

①

土壤水分异质性的研究综述

王 军^{1,2}, 傅伯杰¹, 蒋小平³

(1 中国科学院生态环境研究中心, 系统生态开放研究实验室, 北京 100085;
2 国土资源部土地整理中心, 北京 100035, 3 河南中州大学, 郑州 450000)

摘 要: 在干旱半干旱地区, 土壤水分是植物生长、植被恢复的主要影响因子, 与侵蚀过程密切相关, 但土壤水分具有高度的异质性, 土壤水分的时空变异性一直是水文学、土壤学研究的一个热点。从小区、生态系统、坡面、小流域和区域等不同尺度综述了土壤水分变异性的研究现状, 结合国内外前人的研究成果, 探讨了土壤水分异质性有待深化研究的方向和方法。

关键词: 土壤水分; 异质性; 尺度

中图分类号: S 152. 7 文献标识码: B 文章编号: 1005-3409(2002) 01-0001-05

Review on Research of Soil Moisture Heterogeneity

WANG Jun^{1,2}, FU Bo-jie¹, JIANG Xiao-ping³

(1 Research Center for Eco-environmental Sciences, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
2 Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Land Resources, Beijing 100035, China;
3 Zhongzhou University in H enan, Zhengzhou 450000, H enan Province, China)

Abstract: Soil moisture plays an important role in plant growth and vegetation rehabilitation, and is closely related to erosion in semi-arid areas. However, soil moisture has high degree of heterogeneity, this heterogeneity is one of foci in hydrology and soil science. Status of research on soil moisture variability from different scales including plot, ecosystem, slope, catchment and region is reviewed. Based on these results of researchers, direction and method of study on soil moisture variability are discussed.

Key words: soil moisture; heterogeneity; scale

土壤水分异质性主要指土壤水分在时空尺度(尺度是研究的物体或过程的空间分辨单位)上的变异性, 土壤水分具有高度的异质性(Ladson & Moore, 1992; Whitaker, 1993; Famiglietti 等, 1998)。无论在大尺度上还是在小尺度上, 土壤水分的空间异质性均存在。在干旱半干旱地区, 土壤水分不仅是植物生长和植被恢复的主要限制因子, 与侵蚀过程密切相关, 而且, 也是土地评价的主要因素之一。因此, 土壤水分时空变异性的研究一直是水文学、土壤学研究的一个热点(Western 等, 1998; Western & Rodger, 1998)。本文拟对不同尺度土壤

水分异质性的研究进行综述, 并探讨了土壤水分变异性有待深化研究的方面。

1 小区尺度

小区可以人工修建也可以在自然状况下选择一定面积的区域作为研究对象, 小区一般土地利用类型一致, 即生态系统是同质的。由于小区的尺度小, 试验比较容易操作、限定条件易于控制, 土壤的取样和水分测定方便, 可以从多角度、多层次对土壤水分的分布格局分析。如土壤水分与土壤物理性质的关系、不同土壤深度的土壤水分空间变异、以及季节和

① 收稿日期: 2001-10-13
基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(49725101); 国土资源部重点资助项目(西部典型区土地整理生态评价的指标体系和方法, 批准号: 2000301)。
作者简介: 王军, 男, (1970-), 博士, 副研究员, 主要从事景观生态学与土地可持续利用, 土地利用/覆被变化的研究。

年际的土壤水分变化等。小区试验的最大特点是采用随机排列和随机采样等手段来消除空间变异对试验结果的影响(龚元石等, 1998), 追求的是把空间异质质当成一个讨厌的误差来源加以排除, 实际操作上这是比较困难的。

2 生态系统尺度

生态系统是自然界的基本单元(Tansley, 1935)。生态系统定义的基本假定就是生态系统内是相对同质的, 生态学早期的许多研究建立在这样的假设基础之上。在生态系统即单一土地利用类型内就土壤水分的运动及转化过程、分布特点、时间变化等特征, 学术界进行了大量研究(Krumbach, 1959; 王孟本 & 李洪建, 1995; Kalma & Boulet, 1998), 特别是关于水分在土壤-植物-大气连接体(SPAC)的运移研究方面取得了不少成果。

3 坡面尺度

坡面尺度可大可小, 既可以是单一土地利用、也可是多种土地利用类型。坡面尺度具有以下优点: 第一, 坡面是景观的基本单元, 研究坡面土壤水分的时空变异将为预测较大尺度上土壤水分特性提供基础; 第二, 坡面综合了小气候、水文过程、地貌过程、土壤过程以及其他土壤物理属性, 因此, 深入了解坡面尺度的土壤水分变异将有助于更好地理解坡面的水文过程、生态过程和生物地化过程, 这些过程与水分呈非线性相关(Famiglietti 等, 1998); 第三, 坡面便于取样、测定土壤水分, 有利于土壤水分的连续观测。所以, 许多学者研究了坡面土壤水分的变异。王军等(2000)研究发现单一土地利用结构土壤水分从坡顶部到坡脚具有增长的趋势, 而土地利用结构复杂的土壤水分沿坡面分布复杂。Henninger 等(1969)研究坡面土壤水分变异时发现相对海拔和土壤的排水特性对土壤水分的变异影响显著, 但他并未指出二者的相对重要性; Moore 等(1988)证明坡向、坡型、汇水区面积(specific contributing area)三者的单一因素与表层土壤水分的相关性低, 而与 $\ln(a/b)$ (a 代表汇水区面积, b 代表坡度)和坡向二者回归显著。Famiglietti 等(1998)研究了一 200 m 坡面(土地利用类型为草地)0~5 cm 的土壤水分变异, 结果表明地形和土壤特性对土壤水分的变异随时间而有所改变。以上研究强调了地形(相对海拔、坡向和坡型等)、植被、土壤属性等因子与表层土壤水分的关系, 但也有研究发现与此相反的结论。例

如, Charpentier & Groffman(1992)和 Whitaker(1993)发现土壤水分与相对海拔关系不大; Niemann & Edgell(1993)证明表层土壤水分与坡面曲度无相关性。Bell(1980)发现土壤水分(0~15 cm)的变异是内在属性, 且在研究区域呈正态分布; 而 Loague(1992)证明沿坡面的表层土壤水分呈正态分布, 而均匀栅格取样的土壤水分并非正态分布。

4 集水区或小流域尺度

集水区和小流域是江河水系的基本集水单元, 在干旱半干旱的侵蚀地区也是一个独立的产沙、输沙系统, 阐明该尺度上土壤水分的时空变异有助于理解区域尺度上的水分变异, 实践上对水土流失的控制也有一定意义。坡面和集水区、小流域具有密切的关系, 因为, 两个或两个以上的坡面构成集水区或小流域。许多学者对流域尺度上的土壤水分利用传统统计分析和地统计方法进行了分析。例如, Hawley 等(1983)在农田小流域分析了植被盖度、土壤特性和地形对土壤水分分布的影响, 结果证明相对海拔是主控因子, 植被倾向于减小这种影响, 而土壤特性对土壤水分的影响最小; Nyberg(1996)研究了林地两次测定的 0~30 cm 的土壤水分, 结果发现土壤厚度与树木的根系分布与土壤含水量无关, 而与坡度和相对海拔密切相关; 然而, Singh 等(1998)在研究草地的土壤水分动态时发现土壤水分含量与植物耗水关系密切。Crave 和 Gascuel-Oudou(1997)、以及 Western(1998)等研究者利用一系列指数研究了土壤水分与这些指数的关系。还有一些科研工作者利用地统计学定量分析了土壤水分的变异性, 结论也不尽相同。例如, Loague(1992)、Charpentier & Groffman(1992)等人发现土壤水分不存在或存在微弱的空间自相关; 而其他学者利用实测数据研究发现土壤水分存在明显的空间自相关, 相关距离在 6 m(Hawley 等, 1983)、18~51 m(Fitzjohn 等, 1998)和 550~650 m(Warrick 等, 1990)之间。

5 区域尺度

区域的尺度大, 利用实测的土壤水分数据研究其时空变异难度比较大, 多是利用多年的水分平均值或遥感(Remote Sensing)测得的数据分析。由于遥感获得的数据需要一系列的计算和辅助资料如土壤质地和植被特征等, 以及地面实测水分数据的校正, 使其准确率和可信度受到影响(Western 等, 1998), 所以这方面的研究为数不多。Schmugge 和

Jackson (1996) 借助遥感资料利用地统计学方法分析了土壤水分的空间变异, 证明存在空间自相关, 相关距离在 4 500 m 以上。杨文治等(1998) 利用土壤水分的平均资料研究了黄土高原旱化与土壤水分的关系。

6 讨 论

综上所述, 坡面尺度、集水区和流域尺度是区域和生态系统的桥梁, 它具有大尺度的概括性和小尺

度的精确性, 仍是目前土壤水分研究的主要尺度。众多学者的研究表明: 第一, 土壤水分是土壤、土地利用(植被)、地形及汇水区面积等的函数, 研究区域的不同土壤类型、土地利用的分布及景观特点可用于部分解释土壤水分的时空变异特征; 第二, 土壤水分具有明显的区域性分异, 我们上面的分析表明, 研究者的区域不同但从相同的角度分析会得出截然相反的结论; 第三, 深入理解土壤水分的时空变异需继续研究不同地区、不同土层深度的土壤水分时空变化。

表 1 土壤水分变异性研究的总结

研究者 §	位置	土地利用	测定方法	面积	取样数	取样频率	取样深度/ cm
Krumbach, 1959	美国, Mississippi		烘干法	270m ²	120	两次	15 ~ 30
Hills & Reynolds, 1969	英国, Chew Stoke	农地	烘干法	2. 4m ² ~ 6km ²	60/ 地块或流域	1 次	0 ~ 8
Reynolds, 1970	英国, Somerset	农地	烘干法	715 个 5. 9m ² 小区	10/ 小区	8 次(1 次/ 月)	0 ~ 8
Reid, 1973	英国, Caydell		烘干法	2 个 10000m ² 地块	12/ 地块	每周一次(1 年)	0 ~ 32. 5
Henninger 等, 1976	美国, Pennsylvania		烘干法	560m 坡面	57	每周一次(6 月)	0 ~ 15
Bell 等, 1980	美国, Arizona, Kansas & South Dakota	农地	烘干法	62 个 160000m ² 地块	9 ~ 36/ 地块	1 ~ 5 次/ 地块	0 ~ 15
Owe 等, 1982	美国, South Dakota		烘干法	160000 ~ 2. 6km ²	42 ~ 69/ 地块	9 次(3 年)	0 ~ 10
Hawley 等, 1983*	美国, Oklahoma	农地	烘干法	8 个 51000 ~ 179000m ² 流域	16 ~ 92/ 流域	4 次(1 月)	0 ~ 15
Francis 等, 1986	西班牙, Murcia	草地	烘干法	5 个坡面	23 ~ 11 3/ 坡面	3 次(13 月)	0 ~ 7. 5
Moore 等, 1988	澳大利亚, New South Wales			6 个(190 ~ 200m) 坡面	20 ~ 21/ 坡面	两次	0 ~ 10
Warrick 等, 1990*	美国, Arizona	农地		450000m ²	45	一次	5, 10, 15
				45000 m ²	91	一次	5, 10, 15
Loague, 1992*	美国, Oklahoma	农地	烘干法	100000m ² 流域	4	90 次(4 年)	0 ~ 15
				100000m ² 流域	34	84 次(4 年)	0 ~ 15
				1000000m ² 流域	157	一次	0 ~ 10
				100/ 250m 坡面	50/ 坡面	一次	0 ~ 10
Charpentier & Groffman, 1992*	美国, Kansas			2 个 4356m ² 小区	49/ 小区	两次	0 ~ 5
Ladson & Moore, 1992	美国, Kansas	草地	遥感	377000m ² 流域	20	连续 9 天	0 ~ 5
Rajkai & Ryden, 1992			T DR	60m ²	273	一次	0 ~ 10
Niemann & Edgell, 1993	加拿大, British Columbia	草地	烘干法	10000m ²	31	5 次(4 月)	0 ~ 100
Robinson & Dean, 1993	英国, Oxford		T DR	150m 坡面	151	4 次(15 月)	0 ~ 10
Whitaker, 1993	美国, Arizona	草地	T DR	44000m ²	134	4 次(2 周)	0 ~ 15
王孟本 & 李洪建, 1995	中国, 山西	林地	烘干法		9(3/ 土地利用)	28 次(14 月)	10, 20 共 11 层
Schmugge&Jackson, 1996*	美国, Kansas		遥感				
Nyberg, 1996*	瑞典, Gardsjon	林地	T DR	6300m ²	57 ~ 73	两次(1 次/ 月)	0 ~ 30
Grave & Gasquet- Odoux, 1997	法国, Britany			10 个 500m 坡面	20/ 坡面	4 次(18 月)	5, 10
Singh 等, 1998	美国, Colorado	草地	中子探针	4 个坡面	35(5 ~ 12/ 坡面)	1 次/ 两周(7 年)	30 ~ 90
Famiglietti 等, 1998	美国, Austin	农地	烘干法	200m 坡面	21	88 次(217 天)	0 ~ 5
Fitzjohn 等, 1998*	西班牙, Guadalajara	林地	T DR	3675m ² 集水区	170	17 次(1 年)	0 ~ 15
Western 等, 1998*	澳大利亚, Tarrawarra	草地	T DR	105000m ² 集水区	500	13 次(1 年)	0 ~ 30
龚元石等, 1998	中国, 北京	农地	T DR	7. 5m × 7. 5m	210	3 次	0 ~ 15
Western 等, 1999	澳大利亚, Tarrawarra	草地	T DR	105000m ² 集水区	500	13 次(1 年)	0 ~ 30
王军等, 2000	中国, 陕西延安	多土地利用	T DR	3. 5km ²	26	10 次(半年)	0 ~ 70 分 5 层

§ * 代表利用地统计学方法。

表 1 总结了国内外土壤水分变异性的研究, 我们可以大致了解土壤水分的研究现状及有待继续加强的地方。第一, 从测定方法上看, 在 80 年代中期以前, 受测定方法的限制(烘干法) 研究土壤水分集中在小尺度上, 取样频率也不高; 进入 90 年代, 中子探针、时域反射仪(Time Domain Reflectometry 简称 TDR) 和遥感等技术应用于土壤水分的测定, 大大拓展了土壤水分的空间异质性研究。尤其是 TDR 的出现为土壤水分提供了一种快速而准确的测定方法, 对土壤水分的研究尺度及取样频率大大拓宽, 但

研究多集中在表层土壤水分(0 ~ 30 cm) 的研究(表 1), 缺乏对深层次土壤水分的研究, 而深层次土壤水分对生态过程和水文过程也具有重要的意义(Western 等, 1998); 实测土壤水分的季节和年际变化仍需进一步加强研究(Famiglietti 等, 1998); 遥感主要应用于大尺度的土壤水分测定和计算。第二, 从研究方法看, 80 年代以前, 对土壤水分的空间变异性以经典的统计学方法或描述性方法为主; 从 80 年代以后, 用于进行矿脉估计的地统计学(Geostatistics) 被引入到土壤学、水资源领域, 并逐渐应用于土

壤水分的空间异质性研究(Webster, 1985)。地统计学不同于经典统计学,它注重变量因子的空间过程,考虑其空间分布特征和空间自相关(Journel & Huijbregts, 1978),因此,它成为分析土壤水分空间特征及其变异规律最为有效的方法之一,国外学者作了大量介绍和实例研究(表1)。在我国,对地统计的应用相对滞后,1982年侯景儒和黄竞先将Journel & Huijbregts合著的“Mining Geostatistics”译成中文,地统计学才逐步在采矿业中应用。随后,徐吉炎和Webster(1983)利用地统计方法对彰武县的土壤普查资料进行了分析;沈思渊(1989)介绍了地统计在土壤中的应用;张朝生等(1995; 1997)分别对天津

市的土壤微量元素和长江水系重金属含量进行了地统计分析。由此可见,地统计学方法在土壤学、水文学领域对土壤水分的空间异质性研究仍处于介绍和初步应用阶段。

我国的黄土高原具有独特的地貌,土壤多壤质且深厚,水土流失极其严重。土壤水分与径流和侵蚀的产生有一定关系,研究黄土丘陵小流域不同层次土壤水分的时空变异,理论上可以丰富土壤水分时空变异特征及其定量研究的内容,深化不同土地利用及其格局对土壤水分的影响,实践上对减少径流和控制侵蚀也有意义。

参考文献:

- [1] Bell, K.R., Blanchard, B.J., Schmutge, T.J., Witezak, M.W. Analysis of surface moisture variations within large field sites[J]. Water Resources Research, 1980, 16(4): 796–810.
- [2] Charpentier, M.A., Groffman, P.M. Soil moisture variability within remote sensing pixels[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 18 987–18 995.
- [3] Crave, A., Gascuel-Odoux, C. The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content[J]. Hydrological Processes, 1997, 11: 203–210.
- [4] Famiglietti, J.S., Rudnicki, J.W., Rodell, M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Ratlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210: 259–281.
- [5] Fitzjohn, C., Ternan J.L., Williams, A. G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control[J]. Catena, 1998, 32: 55–70.
- [6] Francis, C.F., Thomes, J.B., Romero Diaz, A., Lopez Bermudez, F., Fisher, G.C. Topographic control of soil moisture, vegetation cover and land degradation in a moisture stressed Mediterranean environment[J]. Catena, 1986, 13: 211–225.
- [7] Hawley, M.E., Jackson, T.J., McCuen, R.H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds[J]. Journal of Hydrology, 1983, 62, 179–200.
- [8] Henninger, D. L., Petersen, G. W., Engman, E.T. Surface soil moisture within a watershed – variations, factors influencing, and relationships to surface runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5), 773–776.
- [9] Hills, R.C., Reynolds, S.G. Illustrations of soil moisture variability in selected areas and plots of different sizes[J]. Journal of Hydrology, 1969, 8, 27–47.
- [10] Journel, A. G., Huijbregts, C. H. Mining geostatistics[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [11] Kalma, J.D., Boulet, G. Measurement and prediction of soil moisture in a medium-sized catchment[J]. Hydrological Sciences, 1998, 43(4): 597–610.
- [12] Krumbach, A.W.J. Effects of microrelief of on distribution soil moisture and bulk density[J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64: 1587–1590.
- [13] Ladson, A.R., Moore, I.D. Soil water prediction on the Konza Prairie by microwave remote sensing and topographic attributes[J]. Journal of Hydrology, 1992, 138: 385–407.
- [14] Loague, K. Soil water content at R-5. Part 1. Spatial and temporal variability[J]. Journal of Hydrology. 1992, 139, 233–251.
- [15] Moore, I.D., Burch, G.J., Mackenzie, D.H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies[J]. Trans. Am. Soc. Ag. Engng, 1988, 31: 1 098–1 107.
- [16] Niemann, K.O., Edgell, M.C.R. Preliminary analysis of spatial and temporal distribution of soil moisture on a deforested slope[J]. Physical Geography, 1993, 14(5): 449–464.
- [17] Nyberg, L. Spatial variability of water content in the covered catchment at Gardsjon, Sweden[J]. Hydrological Pro-

cesses, 1996, 10: 89– 103.

[18] Owe, M. , Jones, E. B. , Schmugge, T. J. Soil moisture variation patterns observed in Hand County, South Dakota [J]. Water Resources Bulletin, 1982, 18: 949– 954.

[19] Rajkai, K. , Rydén, B. E. Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method[J]. Geoderma, 1992, 52: 73 – 85.

[20] Reid, I. The influence of slope orientation upon the soil moisture regime and its hydrogeomorphological significance [J]. Journal of Hydrology, 1973, 19: 309– 321.

[21] Reynolds, S. G. The gravimetric method of soil moisture determination, III: An examination of factors influencing soil moisture variability[J]. Journal of Hydrology, 1970, 11: 288– 300.

[22] Robinson, M. , Dean, T. J. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe[J]. Hydrological Processes, 1993, 7: 77– 86.

[23] Schmugge, T. J. Jackson, T. J. Soil moisture variability [C]. In: Stewart, J. B. , Engman, E. T. , Feddes, R. A. , Kerr, Y (Editors). Scaling-up in Hydrology using Remote Sensing. Wiley, Chichester, 1996, 183– 192.

[24] Singh, J. S. , Milchunas, D. G. Lauenroth, W. K. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland [J]. Plant Ecology, 134: 77– 89.

[25] Tansley, A. G. The use and abuse of vegetational concepts and terms[J]. Ecology, 1935, 16: 284– 307.

[26] Warrick, A. W. , Zhang, R. , Moody, M. M. , Myers, D. E. Kriging versus alternative interpolators: errors and sensitivity to model inputs[C]. In: Roth, K. , Flühler, H. , Jury, W. A. , Parker, J. C. (Editors). Fieldscale water and solute flux in soils. Birkh? ser Verlage, Basel, 1990, 157– 164.

[27] Webster, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[J]. Advance in Soil Science. 1935, 3: 1– 70.

[28] Western, A. W. , Grayson R. B. , Blscl, G. , Willgoose, G. R. , McMahon, T. A. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices[J]. Water Resources Research, 1999, 35(3): 797– 810.

[29] Western, A. W. , Günter, B. , Rodger, B. G. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment[J]. Journal of Hydrology, 1998, 205: 20– 37.

[30] Western, A. W. , Rodger, B. G. The Tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements[J]. Water Resources Research 1998, 34(10): 2 765– 2 768.

[31] Whitaker, M. P. L. Small-scale spatial variability of soil moisture and hydraulic conductivity in a semi-arid rangeland soil in Arizona[M]. Tucson: The University of Arizona, 1993.

[32] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征[J]. 土壤学报. 1998, 35(1): 10– 15.

[33] 侯景儒, 黄竞先. 地质统计学及其在矿产储量计算中的应用[M]. 北京: 地质出版社.

[34] 沈思渊. 土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望[J]. 土壤研究进展. 1989, (2): 11– 24.

[35] 王军, 傅伯杰, 黄土丘陵小流域土地利用与土壤水分的时空分布[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 84– 91.

[36] 王孟本, 李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报, 1995, 15(2): 178– 184.

[37] 徐吉炎, Webster, R. 土壤调查数据地域统计的最佳估值研究[J]. 土壤学报, 1983, 20: 419– 430.

[38] 杨文治, 邵明安, 彭新德, 等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J]. 中国科学 D, 1998, 28(4): 357– 365.

[39] 张朝生, 陶澍, 袁贵平, 等. 1995, 天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究[J]. 土壤学报, 1995, 32(1): 50– 56.

[40] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究– 地统计学方法[J]. 地理学报, 1997, 52(2): 184– 192.