

半干旱黄土区土壤水分垂直分布规律的研究

——以甘肃省兰州市孙家岔流域为例*

费喜亮¹ 张新民^{1,2} 景凌云¹ 邢 贵²

(1 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020)

(2 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070)

摘要 以甘肃省兰州市孙家岔流域为研究对象, 使用 1981—1983 年、2011 年实测土壤水分资料, 利用地统计法分析了该流域土壤水分的垂向变异特征。结果表明, 球状模型对丰水年不同土地利用(梯田、荒坡、坡耕地、乔木林地)土壤水分的垂向分布拟合为极显著。在平水年球状模型仅对梯田、乔木林地的实验变异函数拟合较好, 而对坡面地区的坡耕地和荒坡的拟合并不显著。枯水年梯田和林地的空间变异对模型仍然有一定的吻合, 而坡耕地和荒坡土壤水分空间分布变异中有较大的随机性, 即使在雨季时空自相关也很弱。不同水文年下不同土地利用的土壤水分垂向变化表现出明显的季节变化趋势, 变程为 1.687 ~ 3.404 m, 在该自相似范围内测得土壤特性的变异程度基本一致。

关键词 半干旱; 黄土区; 土壤水分; 垂向变异

中图分类号 S15 **文献标识码** A

半干旱黄土区因其独特的自然地理条件和社会环境, 水土流失严重, 土壤水分是植物生长的限制因子之一, 是布设水土保持措施的一项重要依据, 也是气候、生态、农业等领域研究的主要参数^[1]。土壤是具有时空变异的连续体, 贮存于土壤中的水分因受降水、蒸发、入渗等因素的制约, 也存在空间分布的不同。即在一定时间范围内, 土壤水分之间存在变化、联系的关系, 称之为土壤水分的空间变异性^[2]; 目前许多研究均证明了土壤水分存在水平方向的空间自相关^[3]。土壤水分在垂直方向上存在一定的变化, 在不同深度层次, 因年降水量的不同、入渗程度、土壤含水量的不同及不同的土地利用方式而有一定的变化规律。土壤水分根据土壤质地、土地利用类型等因子对土壤划分为不同的层次, 分层采用的方法多为经典统计法^[4]或地统计学方法, 相比较而言, 利用地统计学方法^[5]根

据不同地形因子对土壤水分的垂向变异的研究并不多见。

本文以地统计学方法的半变异函数为分析工具, 结合孙家岔流域中不同土地利用状况下 1979—1986 年和 2011 年实测土壤水分资料, 对不同水文年度土壤水分垂直分布的变异特征和变程范围作了研究, 用球状模型对半方差函数曲线图进行了拟合度, 并分析了不同土地利用类型对土壤水分在垂直方向空间变异性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区孙家岔流域地处甘肃兰州市榆中县北部山区韦营乡界内, 属黄河一级支流宛川河的三级支沟, 总面积 42.08 km², 其中水土流失面积 40.65

* 甘肃省水利科研课题“甘肃中北部黄土丘陵沟壑区水土流失特征及防治工程体系研究”(甘水发[2007]206号)、甘肃省水利科研课题“陇中半干旱区静水与降雨条件下黄土地表入渗对比研究”(甘水发[2006]121号)、甘肃省水利科研课题“陇中黄丘区水土保持措施主要效应研究”(甘水发[2011]228号)、甘肃科技支撑计划项目“水土保持对西部黄土高原河川径流调控作用研究”(项目编号: 1104FKCA146)资助

作者简介: 费喜亮(1955—), 男, 高级工程师, 主要从事水土保持基础理论研究与水土保持规划等工作。E-mail: FXL550909@163.com;

电话: 13893228187

收稿日期: 2012-06-29; 收到修改稿日期: 2013-01-01

km²,介于 35°50'30" ~ 35°55'10"N, 104°20'38" ~ 104°26'20"E 之间。该区年平均降水量 364.4 mm, 降雨年际、年内分配不均,主要集中在 7—9 月,年蒸发量 1 668 mm。流域内成土母质为黄土,土类属于灰钙土,土壤有白土和麻土,阳坡多为白土,阴坡多为麻土。土层深厚,深度一般几十米。土壤容重为 1.1 ~ 1.3 t m⁻³,孔隙度在 50% 以上,土壤 pH7.8 ~ 8.5。其自然地理条件与社会经济特点等在黄土高原丘陵沟壑区第五副区具有一定的代表性^[6]。

1.2 研究方法

研究收集已完成的“黄河中游水土保持小流域综合治理试验示范”项目 1979—1986 年的土壤水分观测资料,并于 2011 年 7 月始,10 月底结束,依据原有土壤水分的观测资料,结合研究区土地利用方式的特点,选择梯田、坡耕地、荒坡、乔木林地为代表的土地利用方式,采用土钻取土,根据实验设计要求取出不同深度的土壤样品,最大取土深度为 200 cm,烘干法测定土壤水分。土壤水分监测点中,同一土地利用根据均匀布点原则利用随机方法每天取 9 ~ 11 个土壤剖面,每隔 10 d 取样一次,对不同土地利用方式的样品每天尽量一次取完;采集土壤样品,含水量分 9 层测定,自地表向下每 20 cm 取样 1 个,每个样 2 ~ 3 次重复,用重量百分比表示土

壤含水量。

根据流域内年降水总量距平均值百分比例^[7],选取 1981 年(-5% < 年降水量变化 < +5%)为平水年,1982 年(< -15%)为枯水年,1983 年(> +15%)为丰水年;考虑到 20 年来基本气象要素(地温、湿度、风速等)的变化,结合 2011 年(枯水年)雨季(7 月至 10 月)实测数据用地质统计分析方法进行对比分析。在对同一地形条件下,土壤水分在垂直方向上变异程度一般比水平方向的大,因为在垂直方向上,除了含有与水平方向相同的那部分变异,还有该方向上特有的变异。运用地统方法对黄土高原丘陵沟壑区第五副区的土壤水分垂向结构采用球状模型进行模拟,将表层土壤水分与深层水分相结合,可弥补土壤水分空间分布结构的特性分析,丰富该区不同土地利用蓄水特征的研究。

2 结果

对孙家岔流域土壤水分时空变化的研究过程中,根据不同土地利用(梯田、坡耕地、荒坡、乔木林地),采用地统方法对土壤水分在典型水文年和 2011 年雨季的垂直分布进行研究。

表 1 不同水文年土壤水分垂直分层

Table 1 Vertical distributions of soil moisture in years different in hydraulic condition

土地利用方式 Land use type	年份 Year	降水量 Precipitation (mm)	土壤深度 Soil depth (cm)								
			0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 120	120 ~ 140	140 ~ 160	160 ~ 180
梯田 Terrace	1981	346.6	14.52	14.15	13.74	13.63	13.38	13.20	13.09	13.48	14.06
	1982	233.0	12.56	11.46	10.68	10.58	10.83	11.79	13.09	13.29	13.63
	1983	470.2	16.56	16.28	15.38	14.18	13.19	12.65	12.69	12.77	13.82
	2011	297.0	12.22	10.00	7.98	7.50	7.37	7.38	7.65	7.95	8.22
坡耕地 Slope farmland	1981	346.6	11.05	10.51	10.94	10.14	10.32	10.51	10.93	10.90	10.94
	1982	233.0	10.62	9.40	8.63	8.46	8.96	9.37	9.19	9.07	9.24
	1983	470.2	12.46	11.63	10.39	9.63	8.75	8.56	9.17	9.30	9.35
荒坡 Waste slope	1981	346.6	9.47	8.35	7.90	6.74	7.09	8.16	8.53	9.28	9.76
	1982	233.0	6.79	6.59	6.41	6.42	7.21	8.01	8.91	9.26	9.61
	1983	470.2	9.50	8.83	8.48	7.88	7.60	7.60	8.27	8.93	9.53
	2011	297.0	12.41	9.30	7.83	6.97	6.12	5.86	5.95	5.79	6.12
乔木林地 Woodland	1981	346.6	13.57	12.57	11.80	10.99	10.68	10.45	10.81	10.99	10.97
	1982	233.0	11.37	9.69	8.27	7.68	7.95	10.00	8.62	8.94	9.55
	1983	470.2	15.36	14.05	13.04	12.51	12.06	12.39	12.50	12.26	11.71
	2011	297.0	13.96	8.73	7.17	6.73	6.52	6.95	6.54	6.93	6.87

对测样地不同间距 20 cm 的不同年度土壤水分实测资料,采用 EXCEL 软件的方差函数 (VARP) 对土壤水分在垂直方向上的变异函数进行分层次汇总计算,变异函数可表示为

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x) - Z(x + h)] \quad (1)$$

式中, γ 为任意点 x 以向量 h 相隔的函数关系, Z 为任意点 x 的函数关系。

以地统计学方法的变异函数为分析工具,对不同年度流域内的几种典型土地利用的土壤水分垂直分布的变异特征和变程范围作了研究,用球状模型对变异函数曲线图进行拟合。

球状模型的一般公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & \dots, \dots, \dots, r = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \frac{r}{a} - \frac{1}{2} \frac{r^3}{a^3} \right), & 0 < r \leq a. \\ C_0 + C, & r > a \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_0 为块金常数, $C_0 + C$ 为基台值, C 为拱高, a 为变程, γ 为任意点 x 以向量 h 相隔的函数关系。

采用最小二乘法计算方程的参数,利用 SPSS 软件进行线性回归分析,计算得出球状模型的参数

值,并采用 MATLAB 软件进行数据拟合分析。

取样点梯田上以覆膜种植玉米为主要的植被类型,通过球状模型对梯田在不同年度的土壤水分实验数据进行拟合后发现,拟合效果较好,尤其在降雨量大的丰水年(1983 年)和枯水年的雨季(2011 年),计算得 F 值,经 F 检验后为极显著水平,说明球状模型较好地反映了梯田土壤水分在垂向上的结构特征。

球状模型对丰水年(1983 年)坡耕地(洋芋)在不同年度的土壤水分的实验变异函数拟合较好,计算得 F 值,经 F 检验后为显著水平。依据块金值与基台值之比研究因子空间相关,发现丰水年属于强的空间自相关,说明土壤水分有很好的结构性;而平水年和枯水年属于中等程度空间自相关。

同样球状模型对荒坡在丰水年(1983 年)和平水年(1981 年)的实验变异函数拟合较好,计算得 F 值,经 F 检验后为极显著水平。枯水年(1982 年)对二次线性模型拟合较好,而 2011 年雨季空间变异中随机性较大,空间自相关弱。土壤水分空间变异随观测时期和年降雨量有关,干旱年份增加了土壤水分在垂向上的空间变异的随机部分引起的空间异质性。

表 2 不同年份梯田土壤水分变异函数理论模型的相关参数

Table 2 Relevant parameters of the theoretical model for soil moisture variograms in terrace in different years

年份 Year	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金值与基台值之比 Nugget value/Sill $C_0 / (C_0 + C)$	变程 Range a	F
1981	球状模型 Spherical model	-0.848	12.09	-0.070 11	3.288	74.09
1982	球状模型 Spherical model	2.484	13.42	0.185	1.699	108.2
1983	球状模型 Spherical model	-0.167	5.03	-0.033 18	2.448	113.5
2011	球状模型 Spherical model	-0.040	14.17	-0.002 82	2.084	43.34

表 3 不同年份坡耕地土壤水分变异函数理论模型的相关参数

Table 3 Relevant parameters of the theoretical model for soil moisture variograms in slope farmland in different years

年份 Year	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金值与基台值之比 Nugget value/Sill $C_0 / (C_0 + C)$	变程 Range a	F
1981	球状模型 Spherical model	2.516	8.204	0.307	1.774	3.045
1982	球状模型 Spherical model	2.393	8.861	0.270	1.741	7.491
1983	球状模型 Spherical model	0.823	14.96	0.055	2.96	16.29
2011	球状模型 Spherical model	2.482	8.436	0.294	1.768	5.396

表 4 不同年份荒坡土壤水分变异函数理论模型的相关参数

Table 4 Relevant parameters of the theoretical model for soil moisture variograms in waste slope in different years

年份 Year	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金值与基台值之比 Nugget value/Sill $C_0 / (C_0 + C)$	变程 Range a	F
1981	球状模型 Spherical model	1.45	21.54	0.067	2.19	159.30
1982	线性模型 Linear model	$y = -9.63x^2 + 19.73x - 1.24$				96.67
1983	球状模型 Spherical model	0.688	11.88	0.058	3.404	24.72
2011	球状模型 Spherical model	5.942	13.18	0.451	2.116	5.65

表 5 不同年份乔木林地土壤水分变异函数理论模型的相关参数

Table 5 Relevant parameters of the theoretical model for soil moisture variograms in woodland in different years

年份 Year	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget value C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金值与基台值之比 Nugget value/Sill $C_0 / (C_0 + C)$	变程 Range a	F
1981	球状模型 Spherical model	0.538	12.530	0.043	2.259	4.750
1982	球状模型 Spherical model	1.851	9.120	0.203	2.021	5.020
1983	球状模型 Spherical model	0.803	3.683	0.218	2.343	1.730
2011	球状模型 Spherical model	4.310	7.708	0.559	1.687	1.641

球状模型同样对乔木林地不同水文年全年度土壤水分变空间异的实验变异函数拟合较好,尤其对平水年的实验变异函数拟合为极显著水平。

3 结 论

研究区土壤水分季节变化的变异程度随降雨量和土层深度的增加而减小,土壤深度在 1.20 ~ 1.40 m 内含水量受季节气候动态变化影响显著,在 1.40 ~ 1.60 m 内受季节气候动态变化影响不显著,超过 1.60 m 内含水量在同一年度具有一定的时间稳定性。

球状模型对丰水年不同土地利用土壤水分在垂向上的结构的拟合检验后为极显著水平,平水年对梯田、乔木林地的拟合较好,乔木的根系分布削弱了土壤水分在垂向上的变异程度,而对坡耕地和荒坡地的拟合不显著,枯水年梯田和林地的空间变异对模型仍然有一定的拟合,而对于坡耕地和荒坡地土壤水分垂向分布中有较大的随机性,空间自相

关较弱。

参 考 文 献

- [1] 李琴,陈曦, Frank Veroustraete, 等. 干旱半干旱区土壤含水量反演与验证. 水科学进展, 2010, 21(2): 201—207. Li Q, Chen X, Veroustraete F, et al. Validation of soil moisture retrieval in arid and semi-arid areas (In Chinese). Advances in Water Science, 2010, 21(2): 201—207
- [2] 潘成忠,上官周平. 土壤空间变异性研究评述. 生态环境, 2003, 12(3): 371—375. Pan C Z, Shangguan Z P. Review of the research on soil spatial variability (In Chinese). Ecological Environment, 2003, 12(3): 371—375
- [3] 傅伯杰,陈利顶,邱扬,等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程. 北京:商务印书馆, 2002. Fu B J, Chen L D, Qiu Y, et al. Loess hilly-gully region land use structure and ecological process (In Chinese). Beijing: The Commercial Press, 2002
- [4] 张丽丽. 土壤水分垂直方向相关性研究和动态预报. 武汉:华中农业大学植物科学技术学院, 2007. Zhang L L. Study on vertical correlation and forecasting of soil moisture (In Chinese). Wuhan: Plant Institute of Science and Technology of Huazhong Agricultural University, 2007
- [5] 张景雄. 空间信息的尺度、不确定性与融合. 武汉:武汉大学

出版社,2008. Zhang J X. Spatial information of the scale, uncertainty and integration (In Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 2008

- [6] 甘肃省水利厅兰州水土保持科学实验站. 孙家岔流域鉴定验收会议资料汇编(1990). 兰州: 甘肃省榆中县孙家岔流域治理指挥部,1990. Research Institute of Water and Soil Conservation of Gansu. Sunjiacha basin evaluation of the compilation of

data (1990)(In Chinese). Lanzhou: Management Headquarters of Sunjiacha Basin in Yuzhong County, Gansu Province,1990

- [7] 王改改. 丘陵山地土壤水分时空变化及其模拟. 重庆: 西南大学资源环境学院,2007. Wang G G. Spatial-temporal distribution of soil water and its simulation in hilly and mountainous region of Chongqing in China (In Chinese). Chongqing: College of Resources and Environment, Southwest University, 2007

VERTICAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE CONTENT IN SEMIARID LOESS REGION

—A CASE STUDY OF SUNJIACHA BASIN OF LANZHOU IN GANSU PROVINCE

Fei Xiliang¹ Zhang Xinming^{1,2} Jing Lingyun¹ Xing Gui²

(1 *Research Institute of Water and Soil Conservation of Gansu, Lanzhou 730020, China*)

(2 *Engineering College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China*)

Abstract The Sunjiacha Basin of Lanzhou, Gasu Province was cited as a case for study. Geostatistic analysis was done of the data of soil moisture measured in that region during 1982, 1983 and 2011 for vertical variability of the soil moisture. Results show that the spherical model fits very well the vertical distribution of soil moisture in all the lands different in land-use (terrace field, waste slope, slope farmland and woodland) in wet years, quite well only in terrace field and woodland and not in slope farmland and waste slope in normal years, and still to some extent in terrace field and woodland in dry years. Soil moisture in slope farmland and waste slope varies randomly in distribution, and even if in the rainy season its spatial autocorrelation is also very weak. The vertical variations of soil moisture in all the lands and in all the years demonstrate a significant seasonal trend and go within the range of 1.687 ~ 3.404 m, which tallies basically with the extend of variation of the soil properties measured in the range self-similarity.

Key words Semi-arid; Loess; Soil water; Vertical variation

(责任编辑:汪枫生)