

# 基于 GIS 的黄土丘陵区土壤水库 库容组成及其定量分析

—以陕北安塞县为例

焦 峰,温仲明,从怀军

(西北农林科技大学,中国科学院 水利部 水土保持研究所,陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**以空间图形和数据库为基础,对土壤水库的相关技术指标、研究深度和静态库容组成等进行了描述、界定和计算。研究认为:安塞县 5 m 深土层土壤水库总库容为 1 419.78 mm/416 156 万  $\text{m}^3$ ,其中死库容占土壤总库容的 21.08%,重力库容占土壤总库容的 13.82%,有效库容占土壤总库容的 65.10%,最大有效库容占总库容的 78.92%;从土地利用类型方面来看,坡耕地和荒坡地总库容量最大,分别占研究区土壤水库总库容的 37.65%和 36.04%;从坡度分级方面来看,>25°和 10°~15°坡度级别土壤总库容量最大,分别占研究区土壤水库总库容的 41.50%和 30.52%;崩坡和沟坡土壤水库库容组成基本相等。

**关键词:**GIS;黄土丘陵区;土壤水库;库容组成;定量分析

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)02-0015-04

## Makeup of Soil Water Reservoir and Its Quantitative Analysis in the Loess Hilly Region

—A Case Study of Ansai County, Shaanxi Province

JIAO Feng, WEN Zhong-ming, CONG Huai-jun

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** This paper expatiated on define, function and correlative technique index of soil water reservoir, made certain its research depth, and calculated static state capacity of soil water reservoir. The results showed: In 5 m depth soil of research area, total holding capacity is 1 419.78 mm/416.156 million  $\text{m}^3$ . Unavailable volumetric capacity is 21.08% of total holding capacity. Gravitational volumetric capacity is 13.82% of total holding capacity. Available volumetric capacity is 65.10% of total holding capacity. The greatest available volumetric capacity is 78.92% of total holding capacity.

**Key words:** GIS; the loess hilly region; makeup of soil water reservoir; quantitative analysis

在侵蚀严重的干旱半干旱黄土丘陵沟壑区,土壤水分是土壤侵蚀过程<sup>[1]</sup>、植物生长<sup>[2-3]</sup>和植被恢复<sup>[4]</sup>的主要影响因子,也是重要的农业水资源。在干旱半干旱黄土区,深厚的黄土层(一般厚度达 50 - 200 m)蓄积大量的水分形成了“土壤水库”,“库”中的水对区域第一性生产力的形成具有重要作用,从而成为土地资源质量评价的主导因素之一<sup>[5]</sup>。因此,研究土壤水分空间分布对黄土丘陵区农业生产、植被恢复和土地

资源的合理利用及配置具有重要的指导意义<sup>[6]</sup>。

国外研究者利用遥感和野外实测的土壤水分资料,从不同尺度上分析了土壤水分的地理统计特性<sup>[7-8]</sup>,也多集中在表层土壤水分的特征分析,国内尤其在黄土丘陵区多是利用经典统计或描述方法进行土壤水分研究,对中尺度土壤水库库容定量分析计算的研究鲜有报道。本文利用 GIS 把特定区域内的土壤水分常数数据与地理数据结合起来,进行了黄土丘

\* 收稿日期:2009-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(40871246);欧盟项目(FP6, 037046)

作者简介:焦峰(1967 - ),男,陕西省三原县人,博士,副研究员,主要从事 GIS 应用、水土保持与环境效应监测评价研究。E-mail: Jiaof11@126.com

陵区土壤水库库容组成及其定量分析研究,对土壤水分的有效利用与管理具有重要实用价值。

## 1 研究区域

安塞县地处陕北黄土高原丘陵沟壑区,位于东经 108°51'44" - 109°26'18",北纬 36°30'45" - 37°19'13",总土地面积 2 950.33 km<sup>2</sup>。本区地处黄土丘陵沟壑区的中心地带,为鄂尔多斯地台的一部分,地台基底升降和地壳抬升活动频繁,由于漫长的流水、风力、重力等侵蚀作用,加之近千年来,人类不合理的土地利用方式,使安塞县质地深厚的黄土地貌形成了今天梁峁连绵,沟壑纵横的复杂形态。境内整个地势由西北向东南倾斜,形成梁、峁、塬、湾、坪、川等复杂地貌。无论在地貌环境特征,还是在生态环境与水土流失特点上,都具有典型的代表性。境内土壤类型主要为黄绵土,粉沙质,由于几千年来掠夺式的垦殖制度,滥砍滥伐,导致自然林草植被急剧减少,土面蒸发强烈。利用类型以农田、果园、有林地、灌木林地、草地和荒坡地为主<sup>[9]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 基本地理数据库的建立

依据 1978 年版 1:10 000 地形图和 2001 年拍摄 1:10 000 红外航片为判读主要资料,结合野外调查,编绘安塞县土地利用图、土地类型图和坡度分级图,并在 ARC/INFO 系统支持下数字化,进行专题图的编辑和处理,建立专题图形库,并进行属性数据的采集、编码和输入的一体化处理,建立空间数据库。

### 2.2 计算依据

土壤水库的调蓄能力可用 3 个基本土壤水分常数即饱和含水量、田间持水量和凋萎含水量来计算。饱和含水量反映土壤最大蓄水能力,田间持水量可视为正常蓄水能力,凋萎含水量相当于“死库容”。田间持水量与凋萎含水量的差值为有效水分,是土壤有效蓄水能力,相当于土壤水库的“有效库容”,有效库容即为土壤水资源存贮、调蓄的空间。土壤水库的几个蓄水库容的定义和计算方法分别如下<sup>[10]</sup>。

(1) 重力水库容  $w_G$ 。指饱和含水率  $s(z)$  与田间持水率  $f(z)$  之间的容积,其计算式如式(1)。

$$w_G = \int_0^H A [s(z) - f(z)] dz \quad (1)$$

式中:  $H$ ——潜水埋深;  $A$ ——计算区域面积;  $s(z)$ ,  $f(z)$ ——饱和含水率和田间持水率。

(2) 有效库容  $w_E$ 。指植被可以利用的那部分库容,通常指田间持水率  $f(z)$  和凋萎系数  $w_P(z)$  之

间的土壤水分,其计算式如式(2)。

$$w_E = \int_0^H A [f(z) - w_P(z)] dz \quad (2)$$

式中:  $A$ ——计算区域面积;  $f(z)$ ——田间持水率;  $w_P(z)$ ——凋萎含水率。

(3) 死库容  $w_K$ 。指植被生长期不能利用的土壤水容积,通常指凋萎系数以下的土壤水库容,其计算式如式(3)。

$$w_K = \int_0^H A w_P(z) dz \quad (3)$$

式中符号含义同上。

(4) 总库容  $w_S$ 。指潜水面至地表面的土壤总空隙度,包括重力水库容、有效库容和死库容,其计算式如式(4):

$$w_S = w_G + w_E + w_K \text{ 或 } w_S = \int_0^H A s(z) dz \quad (4)$$

式中符号含义同上。

(5) 土壤水贮量  $w$ 。指一定厚度土层内水分的总贮量,为与气象资料比较,常用 mm 表示,其计算公式如式(5)。

$$w = 0.1 \cdot v \cdot h \quad (5)$$

式中:  $w$ ——土壤含水量(%);  $v$ ——土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $h$ ——土层厚度(cm)。

(6) 土壤水库蓄水量  $Q$ 。指一定厚度土层内水分的总蓄积量,其计算公式如式(6)。

$$Q = 0.001 w \cdot S \quad (6)$$

式中:  $Q$ ——土壤水库蓄水量(m<sup>3</sup>);  $w$ ——土壤贮水量(mm);  $S$ ——土地表面面积(m<sup>2</sup>)。

## 3 土壤水库的相关技术指标的确定

### 3.1 土壤水库与地面水库

与地面水库相类似,土壤水库也有相应的库容和控制水位。但土壤水库有其自身的特点,地面水库与土壤水库的指标比较见表 1。死水位对应于凋萎含水量时调控深度内的蓄水量值,其下为死库容;有效库容则对应于田间持水率和凋萎含水率之间的蓄水量;当土壤含水率大于田间持水量时,多余水量只能短时间的蓄存于土壤中,最终经入渗补给地下水或蒸发消耗掉,称为重力水库容;土壤总库容相当于土壤含水量达到饱和含水量时的蓄水量。土壤水库各项库容的大小与土壤质地、结构和调控深度有关;土壤所能蓄存的水量,相当于土壤水库的“库容”,它是土壤水库调控和利用的基础,其大小与土壤类型、结构、质地、非饱和土层厚度和地下水埋深等有很大关系<sup>[11]</sup>。

### 3.2 土壤水分常数的确定

土壤水分受质地、结构、容重和有机质等的影响较大。根据所处研究区域的土壤条件和土壤水分有

效性与土壤持水力、水分形态以及水分常数(主要是凋萎系数和田间持水量)的关系,土壤提供有效水的能力为土壤供水性能,普遍以几个土壤水分常数来衡量,这些数值可用含水量或土壤水吸力的大小表示,其计算离不开土壤容重,有必要对田间持水量、凋萎湿度、土壤容重等土壤水分常数进行确定。

表 1 地面水库与土壤水库技术指标对照表

技术指标	地面水库	土壤水库
防洪库容/重力水库容	正常蓄水位与防洪高水位间库容	田间含水量与饱和含水量之差
调节库容/有效库容	死水位与正常蓄水位间库容	凋萎含水量与田间含水量之差
死库容	死水位下库容	凋萎含水量
最大库容/总库容	死库容+调节库容+防洪库容	饱和含水量
正常运用条件下最大蓄水量	调节库容+防洪库容	饱和含水量-凋萎含水量
调节水量	每次洪水过程增蓄水位之和	每次降雨或灌水后土壤水分增值之和

对于区域大量土壤水分采样来说,获取深层土壤不同土层的容重值的工作量非常繁重,我们根据已有研究结果<sup>[12-13]</sup>,0-20,20-40 cm 土层腐殖质含量大,采用其实测值,40 cm 以下土壤性质比较均一,采用 40-60 cm 实测值。0-5 m 土壤容重取(0-20,20-40,40-60 cm)46 个野外样点实测值的平均值 1.33,凋萎系数,田河持水量,饱和含水量的取值分别为 4.5%,18.4%,21.35%。

3.3 土壤水库的研究深度的界定

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。

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>[14]</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>[15]</sup>。所以,一般而言,作

物取 0-2 m 土层<sup>[16]</sup>,灌木乔木 0-5 m<sup>[17]</sup>,草地 0-5 m<sup>[18]</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。

4 土壤水库的库容计算与分析

4.1 土壤水库库容组成

土壤总库容表征了土壤所能容蓄的水分总量,研究区 5 m 深土层的土壤总贮量为 1 419.78 mm/416 156 万 m<sup>3</sup>。土壤水库总库容由死库容、重力库容和有效库容组成,其中死库容为 299.25 mm/87 714 万 m<sup>3</sup>,占土壤总库容的 21.08%;重力库容为 196.18 mm/57 505 万 m<sup>3</sup>,占土壤总库容的 13.82%;有效库容为 924.35 mm/270 939 万 m<sup>3</sup>,占土壤总库容的 65.10%。最大有效库容为 1 120.53 mm/328 442 万 m<sup>3</sup>,占总库容的 78.92%(表 2)。总体来看,有效库容>死库容>重力库容。

表 2 土壤水库库容组成

水分含量表示	总库容	重力库容	有效库容	死库容	最大有效库容
土壤水库库量/mm	1419.78	196.18	924.35	299.25	1120.53
10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	416156	57503	270939	87714	328442
占总库容/%	100	13.82	65.10	21.08	78.92

4.2 不同利用类型土壤水库库容组成

从土地利用类型方面来看(表 3 所示),坡耕地和荒坡地总库容量最大,分别为 156 701 万 m<sup>3</sup> 和 149 981 万 m<sup>3</sup>,分别占研究区土壤水库总库容的 37.65%和 36.04%;其次为有林地、天然草地和疏林地,分别为 39 007 万 m<sup>3</sup>、34 068 万 m<sup>3</sup> 和 19 536 万 m<sup>3</sup>,分别占研究区土壤水库总库容的 9.37%、8.19%和 4.69%;再次为川台地、梯田和果园,分别为 9 860 万 m<sup>3</sup>、3 696 万 m<sup>3</sup> 和 2 557 万 m<sup>3</sup>,分别占研究区土壤水库总库容的 2.37%、0.89%和 0.61%;人工草地最小,为 750 万 m<sup>3</sup>,占研究区土壤水库总库容的 0.18%。土壤死库容、重力库容和有

效库容和最大有效库容也表现出相同的趋势。

4.3 不同坡度分级土壤水库库容组成

从坡度分级方面来看(表 4 所示),>25°和 10°~15°坡度级别土壤总库容量最大,分别为 172 712 万 m<sup>3</sup> 和 126 991 万 m<sup>3</sup>,分别占研究区土壤水库总库容的 41.50%和 30.52%;其次为 15°~25°和 5°~10°坡度级别,分别为 87 402 万 m<sup>3</sup> 和 16 197 万 m<sup>3</sup>,分别占研究区土壤水库总库容的 21.00%和 3.89%;0°~3°和 3°~5°坡度级别最小,分别为 8 766 万 m<sup>3</sup> 和 4 089 万 m<sup>3</sup>,分别占研究区土壤水库总库容的 2.11%和 0.98%。土壤死库容、重力库容和有效库容和最大有效库容也表现出相同的趋势。

表 4 不同利用类型土壤库容组成

土地 利用	总库容		重力库容		有效库容		死库容		最大有效库容	
	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%
川台地	9860	2.37	1362	0.33	6420	1.54	2078	0.50	7782	1.87
梯田	3696	0.89	511	0.12	2406	0.58	779	0.19	2917	0.70
坡耕地	156701	37.65	21652	5.20	102021	24.51	33028	7.94	123673	29.72
果园	2557	0.61	353	0.08	1665	0.40	539	0.13	2018	0.48
有林地	39007	9.37	5390	1.30	25396	6.10	8222	1.98	30785	7.40
疏林地	19536	4.69	2699	0.65	12719	3.06	4118	0.99	15418	3.70
天然草地	34068	8.19	4707	1.13	22180	5.33	7181	1.73	26887	6.46
人工草地	750	0.18	104	0.02	488	0.12	158	0.04	592	0.14
荒坡地	149981	36.04	20724	4.98	97646	23.46	31612	7.60	118369	28.44
合计	416156	100	57503	13.82	270939	65.10	87714	21.08	328442	78.92

表 5 不同坡度级别土壤库容组成

坡度 分级	坡度/ (°)	总库容		重力库容		有效库容		死库容		最大有效库容	
		库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%
1	0~3	8766	2.11	1211	0.29	5707	1.37	1848	0.44	6918	1.66
2	3~5	4089	0.98	565	0.14	2662	0.64	862	0.21	3227	0.78
3	5~8	16197	3.89	2238	0.54	10545	2.53	3414	0.82	12783	3.07
4	8~15	126991	30.52	17547	4.22	82678	19.87	26766	6.43	100225	24.08
5	15~25	87402	21.00	12077	2.90	56903	13.67	18422	4.43	68980	16.58
6	25	172712	41.50	23865	5.73	112444	27.02	36403	8.75	136309	32.75
合计		416156	100	57503	13.82	270939	65.10	87714	21.08	328442	78.92

4.4 不同地貌类型土壤水库库容组成

从不同地貌类型方面来看(表 5 所示), 峁坡和沟坡土壤水库总库容分别为 206 073 万 m<sup>3</sup> 和 210 081 万 m<sup>3</sup>, 分别占研究区总库容的 49.52 % 和 50.48 %; 峁坡的重力库容、有效库容和死库容分别占研究区总库容的 6.84 %、32.24 % 和 10.44 %; 沟

坡的重力库容、有效库容和死库容分别占研究区总库容的 6.98 %、32.87 % 和 10.64 %; 峁坡的最大有效库容占研究区总库容的 39.08 %, 沟坡的最大有效库容占研究区总库容的 39.84 %; 峁坡和沟坡土壤水库库容组成基本相等。

表 5 不同地貌类型土壤库容组成

地貌 类型	总库容		重力库容		有效库容		死库容		最大有效库容	
	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%	库容/万 m <sup>3</sup>	%
峁坡	206073	49.52	28474	6.84	134164	32.24	43434	10.44	162638	39.08
沟坡	210083	50.48	29029	6.98	136775	32.87	44280	10.64	165804	39.84
合计	416156	100	57503	13.82	270939	65.10	87714	21.08	328442	78.92

5 结 论

对土壤水库的相关技术指标、研究深度和静态库容组成等进行了描述、界定和计算。研究认为: 研究区 5 m 深土层土壤水库死库容为 299.25 mm/87 714 万 m<sup>3</sup>, 占土壤总库容的 21.08 %, 重力库容为 196.18 mm/57 505 万 m<sup>3</sup>, 占土壤总库容的 13.82 %, 有效库容为 924.35 mm/270 939 万 m<sup>3</sup>, 占土壤总库容的 65.10 %, 最大有效库容为 1 120.53 mm/328 442 万 m<sup>3</sup>, 占总库容的 78.92 %, 总贮量为

1 419.78 mm/416 156 万 m<sup>3</sup>; 从土地利用类型方面来看, 坡耕地和荒坡地总库容量最大, 分别为 156 701 万 m<sup>3</sup> 和 149 981 万 m<sup>3</sup>, 分别占研究区土壤水库总库容的 37.65 % 和 36.04 %。

从坡度分级方面可以来看, > 25° 和 10°~15° 坡度级别土壤总库容量最大, 分别为 172 712 万 m<sup>3</sup> 和 12 6991 万 m<sup>3</sup>, 分别占研究区土壤水库总库容的 41.50 % 和 30.52 %; 峁坡和沟坡土壤水库库容组成基本相等。

(下转第 23 页)

3 结 论

研究区土壤抗蚀性的变化范围为 0.180 8 ~ 0.968 1,均值为 0.647 7,变异系数为 27.69 %,土壤抗蚀性具有中等程度的空间变异性。 $C_0/(C_0 + C)$  值为 13.47 %,小于 25 %,表明在变程内具有强烈的空间相关性。土壤抗蚀性总体分布趋势是条带状明显,波动较大,大于 0.65 的高值区域主要分布在小流域从南到北的中间部位,小于 0.4 的低值区域分布主要位于小流域地势较高的北部和东西两侧,容易发生水土流失。小流域不同区域下垫面的差异及其人为干扰程度的不同也是影响土壤抗蚀性分布特征的重要随机性因素。土壤抗蚀性与理化性质有着密切的关系,逐步回归分析可得出土壤抗蚀性的回归方程为:  $Y = 0.780 - 0.008x_1 + 0.6257x_5 + 0.3437x_6$ , 因子决定系数  $R^2 = 0.7829$ 。可见,土壤抗蚀性的影响因子主要是土壤黏粒 ( $< 0.002\text{ mm}$ ), 有机碳,全氮。

参考文献:

[1] 张金池,胡海波.水土保持与防护林学[M].北京:中国林业出版社,1996.  
[2] 中国林业标准汇编(营造林卷)[S].北京:中国林业出版社,1998.  
[3] 水利电力部农林水利水土保持司.水土保持试验规范[S].北京:水利电力出版社,1988.  
[4] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999.  
[5] 单奇华,李卫正,俞元春,等.南京城市林业土壤可蚀性及影响因素[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(2):47-50.  
[6] 李海东,林杰,张金池,等.小流域尺度土壤有机碳和全氮空间变异特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(4):38-42.  
[7] Cambardella C A,Moorman T B,Novak J M. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. Soil Sci Soc Am J,1994,58:1501-1511.  
[8] 胡海波,魏勇,仇才楼.苏北沿海防护林土壤可蚀性的研究[J].水土保持研究,2001,8(1):150-154.

(上接第 18 页)

参考文献:

[1] 贾志军,蔡强国,Luk S H.晋西黄土高原土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M].北京:科学出版社,1992:32-39.  
[2] 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,1992:190-297.  
[3] 卢宗凡,梁一民,刘国彬.中国黄土高原生态农业[M].西安:陕西科学技术出版社,1997:56-67.  
[4] 朱志诚.陕北黄土高原植被群落研究[J].西北林学院学报,1993,8(1):87-94.  
[5] 张雷明,上官周平.黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J].干旱区研究,2002,19(4):59-63.  
[6] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设[M].北京:科学出版社,1998:42-68.  
[7] Munoz-Pardo J, Ruelle P, Vauclin M. Spatail variability of an agricultural field: goestatistical analysis of soil texture. Soil moisture and yield components of two rained crops[J]. Catena, 1990,17:359-381.  
[8] Andrew W W, Ginter B, Roder B G. Geostistical characterization of soil moisture patterns in the Tar-

rawarra catchment [J]. Journal of Hydrology, 1998, 205:20-37.  
[9] 焦峰,温仲明,王飞,等.黄土丘陵区县域尺度整体景观格局分析[J].水土保持学报,2005,19(2):167-170.  
[10] 康绍忠.农用水管理学[M].西安:陕西科学技术出版社,2000.  
[11] 夏自强.土壤水资源特性分析[J].河海大学学报,2001,29(4):23-26.  
[12] 朱显谟.黄土高原土壤与农业[M].北京:农业出版社,1989:88-91.  
[13] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:23-25.  
[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.