

# 基于 GIS 的黄土丘陵区土壤水分制图 与动态模拟方法研究<sup>\*</sup>

张周平<sup>1</sup>, 王 勇<sup>2</sup>

(1. 西安市勘察测绘院, 西安 710048; 2. 黄河水利委员会中游水文水资源局, 山西 晋中 030600)

**摘 要:**以空间图形和数据库为基础, 利用 GIS 把特定区域内土壤水分样点数据与地理数据结合起来, 建立不同利用类型- 土地类型- 坡度分级- 坡向等的浮点型土壤含水率字段, 对区域尺度土壤水分制图及其动态模拟方法进行了研究和探讨。

**关键词:**GIS; 黄土丘陵区; 土壤水分; 制图; 动态模拟

中图分类号: S152. 7; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)04-0141-04

## Mapping and Dynamic Simulation of Soil Moisture Using GIS Techniques

ZHANG Zhou-ping<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>

(1. Xi'an Institute of Prospecting & Mapping, Xi'an 712100, China;

2. Bureau of Hydrology and Water Resources of the Middle Yellow River, Jinzhong, Shanxi 030600, China)

**Abstract:** Based on spatial databases and sampled soil moisture data, a soil moisture mapping with its dynamic simulation method was developed to relate the sampled soil water data to different combinations of land use, land type, slope grade and slope orientation and other using GIS techniques, moreover, soil moisture mapping and dynamic simulation methods were discussed on the regional scale.

**Key words:** GIS; the Loess hilly region; soil moisture; mapping; dynamic simulation

土壤水分研究是土壤研究的一个重要方面, 不仅涉及土壤剖面、土壤溶质运移过程等基础研究, 涉及土壤质量时空演变规律等研究, 其中土壤水分制图理论与定量分析是一项重要研究内容<sup>[1-4]</sup>。土壤水分数字制图方法有别于传统的土壤制图模式, 是一种基于遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)技术的数字制图方法。它在传统制图理论和方法指导下, 吸收地统计学研究成果, 在地学模型支持下完成对土壤水分空间分布和动态变化特征的特征。

### 1 土壤水分制图的过程

土壤水分数字制图一般过程是: 收集各个采样点土壤水分分析数据, 依据生态学、水文学、空间统

计学理论与方法, 以 ARCGIS 为平台, 在野外调查的基础上, 借助遥感航片、气象、社会经济等资料, 通过制订符合实际的土地利用、土地类型、坡度、坡向和土壤水分分类系统; 采用点面扩展方法, 在对土地利用图、土地类型图、坡度图、坡向图和样点图进行投影变换之后, 将包含各个采样点坐标的数据库导入 GIS 软件中, 通过软件连接, 生成不同土层土壤水分图。进行区域土壤水分的制图和分析, 是以空间背景数据库为基础的。为了数据的高效管理和分析应用、数据的更新和交换、数据的质量控制, 数据库的标准化和规范化是必须的。

#### 1.1 基础图件的准备

收集研究区的土地利用图、坡度图、土地类型图以及其他有关的图件, 在 ARC 环境下进行数字化,

\* 收稿日期: 2006-06-04

基金项目: 陕西省自然科学基金(14210102); 欧盟项目(FP6, 037046)资助

作者简介: 张周平(1969-), 男, 汉族, 陕西省西安人, 副院长, 硕士, 主要从事 GIS 和 GPS 应用研究。

建立土地利用数字图、坡度数字图、土地类型数字图、研究区界线图、乡界图、水系图等等。有条件的还要对地形图进行数字化,建立研究区的数字高程模型(DEM)。要求把各种基础图件来源不同、比例尺和投影以及坐标系统各种各样的图件统一到一个坐标系统上来。

### 1.2 专题数据库的建立

(1) 土地利用。根据土地利用特点、经营方式、立地条件及地貌特点等,参考国家有关部门土地利用分类规程,确定了研究区土地利用分类系统(表 1),编绘研究区土地利用图。

表 1 土地利用分类系统

代码	名称	代码	名称	代码	名称	代码	名称
131	沟坝地	145	湾掌旱地	330	疏林地	520	农村居民点
132	川水地	146	坡旱地	410	天然草地	710	河流水面
142	川旱地	210	果园	420	改良草地	720	湖泊、水库
143	沟台旱地	310	乔木林地	430	人工草地	730	滩地
144	梯旱地	320	灌木林地	510	城镇	810	荒坡地

(2) 坡度。主要根据研究区地形特点和前人工作经验,采用水土保持工作者普遍采用的临界坡度

分级标准,将坡度划分为 6 个等级(表 2),编绘研究区坡度分级图。

表 2 坡度分级系统

坡度分级	1	2	3	4	5	6
坡度范围/ (°)	< 3	3~ 5	5~ 10	10~ 15	15~ 25	> 25
坡度划分	平地	平缓坡地	缓坡地	较陡坡地	陡坡地	极陡坡地

(3) 土地类型。根据研究区地貌、土壤、植被的分布与组合特征,参照已有土地类型分类系统,综合分析土地综合体的相似性及 1: 5 万比例尺的精度

要求<sup>[5,6]</sup>,结合地形、坡度、土地利用方式等,划分出了 10 种二级土地类型单元<sup>[7]</sup>,编绘研究区土地类型图。

表 3 土地类型与分类系统

代码	类 型	分类指标描述	代码	类 型	分类指标描述
1	黄土丘陵峁盖地	可利用黄土丘陵坡地	31	缓坡沟谷地	相对比较开阔沟谷地
11	平缓坡地(< 3°)	梁峁顶部	32	较陡沟谷地	相对较陡的沟谷地
12	缓坡地(3~ 15°)	梁峁中上部	33	滑塌地	现代滑坡体
2	黄土丘陵坡地	较陡黄土丘陵坡地	4	平地	
21	陡坡地(15~ 25°)	梁峁中下部	41	川台地(> 250 m)	较宽阔河/ 沟谷地
22	极陡坡地(> 25°)	梁峁下部	42	沟台地(≤ 250 m)	较狭小河/ 沟谷地
3	黄土沟谷沟	较难利用黄土丘陵坡地	5	林草丘陵地	次生林覆盖丘陵地

(4) 坡向。坡向主要根据约定俗成,将主要的方向作为其划分的标准,将沟底的坝地、台地、川地和峁顶部的缓坡地定义为平坡(表 4),编绘研究区坡向图。

和土层的厚度。据有关研究,在南方土层厚度大于 80 cm 就是厚土层<sup>[8]</sup>,土壤水库的蓄水能力与土壤类型、结构和地下水埋深有很大关系<sup>[9]</sup>,大多数研究者就把 0~ 1 m 土层定为土壤水库的研究厚度<sup>[10,11]</sup>。

## 2 土壤水分剖面

### 2.1 土壤水分研究深度的界定

黄土高原土壤是布满大大小小孔隙的疏松多孔体,具有显著的存蓄、调节水分的功能,称之为土壤水库。广义上讲土壤水库应该是整个非饱和带土层的蓄水空间,其容量大小取决于土壤类型和非饱

黄土高原土层深厚,根据黄土堆积层序、接触关系、土体特征、生物群落化石及年龄材料等,黄土可划分为古黄土(10~ 40 m)、老黄土(50~ 150 m)、新黄土(10~ 30 m)和最新黄土(5~ 10 m)。最新黄土分布广泛,质地均匀,疏松多孔,有良好的持水能力。

表 4 坡向分类系统

坡向代码	11	12	13	14	15	16	17	18	19
坡向划分	半阴	半阳	阳	阳	半阳	半阴	阴	阴	平坡
范围/(°)	67.5~ 112.5	112.5~ 157.5	157.5~ 202.5	202.5~ 247.5	247.5~ 292.5	292.5~ 337.5	0~ 22.5, 337.5~ 360.0	22.5~ 67.5	
方向	东	东南	南	西南	西	西北	北	东北	水平坡

根据同类研究成果比较,黄土高原杨树、柳树耗水深度仅有 2 m,刺槐耗水主要集中于 5 m 以内<sup>[12]</sup>,柠条根系达 5~7 m,山桃、山杏、榆树和沙棘等灌木根系一般小于 5 m<sup>[13]</sup>。所以,一般而言,作物取 0~2 m 土层<sup>[14]</sup>,灌木乔木 0~5 m<sup>[15]</sup>,草地 0~5 m<sup>[16]</sup>,0~5 m 土层土壤水分消耗即可代表大部分乔灌木林耗水状况,因此,本研究将 5 m 深度土壤作为土壤水库的深度,研究其特性。

## 2.2 土壤水分剖面的划分

土壤水分循环在时间上具有年周期的特征,在空间上表现为水分循环深度和强度的差异。在土壤水分研究领域,以往对剖面土壤水分变化的定性描述较多,近年来已向量化描述方向发展。在近期土壤水分剖面定量化指标研究方法中,提出过 3 种表示方法<sup>[17,18]</sup>。黄土高原大部分地区地下水埋藏很深,可以认为不参与土壤水的循环过程;土壤质地均一,土层深厚,在土体上部一般不存在倾斜且不透水的层次;土壤相对湿度也较低,产生水平流动的可能性很小,主要是垂直方向上的流动。根据相关人员对土壤水分移动和植被耗水特性研究的成果,可以大体上将研究区土壤水分分为 5 个层次:

(1) 土壤水分速变层。该层深 0~60 cm,与大气交换十分活跃,层内植被须根发达,植被耗水量大,土壤水分变化速度快,干旱时可达到凋萎湿度以下,降雨后又可恢复到田间持水量水平以上;

(2) 土壤水分活跃层。该层深 60~120 cm,层内须根较发达,植被耗水量多,土壤水分变化活跃,经常处于增湿和湿水的不稳定状态;

(3) 次活跃层。该层深 120~200 cm,层内须根急剧减少,植被耗水少,该层土壤水分变化较小,只有在丰水年,该土壤水分才可得到补偿;

(4) 相对稳定层。该层深 200~300 cm,层内根系分布少,植被消耗水量小,土壤水分保持相对稳定,该土壤水分在丰水年只能得到少量补偿;

(5) 稳定层。该层深 300~500 cm,层内只有少量根系分布,植被消耗水量很小,土壤水分保持稳定,即使在丰水年,该层土壤水分也不能得到补偿。

## 3 土壤水分制图

### 3.1 野外采样的要求

土壤水分数字制图的数字化指导思想不仅体现在制图的过程中,而且贯穿于野外采样过程之中。野外采样工作中对具体样点位置的确定,对采样点景观的描述,对样点位置的记录等等都是基本的工作。传统方法依靠图、笔、纸,典型做法是,先在室内地形图上大概确定采样点位置,到野外后再确定具体的采样位置,并详细记录采样点所在的行政乡村名称,包括记录采样点位置和方位等,然后描述景观信息,记录在册。但是这种方法显然不能满足数字制图的需要,数字制图需要比较精确的位置信息,需要直接的景观信息作为参考,这些只有在 3S 技术的支持下才能完成。

现在比较通用的基于 3S 的野外工作方法是应用已有的航片、土地利用图、地形图和 DEM 等综合信息,先在室内大致选点定位,野外采样时应用 GPS 精确定位,同时拍摄数字景观照片。地形图由于对地物更新较慢,往往与实地出入较大,容易发生室内定位的采样点已被占用而不得不重新选点的情况,航片由于现势性比较强,可以直接看到所选的采样点的状况,比地形图优越。采用 GPS 技术进行野外比较精确的定位,能直接记录各个采样点经度、纬度和高程数值,这些定位数据将随着其它分析数据一起进入数据库,为采样样点图制作打下基础。同时野外拍摄的数字景观照片,可以不经扫描直接进入计算机,作为数字制图时参考。

### 3.2 土壤水分分级指标

建立具有统一时空尺度和区域特征的土壤水分分级指标是土壤水库制图的前提和基础。土壤水分的有效性原理是黄土高原土壤水库蓄水量分级的理论依据。

土壤有效水分即土壤中能被作物吸收利用的那部分水,其范围在凋萎系数与田间持水量之间。相应的土壤水吸力范围为 29.43~1471 kPa(0.3~15 个工程大气压);土壤有效水分对植被生长来说并非等同有效,凋萎系数为有效水分的起点,由该点开

始,有效性逐渐提高,毛管破裂点为难效与易效的转折点。理论上土壤水分有效性原理,以植被生长阻滞含水量和田间持水量为衡量指标。

在黄土高原,一般以田间持水量的 60% 作为植被生长阻滞点,根据 . . 罗戴和 . . 道尔果夫 (Дилор) 提出的水分有效等级分类方法<sup>[19]</sup>,参照李玉山 (1962) 对黄土高原壤土的等级分类结果<sup>[20]</sup>,结合黄土丘陵区黄绵土的实际分布情况,采用田间持

水量、凋萎湿度、植被生长阻滞点为指标,将黄土丘陵区土壤水分划分为重力水(土壤水分处于 100% 田间持水量以上)、速效水(土壤水分为田间持水量的 80%~ 100%)、迟效水(土壤水分为田间持水量的 60%~ 80%)、难效水(土壤水分处于凋萎湿度和 60% 田间持水量之间)、极难效水(土壤水分处于凋萎湿度和 40% 田间持水量之间)和无效水(土壤水分处于凋萎湿度以下)等 6 个等级(表 5)。

表 5 研究区土壤水分分级标准

序号	分级	土壤水分含量/ %	湿度范围	水分运行能力
1	无效水	< 4.50	< 凋萎湿度	不运行
2	极难效水	4.50~ 7.36	凋萎湿度~ 40% 田间持水量	不运行
3	难效水	7.36~ 11.04	40% 田间持水量~ 60% 田间持水量	不运行
4	迟效水	11.04~ 14.72	60% 田间持水量~ 80% 田间持水量	缓慢运行
5	速效水	14.72~ 18.40	80% 田间持水量~ 田间持水量	迅速运行
6	重力水	> 18.40	> 田间持水量	向下淋失

注: 4.5% 和 18.4% 分别为实测黄绵土有效水的下限(凋萎系数)和上限(田间持水量)(引自《黄土高原土壤水分研究》杨文治,邵明安编著,2000)

### 3.3 土壤水分制图

在研究区的南、中、北部,沿坡面选择 3 条样带。每条样带内,依据不同土地利用类型- 坡度分级- 土地类型组合进行土壤水分取样。采样时间雨季前、后,一是经过冬春两干旱少雨季节的蒸发损失,土壤剖面水分基本处于稳定状态;二是便于对土壤可蓄积水量与雨季可补偿水量进行计算和评估。土壤水分采用常规土钻法取样,烘干法(105℃)测定,测深 5 m,取样深度间隔 20 cm。

根据分级指标,鉴于城镇居民地、道路、河流和水库用地的特殊性,在划分土壤含水量等级和进行土壤含水量制图时,对其做特殊用地处理,不计入土壤水分的计算范围。以研究区土地利用图、土地类型图和坡度分级图为基础,以 ARCVIEW 为平台,建立不同利用类型- 土地类型- 坡度分级的浮点型土壤含水率字段,根据野外实点采集的数据和土壤含水量分级标准,建立野外采样数据与图形数据库的对应关系,编制研究区不同土层土壤水分含量分布图;在 table 表中,可以利用 ARCVIEW 中的 calculate 模块和相关公式进行土壤水分各种参数的计算,建立土壤水分专题数据库。

### 3.4 土壤水分动态模拟

地理信息系统(GIS)技术所具有的强大空间数据储存、处理、分析,以及第四维空间分析能力,随着 DEM 的广泛应用与样条函数插值算法的进一步完善,以 DEM 为基础,可以使网格距缩小到几米至几

十米的范围,这样立地环境差异更为精确与细致,使以 GIS 手段进行中尺度土壤水库蓄水模拟成为可能。薄板光滑样条函数法是样条函数法的曲面插值,常用于不规则分布数据的多变量平滑内插,它的突出特点是操作简单,不受独立变量放大比例尺的影响,不需要解析空间协方差结构,不需要 range 参数,具有很强的可操作性。

本研究首先利用薄板光滑样条函数法使离散而不规则的土壤水分数据得到了扩展,生成的具有规则栅格的土壤水分空间数据;然后选取采样区 25 m 栅格 Albers 等积投影的 DEM 为空间数据源,在 DEM 图基础上提取高程变化和坡度、坡向图,与已有的土地利用基本图及监测得到降雨数据相结合,在土地利用图中,利用澳大利亚国立大学 M. F. Hutchinson 教授开发的 Anuspline 软件采用二元原型薄板光滑样条函数拟合土壤水分样点的土壤水分曲面,以经纬度为自变量,分别以高程、坡度和坡向、降雨量为协变量,建立土壤水分空间模拟模型。通过校验软件运行生成的日志和误差文件检验结果误差。将初步建立的土壤水分空间模拟模型计算出的土壤水库蓄水数量与实测计算的土壤水库蓄水量比较,进行模型的验证和校核。

#### 参考文献:

[1] 沈思渊. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1989, 17(3): 11- 25.

量为 30%，养护条件为水中养护，此组合能满足渠道衬砌工程的强度要求。

### 3 结 论

(1) AEA 掺量及养护条件对混凝土的膨胀率具有显著影响，在选取的试验范围内粉煤灰掺量对混凝土膨胀率和强度影响较小，对膨胀率的效应顺序为 AEA 掺量 > 养护条件 > 粉煤灰掺量；对强度的效应顺序为 AEA 掺量 > 粉煤灰掺量 > 养护条件。

(2) 在膨胀剂和粉煤灰双掺条件下，即使粉煤灰掺量较大，亦能配置出满足规范要求的渠道衬砌高性能混凝土。通过实验，建议配合比参数为 AEA 掺量 12%，粉煤灰掺量 30%，养护条件为水中养护。

(3) 补偿收缩混凝土应用在渠道中能起到良好抗裂防渗作用，减少了裂缝的产生，从而提高抗渗能力，有着良好的应用前景。

参考文献：

[1] 李安国, 建功, 曲强. 渠道防渗工程技术[M]. 北京: 中

国水利水电出版社, 1985.

[2] 朱强, 何韧, 高启仁, 等. 混凝土防渗渠道技术在我国的发展[J]. 农田水利与小水电, 1991, (3): 4- 8.

[3] 马移军, 李振亮, 张树辉. 膨胀混凝土在渠道防渗工程中的应用[J]. 人民黄河, 1991, (6): 45- 50.

[4] 重庆建筑工程学院. 混凝土学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.

[5] 薛军珩, 吴中伟. 膨胀和自应力水泥及其应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.

[6] 建设部标准定额研究所. 补偿收缩混凝土应用技术导则(RISN-TG002-2006)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[7] 王延生. 关于补偿收缩混凝土设计的几个问题[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2002.

[8] 王华生, 赵慧如. 混凝土技术禁忌手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[9] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

(上接第 144 页)

[2] 潘贤章, 史学正. 土壤质量数字制图方法浅论[J]. 土壤, 2002, (3): 138- 140, 148.

[3] 昌成文, 顾也萍, 刘付程, 等. 土壤系统分类在大比例尺土壤制图中的应用[J]. 土壤, 2001, (1): 38- 41.

[4] 李锦. 土壤圈[M]. 福州: 福建地图出版社, 1997. 24- 30.

[5] 朱显谟. 陕西土地资源及其合理利用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982.

[6] 文雅. 黄土高原土地资源评价与土地生态系统的建设[D]. 杨陵: 中科院水利部水土保持研究所, 1995.

[7] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[8] 陈光伟, 等. 安塞县土地类型遥感调查与制图[A]. 中国科学院国家计划委员会自然资源综合考察委员会等编著. 黄土高原遥感调查试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 137- 145.

[9] 林景亮. 福建土种志[M]. 福州: 福建省土壤普查办公室, 1990.

[10] 福建省土壤普查办公室编. 福建土壤[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1991.

[11] 靳孟贵, 张人权, 孙连发, 等. 土壤水资源评价的研究

[J]. 水利学报, 1999, 16(2): 73- 78.

[12] 张立恭. 岷江上游水源涵养林涵水能力综合评价[J]. 四川林业勘察设计, 1997, (4): 27- 31.

[13] 曾大林. 对当代林业水土保持作用的几点认识[J]. 中国水土保持, 2000, (10): 26- 27.

[14] 马玉玺, 杨文治, 韩仕峰. 黄土高原刺槐生长动态研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(2): 27- 32.

[15] 李代琼, 吴钦孝, 刘克俭. 宁南沙棘、柠条蒸腾和土壤水分动态研究[J]. 中国水土保持, 1990, (6): 29- 45.

[16] 穆兴民, 陈国良. 半干旱黄土丘陵区春小麦生长的水分生态效应[J]. 水土保持研究, 1996, 3(1): 86- 90.

[17] 吴钦孝, 丁汉福, 刘克俭. 黄土丘陵半干旱地区柠条根系的研究[J]. 水土保持通报, 1989, 9(3): 45- 49.

[18] 邹厚远, 鲁子瑜, 刘克俭. 沙打旺种群对土壤水分的影响及其调节[J]. 生态学杂志, 1991, 10(3): 15- 17.

[19] 道尔果夫, . 土壤水分性状的基本规律及其对植物生命活动的意义[A]. 灌溉农业生物学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1961.

[20] 邵明安. 黄土区土壤水分有效性研究[J]. 水利学报, 1987, (8): 38- 44.