cm)土壤含水量 % Water contents in 0~30cm | 12.1 | 17.1 | 11.4 | 8.9 | 12.7 |
| 水分亏缺量 WD(mm) | 7.4 | 7.9 | 35 | 95.8 | 71.3 |
| 小麦鲜重产量 (kg/hm ²) Fresh yields in wheat | 100.5 | 400.5 | 600.0 | 3402.0 | 5002.5 |

根据 1997~1998 年在定西样地观测资料统计,当土壤含水量为田间最大持水量的 55%~85% 时^[11],作物生长良好。而当土壤含水量观测值低于 6.4% 时(6 月 21 日),春小麦开始出现大面积萎蔫,生长停止,若不再给予供水,一周后即将枯黄死亡。因此,在此时人工灌水,水分利用效率最高,补播效果最好。另外,经两年多的大量观测数据分析,在定西地区土壤底墒在土壤含水量为 20%~25% 时进行播种,可确保出苗,此时,开始春播一般可获全苗。诚然,利用遥感和 GIS 等技术,建立能够在大范围内快速监测小麦生长状况、小麦土壤水分亏缺量和补灌量等信息的决策管理系统,对今后实现农业生产科学管理,发展信息和精确农业提供理论依据^[11]。

3 结论 万方数据

由于土壤水分受多种因素影响,又有植被覆盖的干扰,为此,土壤水分遥感监测难度很大。为克服传统

方法,如热惯量、土钻法和示踪原子法的不足,则更侧重于土壤水分与光谱之间的直接关系,本文采用土壤水分遥感光谱法来监测大面积土壤含水量动态变化。对于植被和地形的影响,则采用遥感估测光学植被盖度,分解象元排除干扰法来提取土壤水分信息。这样更适合于大面积农业土壤水分遥感动态监测与预报。

经大量地面观测资料的分析,基本摸清了试验区土壤含水量和作物产量之间存在的时空变化规律与特征(表 1~2);初步建立了地面观测资料与卫星遥感信息数据库与土壤水分遥感监测信息系统。实现了 RS 与 GIS 的结合,初步建立了地面资料与卫星遥感信息匹配与相关动态监测模型。利用遥感光谱法和数学统计方法求出了有关物理参数,初步建立了 TM 与 NOAA 光谱水分监测模型,其模型监测 0~20cm 土层含水量的精度达到 90%以上,实际监测土壤水分精度达到 72.3%;在遥感监测 20~50cm 土层土壤含水量中,利用遥感模型监测土壤水分精度达到 80%以上,实际遥感监测精度达到 60%左右。

经两年多的测定和研究发现,一般来说土壤含水量在田间最大持水量的 55%~85%时,作物生长最佳。该试验区土壤含水量在 6.4%~25%,作物可正常生长,在土壤含水量低于 6.4%时,一般作物趋于停止生长,开始萎蔫。其作物水肥补偿点为土壤含水量在 6.4%左右时,进行水分补灌,效果最佳。一般土壤底墒在土壤含水量为 20%~25%时进行播种,可确保出苗和增产^[11]。

References:

- [1] Liu P J, Zhang L, Ku R B, *et al.* An estimating model of optical vegetation coverage using TM data. *Remote Sensing Technology and Application*, 1995, **10** (4): 9~14.
- [2] Cai H J, Xiong Y Z, Li P D. Remote sensing of infrared canopy temperature to estimate soil water status. *Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis*, 1994, **22** (1): 113~118.
- [3] Andre C. Basic soil surface characteristics derives from Microwave remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 1993, **7**: 303~319.
- [4] Tian G L. Methods for monitoring soil moisture using remote sensing technique. *Remote Sensing of Environment China*, 1991, **16** (2): 89~99.
- [5] Zhai R, Kachanoski R G. Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. *Soil Science*, 1990, **54** (1): 21~25.
- [6] Wei W Q, Chen X W. A model and its application of soil water content monitoring by meteorological satellite. *J. of Wuhan Univ of Hydr. & Elec Eng*, 1993, **26** (6): 50~57.
- [7] Wu T Y, Wang S L, Deng J Z, *et al.* Simulation of effects of nitrogen applying in different rainfall on dryland winter wheat in Longdong. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1995, **4** (2): 63~69.
- [8] Zhao S L. *Water harvesting agricultural science*, Xian: Shanxi Scientific Press, 1996. 90~250.
- [9] Gao S M, Zhu R S, He B L. Limited water supply and mulching conservation for moisture on rained crops. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 1995, **4** (2): 59~63.
- [10] Wei H, Zhao S L. Study on the water supply and requirement of what in the semiarid regions of Gansu Loess Plateau. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 1995, **15** (8): 1~8.
- [11] Li J L. *Arid Agricultural Ecological Engineering*. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 65~125.

参考文献:

- [1] 刘培君,张琳,库尔班,等. 用 TM 数据估测光学植被盖度的方法. 遥感技术与应用, 1995, **10** (4): 9~14.
- [2] 蔡焕杰,熊运章,李培德. 遥感红外温度估算农田土壤水分状况研究. 西北农业大学学报, 1994, **22** (1): 113~118.
- [4] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. 环境遥感, 1991, **16** (2): 89~99.
- [6] 魏文秋,陈秀万. 气象卫星监测土壤含水量模型及其方法. 武汉水利电力大学学报, 1993, **26** (6): 50~57.
- [7] 武天云,王生录,邓娟珍,等. 陇东旱塬地区冬小麦水肥效应耦合模拟研究. 西北农业学报, 1995, **4** (2): 63~69.
- [8] 赵松岭. 集水农业引论. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996. 90~250.
- [9] 高世铭,朱润身,何宝林. 旱地作物有限补充供水与覆盖保水效果研究. 西北农业学报, 1995, **4** (2): 59~63.
- [10] 魏虹,赵松岭. 黄土高原半干旱区小麦水分供需耦合规律的研究. 西北植物学报, 1995, **15** (8): 1~8.
- [11] 李建龙. 干旱农业生态工程学. 北京: 化学工业出版社, 2002. 65~125.