

塔里木河中游沙漠化地区地下水位遥感监测

管文轲¹, 霍艾迪², 吴天忠¹, 何晓霞³, 易秀², 钟家骅², 温轶然²

(1. 新疆林业科学院 造林治沙研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 新疆塔里木胡杨林国家级自然保护区, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: [目的] 探讨沙漠化地区地下水位的分布状况及其对沙漠植被的影响, 为塔里木河流域生态环境保护提供科学依据。[方法] 利用 MODIS 卫星遥感数据, 采用遥感—数学—模型学融合的研究方法, 在实地考察塔里木河中游区域的地下水位、土壤水分和其他辅助资料的基础上, 通过建立土壤水分和地下水位的线性方程, 提出在土壤中存在毛细管补给条件时, 简便、有效地监测沙漠化地区地下水埋深的监测模型, 并在塔河中游沙漠化地区进行实地验证。[结果] 该模型反演地下水位和实测地下水位之间的相关系数为 0.896 9, 误差较小。研究结果符合实际。[结论] 在较大范围且地下水埋深不大于 6 m 的沙漠化地区, 利用 MODIS 多波段遥感模型监测并评价地下水埋深的空间分布是可行的。

关键词: 沙漠化地区; MODIS 数据; 地下水位; 遥感监测模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)05-0245-05

中图分类号: TP79, P641.8

文献参数: 管文轲, 霍艾迪, 吴天忠, 等. 塔里木河中游沙漠化地区地下水位遥感监测[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 245-249. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.041; Guan Wenke, Huo Aidi, Wu Tianzhong, et al. Remote sensing monitoring of groundwater level of desertification area in middle reaches of Tarim River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 245-249. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.041

Remote Sensing Monitoring of Groundwater Level of Desertification Area in Middle Reaches of Tarim River

GUAN Wenke¹, HUO Aidi², WU Tianzhong¹, HE Xiaoxia³, YI Xiu², ZHONG Jiahua², WEN Yiran²

(1. Afforestation Desert Control Research Institute, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 830000, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Xinjiang Tarim Populus Euphratica National Nature Reserve, Korla, Xinjiang Uygur Autonomous Region, 841000, China)

Abstract: [Objective] In order to provide the theoretical basis for protecting the ecological environment of Tarim River Basin, the spatial distribution of groundwater level and its effects on vegetation in Aeolian desertification areas was explored. [Methods] MODIS satellite remote sensing image data and combined method of remote sensing-mathematical-model were used. Field investigations of groundwater level, soil moisture, and other relevant information in desertification area in the middle reaches of Tarim River in Xinjiang Uygur Autonomous region were measured. Through the empirical model fitting between the measured soil moisture as independent variable and groundwater level as dependent variable, under the prerequisite condition when there is capillary supply in soil, a simple and effective remote sensing method was proposed, and it was verified that can be used to evaluate the distribution of groundwater level based on the MODIS image data. [Results] The correlation coefficient of the measured groundwater and the remote sensing retrieved water level was 0.896 9, and the error was small. The result proved that the model is applicable. [Conclusion]

收稿日期: 2016-11-10

修回日期: 2017-02-21

资助项目: 中央财政林业科技推广示范, 跨区域重点推广(其他推广)示范项目“塔里木盆地北缘低覆盖度防沙治沙技术示范”(新[2016]TG12)

第一作者: 管文轲(1972—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区吉木萨尔县人, 硕士, 主要从事荒漠化防治与林业生态研究和推广。E-mail: gwk1125@sina.com。

通讯作者: 霍艾迪(1971—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: huoaide@163.com。

When groundwater depth is not more than 6 m, it is feasible to use MODIS multi band remote sensing data to monitor and evaluate the groundwater level and its spatial distribution in the desertification area.

Keywords: aeolian areas; MODIS image data; groundwater level; RS monitoring model

地下水是非常重要的自然资源之一。区域地下水埋深是了解区域地下水资源状况的一个重要参数,它与区域生态环境息息相关。一般来说,常规的获取地下水埋深的方法为长观法、统测法等,但实现这些方法的基础条件是该区必须有观测井或机、民井。在沙漠化地区,尤其是在新疆塔里木河流域,这样的条件是很难满足的,这就需要有更先进的监测技术和手段。因此,合理利用地下水,探索地下水位监测省钱、省力的科学方法,对干旱、半干旱地区的生态平衡、经济建设和可持续发展至关重要。

现阶段,利用遥感卫星影像进行地下水位监测技术和方法取得了蓬勃的发展。如有学者发现植被的生长发育或退化与地下水位埋深基本呈动态平衡关系^[1]。另一方面,研究人员运用遥感数据及 PCA 间接排序法识别上海崇明东滩自然保护区的盐沼植被取得了较好效果^[2]。也有学者通过遥感从研究植被、水系、温度等因素与地下水的依存、制约关系,推断出了地下水富集带^[3-5]。20 世纪 90 年代后期,对于地下水位埋深遥感监测研究发展到 RS, GIS, GPS 一体化应用研究方向。通过建立多源遥感资料与水文、地质和物探资料的拟合关系曲线,建立由地质、地貌、水文因素线形特征图、土地利用图, DEM 和实测数据构成的地理信息系统,推断浅层地下水富水区、地下水位埋深等^[6-9]。还有学者利用雷达图像在土壤介电常数和土壤对雷达波段的反射特性,提出了在地下水位 3 m 以上的高水位区测定地下水位的方法^[10-11]。以上研究从不同的视角探索了遥感监测地下水位的方法,这些方法有共同的特点,就是通过遥感手段,间接获取地下水位埋深。也有不少学者认为植被群落能较好地体现浅层地下水位埋深,但是至今为止,尚未有人将两者直接联系起来进行较深入的沙漠化区域浅层地下水埋深空间分布研究。遥感具有宏观、综合、动态、快速等特点,为地下水资源调查和监测提供了新的探测手段。

塔里木河中游沙漠化地区光照强烈,在一定程度上可以忽略植被对反射率的影响,可以把像元反射率看成是纯土壤反射率。这使经土壤水分的遥感建立有效监测地下水位遥感模型具备了前提条件。本文拟通过遥感技术建立土壤水分与地下水位之间的关系,探索满足一定条件下的地下水位遥感监测的省钱、省力的科学方法。

1 研究方法

1.1 土壤水分与光谱反射率的关系

水体在近红外和中红外波段内的反射能量很少,而植被、土壤在这 2 个波段内的吸收能量较小,而且具有较高的反射特性。沙漠化地区植被稀疏,因此,这为在忽略植被对土壤水分遥感影响的情况下,研究土壤水分和光谱反射率的关系提供了有利条件。

有研究表明随土壤水分含量的增加而反射率呈下降趋势,土壤水分含量与遥感影像 MODIS 的 Band7 波段的反射率一元线性回归公式为^[12-13]:

$$M = -0.2706B_7 + 0.1396 \quad (1)$$

式中: M ——土壤水分含量; B_7 ——MODIS 影像数据的 Band7 波段的反射率。

1.2 地下水位遥感监测模型的建立

在土壤中存在毛管补给作用的沙漠化地区,地表浅层土壤水分含量是地下水位高低的直接反映。当潜水位高时,浅层土壤得到毛细管水的补给,使其保持较高的土壤含水量;随着潜水位的下降,浅层土壤含水量随毛细管水的补给减少、中断而逐渐下降。因此,遥感监测研究区内地下水位的物理基础是:在地下水位以上的土壤中存在毛细管,地下水通过毛细管作用能够上升到浅层土壤;地表土壤的反射光谱特征在一定程度上能够反映地表浅层土壤的水分含量状况。

假设 y 为从地面往下的垂直坐标轴, $y=0$ 为土壤—大气接触面。水分在毛细管中的分配可以用下式来描述^[14]:

$$M^2(y) = A + By, \max(0, H - H_m) \leq y \leq H_m \quad (2)$$

式中: M ——土壤水分; H ——地下水埋深深度(m); H_m ——从地下水—土壤接触面地下水能上升到毛细管的高度(m)。 H_m 和土壤的理化性质有关,同样土壤类型具有同样的 H_m 值,土壤类型不同,地下水能上升到毛细管的高度也不一样。常数 A 和 B 由下面的 3 种边界条件来定义:

①土壤—地下水接触面, $y=H$, 土壤水分为最大值 M_{\max} 。

②地下水能上升到毛细管的高度处, $y=H-H_m$, 土壤水分为最小值 M_{\min} 。

③在土壤—大气接触面, $y=0$, 土壤水分为 M_0 。

通过把①和②边界条件运用到(2)式可得:

$$A = M_{\max}^2 - (M_{\max}^2 - M_{\min}^2) \frac{H}{H_m}, B = \frac{M_{\max}^2 - M_{\min}^2}{H_m} \quad (3)$$

若条件②被③代替:

$$A = M_0^2, B = \frac{M_{\max}^2 - M_0^2}{H} \quad (4)$$

研究区域年均降水量约为 45.2 mm, 年均蒸发量却高达 1 887~2 910 mm, 约是降水量的 40 倍。土壤为固定、半固定沙丘上发育的风沙土, 地表土壤水分 $M_0=0$, 所以地下水位和地表土壤水分之间基本上没有相关关系, 而在此不必考虑(4)式。在常数 M_{\max} , M_{\min} 和 H_m 已知, 并且遥感监测土壤水分的有效深度被测定的条件下, 公式(2)为遥感监测地下水位提供了基础条件。不过, 由于遥感监测土壤水分有效深度只限于近地表很浅的土层, 对于卫星来说, 监测土壤水分的有效深度一般为 0.10 m^[15], 而浅层土壤水分和地下水位之间的相关关系不太稳定, 准确地反映地下水位不是那么简单的事情。下面从 3 种不同条件分析不同深度土壤水分和相应地下水位的关系。

(1) 地下水溢出地表的情况 ($H < H_m$)。由于地下水上升到地表浅层, 浅层土壤水分等于最大土壤水分, 传感器只能记录潮湿的地表反射或散射的电磁波, 这样, 遥感监测到的是有地下水溢出的地表。

(2) 毛细管条件 ($H \ll H_m$)。地下水位比第 1 种情况的地下水位低, 但毛细管作用的表现使土壤浅层土壤水分的遥测成为了可能。

(3) 地下水位很低的情况 ($H > H_m$)。因为地下水位很低, 地下水不能通过毛细管作用达到地面, 无法实现地下水位的遥测。

由此可知, 在第一种情况, 地下水溢出地表, 浅层土壤过度潮湿, 形成沼泽地, 地下水在遥感图像中的表现多为水体。之所以第 2 种情况很有研究意义, 是因为地下水没有溢出地表, 埋深深度比较理想。若用 d 来表示监测土壤水分的有效深度, 并 $y=d$, 用 M_d 来表示 d 深处土壤水分, 式(3)代入式(2)可以得到土壤水分—地下水位关系方程, 即:

$$H = d + H_m = \frac{M_{\max}^2 - M_d^2}{M_{\max}^2 - M_{\min}^2} \quad (5)$$

式中: H ——地下水位的埋深(m); d ——监测土壤水分的有效深度(m); H_m ——从地下水—土壤接触面地下水能上升到毛细管的高度(m); M_{\max} , M_{\min} ——土壤水分的最大值和最小值; M_d —— d 深处土壤水分含量(%)。

2 试验数据

2.1 研究区域

新疆塔里木河中游沙漠化区域地处塔克拉玛干

大沙漠北缘, 位于中国最长的内陆河——塔里木河中游, 是塔里木盆地内陆干旱区中以胡杨林荒漠生态系统为保护对象的森林类型的主要保护区。属典型的温带大陆性平原区荒漠气候。区内年平均气温 9.7~10.8℃; 多年平均降水量为 45.2 mm, 蒸发量却高达 1 887~2 910 mm。全年盛行东北风, 其次为西南风; 总的特征概括为: 少雨、干旱、酷热、多风。地貌类型组成为冲积洪积平原和沙漠, 地势平缓, 海拔 800~940 m。由于塔里木河弯曲摆动形成的河漫滩、阶地、洼地、沙丘地等多个地貌单元, 为胡杨林及柽柳等灌丛的生长及其演替提供了很好的生长地。“林随水生”是胡杨林自然分布区最大特点之一。在荒漠生态系统中, 水是影响胡杨林发生、发展的主导因素, 可以说河流是根本, 地下水是命脉, 胡杨林源于河流, 又受制于河流。

2.2 MODIS 影像数据

本研究采用的数据是 Terra MODIS 产品 MOD09 A1(全球 500m 地表反射率 8 d 合成数据)。Terra 卫星过境时间在上午 10:30 和晚间 22:30 左右。MOD09 A1 数据空间分辨率为 500 m(实际上是 463.3 m)分辨率的 1—7 波段 8 d 合成的地表反射率, 去除了云及云影干扰。可以用来监测地球植被的季节变化和年际变化。这些数据是由 NASA 提供(<http://wist.echo.nasa.gov/api/>), 可以从地球观测系统(EOS)计划的 NASA 网站上下载^[16]。下载过程中也要尽量选择研究区噪音点最少的卫星影像, 为了使对原始数据的干扰最小化, 对下载的影像没有进行其他处理。

地下水位实测是在 2008 年 8 月进行的, 为了与地下水位资料相对应, 本研究选取了 2008 年 8 月的 MODIS 数据。

2.3 地面实测数据

2008 年 8 月份, 在塔里木河中游两岸沙漠化地区进行了实地考察, 确保考察期间及前 10 d 内研究区无降雨, 选择 81 个样点实测了以下数据: 土壤表面含水量、表层 0.10, 0.20 m 土壤含水量、地下水位。其目的是调整土壤水分遥感监测模型, 建立定量评价地下水位的经验公式。实测值和遥感影像反演值根据经纬度进行空间位置精确对应。对样方的选择主要考虑样方的代表性, 尽量选择面积较大、土壤和植被类型比较均一、垂直于塔河流向且距离塔河不能太远的区域设立实测样点。

在实测的同时, 另外还对研究区植被覆盖率、不同深度的土壤水分、不同深度的土壤温度、毛细管特征、地下水位和地表到地下水上升到的土层厚度进行

了实地考察,收集了该地区植被、水、土壤、地质地貌等大量资料,同时还收集了气象站 2008 年 6—8 月的气象数据,以及研究区内机井的经纬度、高程、静水位埋深及水位等数据。在可能的情况下,样点的位置应尽量选择符合面积较大,分布均匀,具有代表性的要求。其中地下水位的探测方法为:利用手工钻由地表向地下钻取土样到潜水面为止,每钻下 10 cm 取出土样 1 次,根据土样的土壤含水量判断是否到潜水面,这样的方法可以保证地下水水位值的误差度在 10 cm 之内。使用这种方法测量的数据共 81 个,误差在 1 cm 以内^[17]。

2.4 模型部分参数的测定

d : 遥感传感器监测土壤水分的有效深度, $d = 0.10 \text{ m}$ ^[16]。

M_{\max} : 地下水与土壤接触面土壤水分的最大值; M_{\min} : 沙漠化地区从地面到地表 0.08~0.10 m 深处土壤水分含量,几乎为零,这说明地下水只能达到此深处或地表蒸发量高。根据 M_{\min} 的定义,有效最小土壤水分是对 0.10 m 深处的土壤水分数据进行统计分析算出来的。计算时首先对 MODIS 影像计算土壤水分含量值,然后利用研究区域边界对生成的土壤水分含量图进行切割,提取每一单元内的土壤水分含量值,针对每个单元计算水分含量值的频率累积值^[18-19]。最后根据频率累积表,水分含量单元的内取频率为 5% 的土壤湿度值为 $M_{\min} = 0.05\%$; 土壤水分含量单元的内取频率为 95% 的土壤湿度值为 $M_{\max} = 24.11\%$ 。

H_m : 地下水通过毛细管能够上升的高度,它跟土壤质地、结构和理化性质有关,同一类土壤有相等的 H_m 值。由于条件的限制,在野外实地调查中,我们采用下面的方法确定了 $H_m = 6.00 \text{ m}$; 在研究区选择 81 个比较典型的样点,根据野外实测的地下水位 H , 从地表到地下水上升到的土层厚度 x , 利用公式 $H_m = H - x$ 估测,取其平均值。

把以上的参数值代入(5)式,得

$$H = 6.012 - 0.011M_d^2 \quad (6)$$

式中: H ——地下水位的高度(m); M_d —— d 深处土壤水分百分含量(%)。

3 结果与分析

3.1 地下水位的生成

利用 ENVI 软件,将公式(6)输入波段运算工具中,利用波段运算工具计算其地下水位 H , 然后按地下水位的高低对图像进行分类,得到地下水位分布。高值区主要分布在裸露沙地、戈壁区域。低值区

分布在土壤湿度比较大,植被较好的区域。最小值所在区域为一些坑塘水面。从总体来看,地下水位的分布情况基本符合实际。

以野外实地调查为佐证,对塔里木河中游沙漠化区域的水文变化进行综合分析研究,并综合地貌、土地利用现状图、气象资料和社会经济信息,对引起水文要素变化的原因进行分析。分析结果表明:引起塔里木河中游区域的水文变化一个重要原因是人为干扰增强,比如出现在塔河两岸及河道部分区域的开荒种田等现象。

3.2 地下水位的验证

为了验证地下水水位遥感定量监测模型,在 2008 年 8 月对研究区内 81 处的经纬度、高程、静水位埋深及水位等进行了调查,利用这 81 个数据验证模型的精度。在尽可能的情况下,样点位置的选择符合分布均匀,具有一定代表性的要求。考察期间研究区天气情况基本晴朗,无雨无大风,因此建立模型时,没有考虑降雨和风速对土壤水分的影响。根据实测样点的经纬度值,从反演的结果图像中选择出对应的埋深,制作了实测地下水埋深与模型反演结果比较图(图 1—2),其相关系数为 0.896 9。

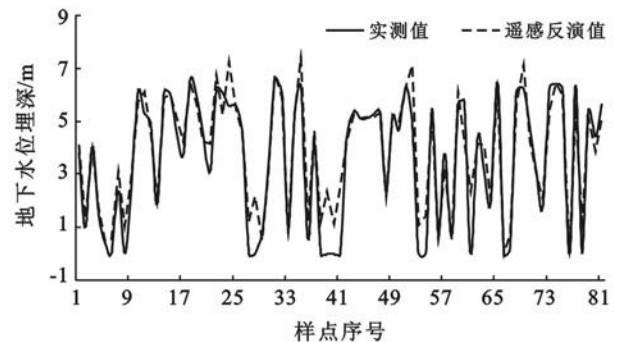


图 1 实测地下水埋深数据与模型反演结果比较

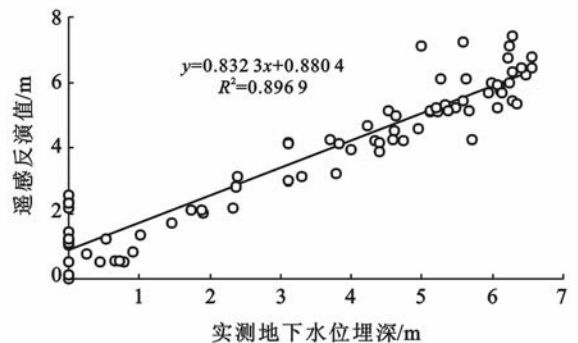


图 2 实测数据与模型反演结果比较

通过图 1 可知,在接近公式前提假设的条件下,即地下水埋深不大于 6 m 的沙漠化地区,且范围较大,植被稀疏, $H_m = 6 \text{ m}$ 的同一类土壤,根据气象资

料遥感成像前后和实测期间前后无降雨的条件下,遥感反演结果和实测结果吻合较好。地下水埋深不大于6 m,其原因主要是和遥感监测地下水位的物理基础有关,也就是说地下水通过毛细管作用能够上升到达浅层土壤的最大距离应该是6 m,大于6 m时毛细管水不能上升到地表,遥感监测不到土壤湿度的变化,而小于和等于6 m时,才符合遥感监测地下水位的物理条件。

图2中可以看出,大部分情况下,遥感反演值低于实测值。原因主要是实测数据来源于观测孔处的实测值,代表的是点上的数据。而遥感反演的是象元区域内的一个平均值,也就是单位象元(500×500 m)面积上的平均值,所以遥感反演值与实测值相比偏低。

4 结论与讨论

本文采用遥感—数学—模型学融合的研究方法,从遥感在水利方面应用的角度出发,提出了沙漠化地区在土壤中存在毛细管补给条件时,简便、有效地监测地下水埋深的遥感模型。

研究表明,塔里木河中游沙漠化区域实测与遥感反演地下水埋深数据结果相比较,其相关系数为0.896 9。用以上模型把图像转换成地下水位的分布图,从模型监测的地下水位分布情况看,研究结果符合实际。

在干旱、半干旱地区,尤其在地下水埋深不大于6 m的沙漠化地区,且范围较大,利用MODIS多波段遥感模型监测并评价地下水位分布是可行的。

在接近公式前提假设的条件下遥感反演结果和实测结果吻合较好,因此本模型可以在类似于本研究区条件下使用,即符合植被稀疏,地下水毛细管上升高度同本研究区相同,土壤类型相同,根据气象资料遥感成像前后和实测期间前后无降雨。

在非沙漠化地区,中高分辨率的landsat卫星数据在监测土壤水分方面都有一定的难度,但沙漠化地区一般面积较大,地表土壤和植被比较均一,气候干燥少雨。在这样的条件下,尽管MODIS数据分辨率本身较低又是合成图像,模型计算本身也存在误差,但是还是会取得不错的反演效果。

利用MODIS遥感监测模型可以在宏观上反演地下水埋深,但是存在的误差也不能忽视,其来源主要是:

(1) 由于本文所使用的是2008年8月MODIS图像,实地调查也是在2008年8月进行的,调查时间尽量选择在当日天气晴朗,无风,且无前期降雨的条件

下进行。虽然地面调查与卫星成像时间在同月,但仍然存在不同天的误差。

(2) 在模型推导过程中,参数推算精度对结果精度的影响很大。在计算过程中,观测数据量小,影响参数的精确性。

(3) 除了土壤水分以外,反映地下水位变化的因素还有植被类型、植被覆盖度、土壤温度,这3种因素随地下水位的高低而变化。

因此,建立地下水位遥感监测模型时,综合考虑植被类型、植被覆盖度、土壤温度等因素提供的信息,具有进一步的研究价值。

[参 考 文 献]

- [1] 马兴华,王桑. 甘肃疏勒河流域植被退化与地下水位及矿化度的关系[J]. 甘肃林业科技, 2005, 30(2): 53-54, 75.
- [2] 高占国,张利权. 盐沼植被光谱特征的间接排序识别分析[J]. 国土资源遥感, 2006(2): 51-56.
- [3] 王飞跃,孙顺新. 环境遥感信息分析法在干旱区找水中的应用:以内蒙锡林浩特地区为例[J]. 国土资源遥感, 1999(1): 36-42.
- [4] Finch J W. Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model-sensitivity to land surface parameters[J]. Journal of Hydrology, 1998, 211(1): 112-125.
- [5] Finch J, Giaouris D. Controlled AC electrical drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 481.
- [6] 塔西甫拉提·特依拜,阿布都瓦斯提·吾拉木. 绿洲—荒漠交错带地下水位分布的遥感模型研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(4): 299-306, T004.
- [7] 塔西甫拉提·特依拜,崔建永,丁建丽. 红外遥感技术探测干旱区绿洲—荒漠交错带地下水分布的方法研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 252-257.
- [8] 舒云巧,陈素英,雷玉平,等. 京津走廊麦田蒸散及其与地下水位变化关系研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 71-74.
- [9] 石迎春,郭娇,毕志伟. 利用TM影像确定浅层潜水埋深分区初探:以新黄河三角洲为例[J]. 河北遥感, 2007(1): 15-18.
- [10] Komarov S A. Studies on gastrin: I. Methods of isolation of a specific gastric secretagogue from the pyloric mucous membrane and its chemical properties[J]. Rev Can Biol, 1942, 1: 191-205.
- [11] Mironov V L, Komarov S A, Rychkova N V, et al. Study of the dielectric properties of wet grounds at microwave frequencies[J]. Earth Observation and Remote Sensing, 1995, 12(4): 495-504.

<传统化肥<对照;孔隙度、团聚体、持水量、有机质、速效氮磷钾、微生物、酶活性、杂交饲用甜高粱农艺性状、经济性状和产量由大到小的变化顺序依次为:有机营养功能型土壤改良剂>传统化肥>对照。在甘肃河西走廊的灰棕荒漠土上施用有机营养功能型土壤改良剂,有效的改善了土壤理化性质,提高了土壤持水量和杂交饲用甜高粱产量,促进了糠醛渣废弃物资源的循环利用和增值。

[参 考 文 献]

- [1] 吴淑芳,吴普特,冯浩. 高分子聚合物对土壤物理性质的影响研究[J]. 水土保持通报,2003,23(1):42-45.
- [2] 汪德水,张美荣,典雄. 乳化沥青作为土壤结构改良剂改土保水增产的研究[J]. 石油沥青,1990(3):21-24.
- [3] 郭和蓉,陈琼贤,郑少玲,等. 营养型土壤改良剂对酸性土壤中磷的活化及玉米吸磷的影响[J]. 华南农业大学学报,2004,25(1):29-32.
- [4] 郭和蓉,陈琼贤,郑少玲,等. 营养型土壤改良剂对酸性土壤中钾的调节及玉米吸钾量的影响[J]. 土壤肥料,2004(2):20-22.
- [5] 周恩湘,姜淳,霍习良,等. 沸石改良滨海盐化潮土的研究[J]. 河北农业大学学报,1991(1):14-18.
- [6] 王志玉,刘作新. 土壤改良剂MDM对草甸碱土和水稻生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(2):31-34.
- [7] 秦嘉海,陈广全. 改性糠醛渣混合基质在番茄无土栽培中的应用[J]. 中国蔬菜 1997(4):13-15.
- [8] 陈世和. 城市垃圾堆肥原理与工艺[M]. 上海:复旦大学出版社,1990:52-68.
- [9] 秦嘉海,张春年. 改性糠醛渣的改土增产效应[J]. 土壤通报,1994,25(5):237-238.
- [10] 廖宗文. 工业废物的农用资源化:理论、技术和实践[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996:26-28.
- [11] 葛均青,于贤昌,王竹红. 微生物肥料效应及其应用展望[J]. 中国生态农业学报,2003,11(3):87-88.
- [12] 高树清,王炳华,徐静,等. 有机营养功能型土壤改良剂生产中发酵菌剂的选择研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(14):7251-7253.
- [13] 秦嘉海,金自学,刘金荣. 含钾有机废弃物改性糠醛渣改良效果研究[J]. 土壤通报,2007,38(4):705-708.
- [14] 明道绪. 田间试验与统计分析[M]. 北京:科学出版社,2014:185-188.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 灰棕荒漠土理化分析[M]. 上海:科学技术出版社,1978:110-218.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:61-66.
- [17] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 灰棕荒漠土农业化学常规分析法[M]. 北京:科学出版社,1983:106-208.
- [18] 浙江农业大学. 植物营养与肥料[M]. 北京:中国农业出版社,1988:268-269.
- [19] 陈伦寿,李仁岗. 农田施肥原理与实践[M]. 北京:中国农业出版社,1983:185-186.
- [20] 陕西省农林学校. 灰棕荒漠土肥科学[M]. 北京:中国农业出版社,1987:227-228.
- [21] 于秀林,任雪松. 多元统计分析[M]. 北京:中国统计出版社,1999:166-170.
- [22] 陕西省农林学校. 灰棕荒漠土肥科学[M]. 北京:中国农业出版社,1987:26-27.
- [23] 陆欣. 灰棕荒漠土肥科学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2004:50-52.
- [12] 霍艾迪. 基于MODIS数据的沙漠化遥感监测技术研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [13] Huo Aidi, Chen Xunhong, Li Hua, et al. Development and testing of a remote sensing-based model for estimating groundwater levels in aeolian desert areas of China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011,91(1):29-37.
- [14] Komarov S A, Mironov V L, Romanov A N, et al. Remote sensing of the water table: Measurement and a data processing algorithm[J]. Mapping Sciences and Remote Sensing, 1999,36(1):1-10.
- [15] 刘培君,李良序. 卫星遥感估测土壤水分的一种方法[J]. 遥感学报,1997,1(2):135-138.
- [16] Lumetta R S, Knight J F, Ediriwickrema J, et al. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2006,105(2):142-154.
- [17] 阿布都沙勒克·努尔巴衣,马木提·库尔班. 策勒县绿洲—荒漠交错带生态环境特点及其保护措施[J]. 新疆大学学报:自然科学版,2001,21(1):45-47.
- [18] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学,2004,26(4):153-159.
- [19] Huo Aidi, Zhang Jia, Cheng Yuxiang, et al. Assessing the effect of scaling methods on retrieval of soil moisture based on MODIS images in arid regions[J]. Toxicological and Environmental Chemistry, 2016,98(3/4):410-418.

(上接第249页)