

DOI: 10.5846/stxb201402280349

张川, 张伟, 陈洪松, 聂云鹏, 叶莹莹, 王克林. 喀斯特典型坡地旱季表层土壤水分时空变异性研究. 生态学报, 2015, 35(19): - .
Zhang , Zhang W, Chen H S, Nie Y P, Ye Y Y, Wang K L. Temporal and spatial variation in surface soil moisture content of karst slopes in the dry season. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

喀斯特典型坡地旱季表层土壤水分时空变异性研究

张 川^{1,2,3}, 张 伟^{1,2}, 陈洪松^{1,2,*}, 聂云鹏^{1,2}, 叶莹莹^{1,2,3}, 王克林^{1,2}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:本文基于网格(10 m×10 m)取样,用地统计学方法研究了桂西北喀斯特地区典型灌丛与草灌两种植被类型坡地(90 m×120 m)旱季(2011 年 10 月至 2012 年 3 月)表层(0—16 cm)土壤水分含量的空间变异特征。结果表明:整个采样期灌丛坡地的土壤水分含量明显要高于草灌坡地,两种类型坡地的表层土壤水分含量均属于中等程度的变异(10%< C_v <100%),且灌丛坡地的变异系数大于草灌坡地。两种植被类型坡地的土壤水分含量与降雨量的波动变化趋势相同,而与土壤水分变异系数的变化趋势整体相反。土壤水分含量均具有明显的空间依赖性和空间结构。两种类型坡地土壤水分的变程与块基比的变化趋势都大致相反,灌丛坡地土壤水分的变程与土壤水分含量均值的变化趋势在采样前期和中期趋势相反,在采样后期趋势相同,而草灌坡地土壤水分的变程与土壤水分含量均值的变化趋势大致相同。两块样地土壤水分的变异系数、变程与块基比均随土壤水分含量的变化有一定的季节变化规律,说明平均土壤水分含量对土壤水分空间格局的主导作用是持续存在的,结合研究目标可以有效指导后续的土壤采样。虽然两块样地表层土壤水分含量整体沿坡面自上而下呈递增趋势,但土壤水分含量最大值均分布在样地下坡位右侧地段,这主要与该地段坡度较缓、土壤厚度较大且碎石含量较低有关。

关键词:土壤水分;灌丛;草灌;时空变异;喀斯特

Temporal and spatial variation in surface soil moisture content of karst slopes in the dry season

ZHANG Chuan^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Hongsong^{1,2,*}, NIE Yunpeng^{1,2}, YE Yingying^{1,2,3}, WANG Kelin^{1,2}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The karst region of southwest China is characterized by surface soils low in moisture and nutrients, low vegetation coverage and high microhabitat diversity. Knowledge of the temporal and spatial variability of surface soil moisture content is crucial for hydrological modeling and understanding soil water dynamics at different scales. This study aimed to characterize the spatial variability of surface soil (0—16cm) moisture content on two slopes, one dominated by shrubs and the other by a shrub/grass mixture, using a grid (10 m × 10 m) sampling scheme and geostatistical methods. The study was conducted in the dry season (October, 2011 to March, 2012) in a typical karst area located in northwest Guangxi, southwest China. Surface soil moisture content was found to vary moderately, with coefficients of variation from 10% to 100% on the two slopes. Surface soil moisture content and associated coefficients of variation on the shrub slope were significantly higher than

基金项目:国家自然科学基金项目(41171187);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10);国家科技支撑计划项目(2010BAE00739-02)

收稿日期:2014-02-28; **网络出版日期:**2014-12-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbchs@isa.ac.cn

those on the shrub-grass slope. This was mainly attributed to the irregular distribution of shrubs on the shrub-grass slope. Soil moisture content was positively correlated with rainfall but negatively correlated with coefficients of variation. The spatial distribution of surface soil moisture content on the two slopes differed. The spatial range of soil moisture content was negatively correlated with the magnitude of the nugget effect. For the shrub slope, surface soil moisture content was negatively correlated with mean soil moisture at the initial and middle stages of sampling, but was positively correlated mean soil moisture at the later stage of sampling. For the shrub-grass slope, surface soil moisture and mean soil moisture were positively correlated at all sampling stages. Differences between the two slopes were likely due to the combined effects of vegetation, soil type, topography and other factors. The coefficients of variation, spatial range and the nugget effect of soil moisture varied with season on the two typical slopes. These results suggest that mean soil moisture has a substantial influence on the spatial and temporal variability of surface soil moisture in this area; this could help design suitable soil sampling strategies to match future research objectives. The spatial distribution patterns of soil moisture on the two slopes were much different from those found in previous studies in karst areas. This was probably due to the geological differences between our study sites and sites of the previous studies. Kriged maps based on the selected variogram models showed a regular distribution of soil moisture on the two slopes. Soil moisture had a negative relationship with altitude on the two slopes. However, the maximum soil moisture was observed at the right downhill corner, probably due to the gentler slope, greater soil depth, and lower gravel content in that location. In summary, by investigating the spatial and temporal variation of surface soil moisture on two slopes with different vegetation types, this study helps to improve our understanding of hydrological processes, which is useful for rehabilitating vegetation in the karst region of southwest China.

Key Words: Soil moisture; Shrub; Shrub-grass; Spatial variation; Karst

我国西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中分布区(欧洲地中海沿岸、美国东部、中国西南部)中连片裸露碳酸盐岩面积最大的地区,总面积约 54 万 km^2 ^[1]。该地区可溶岩造壤能力低,长期强烈的岩溶作用产生了水土资源不协调的双层空间结构,导致地表水易流失、地下水深埋,加上土层浅薄、土壤持水性能差,又因缺乏植被系统的调节,致使旱涝灾害频发,生态环境十分脆弱^[2]。因此,虽然西南喀斯特区域降雨比较充沛,土壤水仍然是喀斯特退化生态系统植被恢复重建的主要障碍因素^[2-3]。坡地近地表土壤水分条件对径流形成和侵蚀发生有重要影响,其空间格局由不同尺度上的自然作用和过程控制,包括降水、径流、蒸发蒸腾等,其变化尺度从几厘米到上百米^[4]。在特殊的土地利用结构下,喀斯特峰丛洼地表层土壤含水量坡地高于洼地,甚至有随海拔高度升高而增加的趋势^[5-6]。但是,当土层比较深厚、岩石裸露率较低时,与其他类型区相似,土壤水分可能具有沿坡向下逐渐升高的趋势。显然,喀斯特地区水分时空变异研究应该考虑地质背景与植被类型的影响^[7]。同时,有必要对土壤水分的空间变异特征进行定量研究,充分认识土壤水分空间变异的程度、尺度,分析影响土壤水分空间分布的环境因素和过程。

空间异质性是土壤的基本属性,即使在几厘米的距离上土壤性质也存在强烈变异^[8]。土壤性质在空间上的变异产生了其结构功能上的差异^[9]。地统计学是在传统统计学基础上发展起来的空间分析方法,它不仅能有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,还能将空间格局与生态过程联系起来,可有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响^[10-12]。国内外学者应用地统计方法对土壤性质的空间变异特征进行了大量研究^[4,8,13-18],对喀斯特地区土壤性质的研究也有探讨^[9,19-21],对于喀斯特区土壤水分的空间异质性亦有专门研究^[5-7,22-24],但都只是单一样地(洼地或坡地)的空间变异特征及其影响因素,且水分沿坡变化结论不一,有的研究结果表明土壤水分沿坡向下具有不断减小的趋势^[6],也有研究发现沿坡变化无明显规律^[5],对喀斯特坡地不同土地利用方式土壤水分的差异性^[25]与不同植被类型土壤水分的时空变异^[26]也有研究,但采样方法均为随机性较大的样线法,且样地退耕时间较短,存在较大的人为干扰,缺乏具有代表性的长时间未经人为干扰的不同植被类型坡地土壤水分的时空变异规律及其季节分布格局的比较。因此,本研究基于中国

科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站,以具有代表性的自 95 年起未经人为干扰的两种不同植被类型坡地做比较,利用标准网格采样,结合经典统计学和地统计学方法分析比较了灌丛与草灌两种植被类型坡地 2011 年 10 月至 2012 年 3 月土壤水分的时空变异规律及其季节分布格局,更有助于深入探讨喀斯特地区坡地旱季表层土壤水分变异的自然过程和控制因素,为区域水资源精确模拟和有效利用奠定基础,以期为喀斯特退化生态系统的植被恢复和生态重建提供理论指导。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于桂西北中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站内。地理位置为 108°18′56.9″—108°19′58.4″ E,24°43′58.9″—24°44′48.8″ N,地势四周高,中间低,为典型峰丛洼地景观,海拔最高为 647 m,最低为 272 m,坡度较陡,≥25°的坡面占 62%。研究区地质基础为白云岩,发育土壤为深色或棕色石灰土,坡地基岩裸露面积≥30%,土层较薄,一般为 10—50 cm。研究区属中亚热带季风气候区,多年平均气温为 19.9 ℃,7 月平均气温为 27.9 ℃,1 月平均气温 10.1 ℃,极端高温和低温分别为 38.7 ℃ 和-5.2 ℃,年平均≥10 ℃ 积温为 6300 ℃,无霜期 329 d。多年平均降雨量 1389 mm,4—8 月为雨季,降雨量占全年的 74%,9 月至次年 3 月为旱季。年平均日照 1451 h,年平均太阳总辐射量 4138 MJ/m²,其中有效辐射量为 2119 MJ/m²。

1.2 研究方法

1.2.1 采样与测定方法

选取两块自 95 年起未经人为干扰的典型灌丛与草灌坡地,在 90 m×120 m(投影长)范围内以网格法(10 m×10 m)采样,灌丛与草灌坡地分别设置样点 130、129 个(草灌坡地其中 1 个样点分布在峭壁上,无法采样),用全站仪(南方,NTS-302R)确定各采样点位置,用手持式 GPS(etrex2000)记录每个采样点地理信息。采样区位置及采样点布设如图 1 所示,样地基本理化性质如表 1 所示。2011 年 10 月—2012 年 3 月(旱季)每月采样一次,采样日期的选取尽量避开降雨(连续 5 d 以上未降雨),采样时用 TDR(Trime-zec,IMKO,德国)测定各采样点表层 0—16 cm 土壤体积含水量。所选灌丛样地为典型灌木维管植物群落,坡脚土壤厚度较大,土壤比较肥沃,密生灌丛,山腰岩石较多,间生草本和藤蔓植物,坡上主要以矮小灌丛和草本为主。而草灌样地植物以草本植物为主,间生藤蔓植物,仅在坡脚分布有灌丛,坡地右侧土层深度较高,草本植物密度也较高。两块典型坡地山顶部岩石裸露均较大,在积土厚处偶见耐干旱的乔木,植被覆盖度沿坡向下均明显呈逐渐升高的趋势。

表 1 研究样地土壤基本理化性质

Table 1 Surface soil properties of the sampling sites

植被类型 Vegetation type	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	饱和导水率 Saturated conductivity/ (m/d)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	碎石含量 Content of gravel/%	土壤有机碳 SOC/ (g/kg)	坡度 Slope degree/(°)
灌丛 Shrub	1.03	17.43	8.70	51.19	22.55	50.5	33.15
草灌 Shrub-grass	1.04	2.46	6.97	52.34	5.66	36.1	34.73

1.2.2 数据处理

用经典统计学方法和地统计学方法对样本数据进行分析处理。土壤水分含量的描述性统计分析在统计软件 SPSS18.0 中进行,半变异函数的计算和模型的拟合及 Kriging 等值线图的描绘在专业地统计软件 GS+ 7.0 中完成。地统计学方法近年来已广泛应用于土壤空间异质性研究,其有关方法及原理^[21-24,27]等,本文不再赘述。

进行地统计分析前,利用单样本 K-S 检验,对土壤水分数据进行正态分布检验。灌丛坡地 11 年 11 月、12 月与 12 年 1 月、3 月以及草灌坡地除 12 年 2 月外其余 5 次土壤水分数据均不符合正态分布,其中灌丛坡地

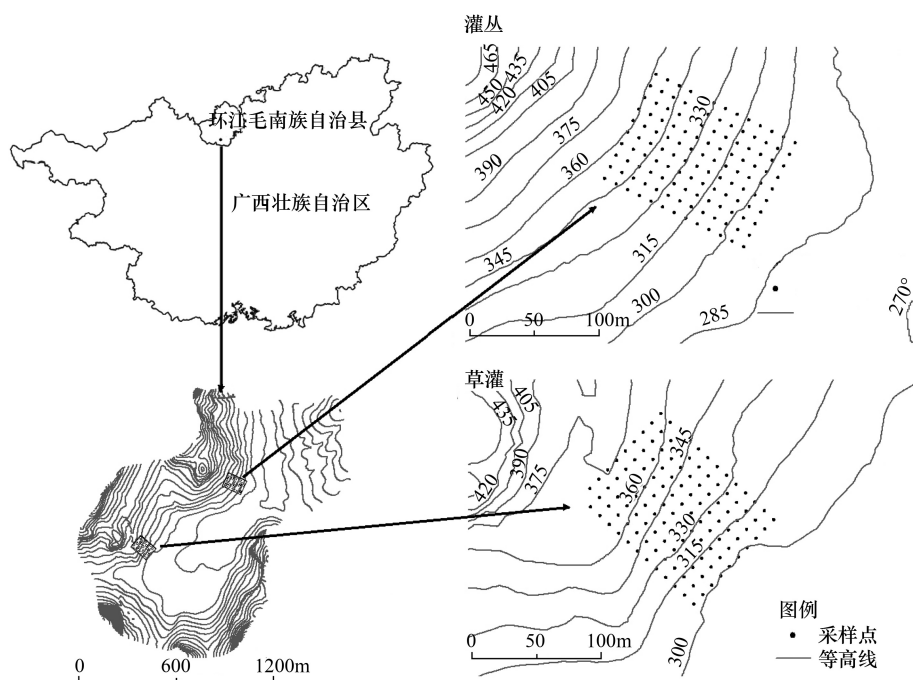


图1 采样区位置及样点分布图

Fig.1 Location of the study area and distribution of the sampling sites

12 年 1 月、3 月以及草灌坡地 11 年 10 月、12 月与 12 年 1 月、3 月土壤水分数据采用常用对数 $\lg$ 函数对数据进行转化,灌丛坡地 11 年 11 月、12 月以及草灌坡地 11 年 11 月土壤水分数据采用平方根反正切函数对数据进行转化,转换后所有数据均符合正态分布,可以进行地统计分析。

2 结果与分析

2.1 旱季坡面表层土壤水分含量的统计特征

由图 2 中可知,旱季灌丛与草灌坡地表层土壤水分含量均属于中等程度的变异 ($10\% < C_v < 100\%$),但它们的变化范围有所差异,灌丛坡地为 43%—56%,草灌坡地为 41%—50%。同一采样期灌丛坡地的土壤水分含量明显要高于草灌坡地,且变异系数也大于草灌坡地。两块样地的土壤水分含量与变异系数随时间变化有一定的规律。土壤水分含量与降雨量的波动变化趋势相同,而土壤水分含量与相应的变异系数变化趋势整体上相反,但在旱季采样后期变化趋势相同。

2.2 旱季坡面表层土壤水分含量的空间变异特征

由图 3 中可知,两种植被类型坡地表层土壤水分含量最佳拟合模型为高斯模型、球状模型或指数模型,模型的决定系数均较高,均大于 0.85,说明模型拟合效果

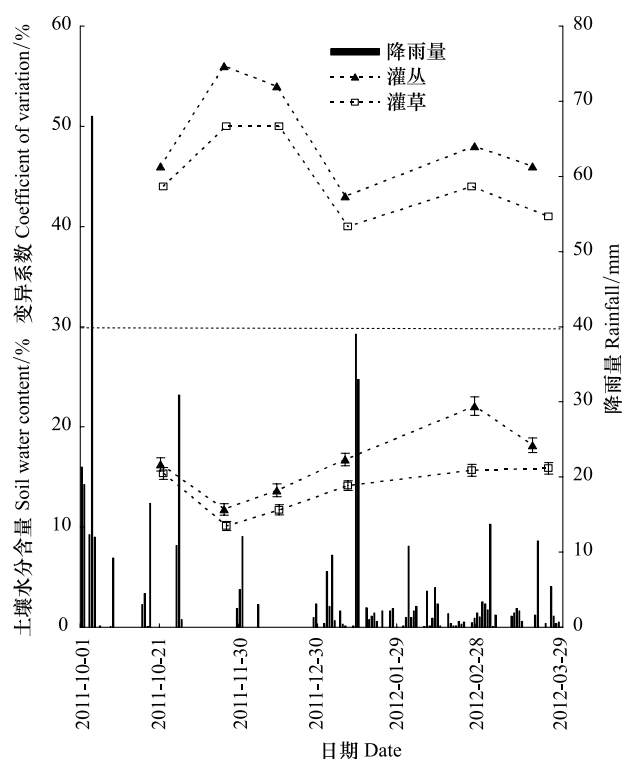


图2 土壤水分含量、标准误、变异系数与降雨量的时间变化格局

Fig.2 Temporal pattern for each study area of mean soil water contents, standard error and coefficient of variation

The mean areal rainfall for the study area is also shown

较好。两种类型样地半变异函数均有明显的趋势效应(曲线未达到稳定的趋势),为了更好地反映变化梯度此处不做相关的去除趋势效应的处理。灌丛坡地 2011 年 11 月、2012 年 2 月与 3 月土壤水分含量表现为强烈的空间自相关性(块基比 $<25\%$),其它时期两块样地土壤水分含量均表现为中等的空间自相关性($25\%<$ 块基比 $<75\%$)^[27]。灌丛坡地 2011 年 11 月与 12 月、草灌坡地 2012 年 1 月与 2 月土壤水分含量变程均较大,超过 150 m 采样范围。两块样地土壤水分的变程与块基比随时间的变化趋势大致相反(图 4),但灌丛与草灌坡地之间差异较大。灌丛坡地土壤水分的变程与土壤水分含量均值的变化趋势在采样前期和中期趋势相反,在采样后期趋势相同,而草灌坡地土壤水分的变程与土壤水分含量均值的变化趋势大致相同(图 4 与图 2)。

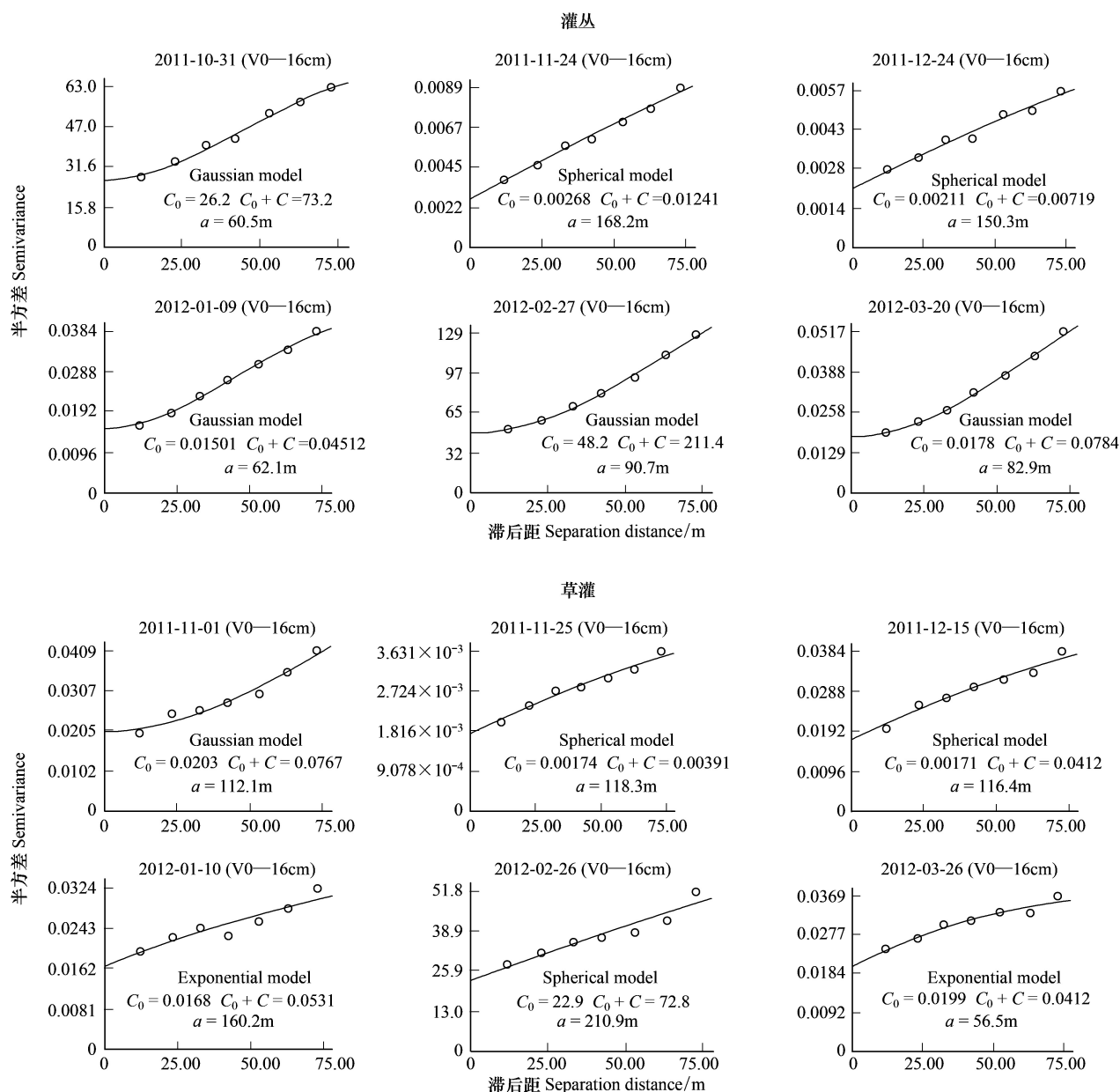


图 3 不同时期土壤水分含量的半变异函数图(灌丛 a–f, 草灌 g–i)

Fig.3 Semi-variograms of soil water contents (0–16 cm) on (a–f) shrub slope and (g–i) shrub-grass slope in different periods

2.3 旱季坡面表层土壤水分的空间分布格局

为了更全面、直观的反映坡面表层土壤水分含量的分布特征,利用普通 Kriging 插值方法分别绘制了两种植被类型坡地旱季表层土壤水分含量的等值线图(基于坡地投影长 90 m $\times$ 120 m)。结合样地的高程图,由图

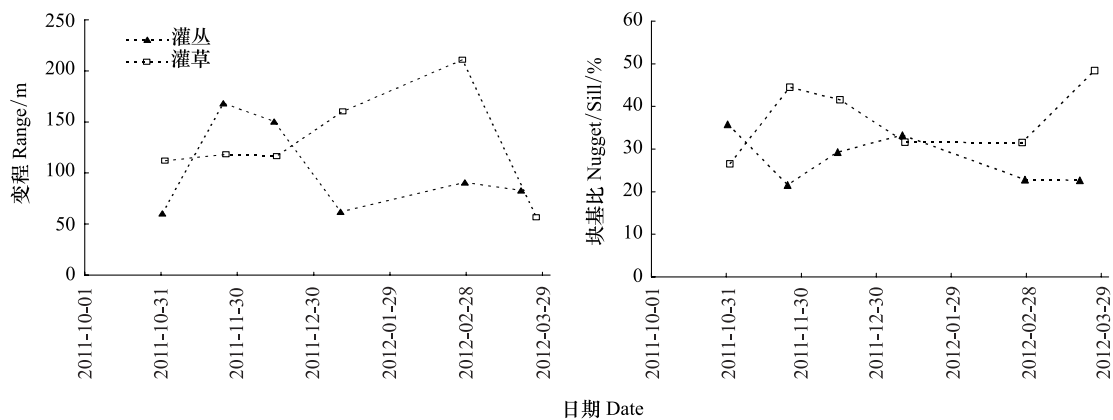


图4 样地土壤水分半变异函数参数的时间变化格局

Fig.4 Temporal pattern for study area of semi-variograms of soil water contents (0—16cm)

5 中可知,两块样地土壤水分含量最小值均发生于上坡位置,最大值均发生于下坡位置。灌丛坡地表层土壤水分含量沿坡面自上而下呈递增趋势,在坡脚处最大;草灌坡地表层土壤水分含量整体沿坡面自上而下也呈递增趋势,但样地右侧土壤水分含量较高。

3 讨论

在整个采样期灌丛坡地土壤水分含量均高于草灌坡地,说明灌丛植被相对于草本植物更有利于表层土壤水分的保蓄。灌丛与草灌坡地表层土壤水分含量在整个旱季均表现为中等程度的变异,这可能与研究区土壤碎石含量较高且微地貌形态比较复杂有关^[28],而同一采样期灌丛坡地的土壤水分含量与变异系数均大于草灌坡地,植被对土壤水分影响的双重作用可能是主要原因。首先,灌丛的不规则分布可能会增加蒸散量的随机性而导致土壤水分的变化;其次,灌丛的不规则分布可能会增大土壤颗粒分布的随机性从而增加土壤水分更多的可变性^[29]。两块样地的旱季土壤水分与降雨量的波动变化趋势相同,这与该地区以往土壤水分的研究结果一致^[30]。土壤水分含量与相应的变异系数变化趋势整体上相反,这与该地区以往的研究结果一致^[30],与以往黄土高原地区的研究也一致^[29],但在采样后期变化趋势相同,这可能由于采样后期降雨量适中且比较频繁,对土壤水分有个充分补给的过程,土壤水分长期处于饱和状态,导致土壤水分含量与相应的变异系数变化都不大且趋势相同。

如果变量在采样尺度上具有空间依赖性(或者空间相关性),半方差函数会随着滞后距的增加而增大,并且在超过一定距离(变程)后逐渐趋近于基台值或围绕基台值波动^[19,21]。灌丛与草灌坡地表层土壤水分含量在整个旱季观测期均具有明显的空间依赖性和空间结构。块金值表示随机变异的大小,主要有两个来源:一是来源于最小取样间隔内的自然过程造成的变异,二是来源于实验误差^[23,31-32]。灌丛坡地 2012 年 2 月与 3 月土壤水分含量表现为强烈的空间自相关性(块基比<25%),说明在当前观测尺度上,随机因素对土壤水分含量分布的贡献较小,其空间变异主要由土壤母质、地形等自然因素(结构性变异)引起^[16];两块样地其他月份旱季坡面土壤水分含量的块金效应均较大,说明随机变异和小于采样尺度的变异不容忽视。变程反映了土壤性质在空间上的平均变异尺度,灌丛坡地 2011 年 11 月与 12 月、草灌坡地 2012 年 1 月与 2 月土壤水分含量变程均较大,其空间连续性的尺度范围超过了采样范围,采样范围需要进一步扩大;其它时期土壤水分含量变程较小,其空间连续性的尺度范围较小。两块样地土壤水分的变程与块基比的变化趋势大致相反,这与张继光等^[33]在喀斯特地区洼地表层土壤水分变程与块基比的变化趋势相同的结论相反,这可能是由于研究样地的差异(洼地土层较深而坡地土层较浅且碎石含量高)所致;与 Hu 等^[29]在黄土高原地区的研究结论也相反,这可能是由于研究区地质背景与气候差异所致;而灌丛与草灌坡地之间的差别较大,这可能与两块样地微地貌与植被类型的差异所致。灌丛坡地变程与土壤水分均值的变化趋势在采样前期和中期相反,随着平均含

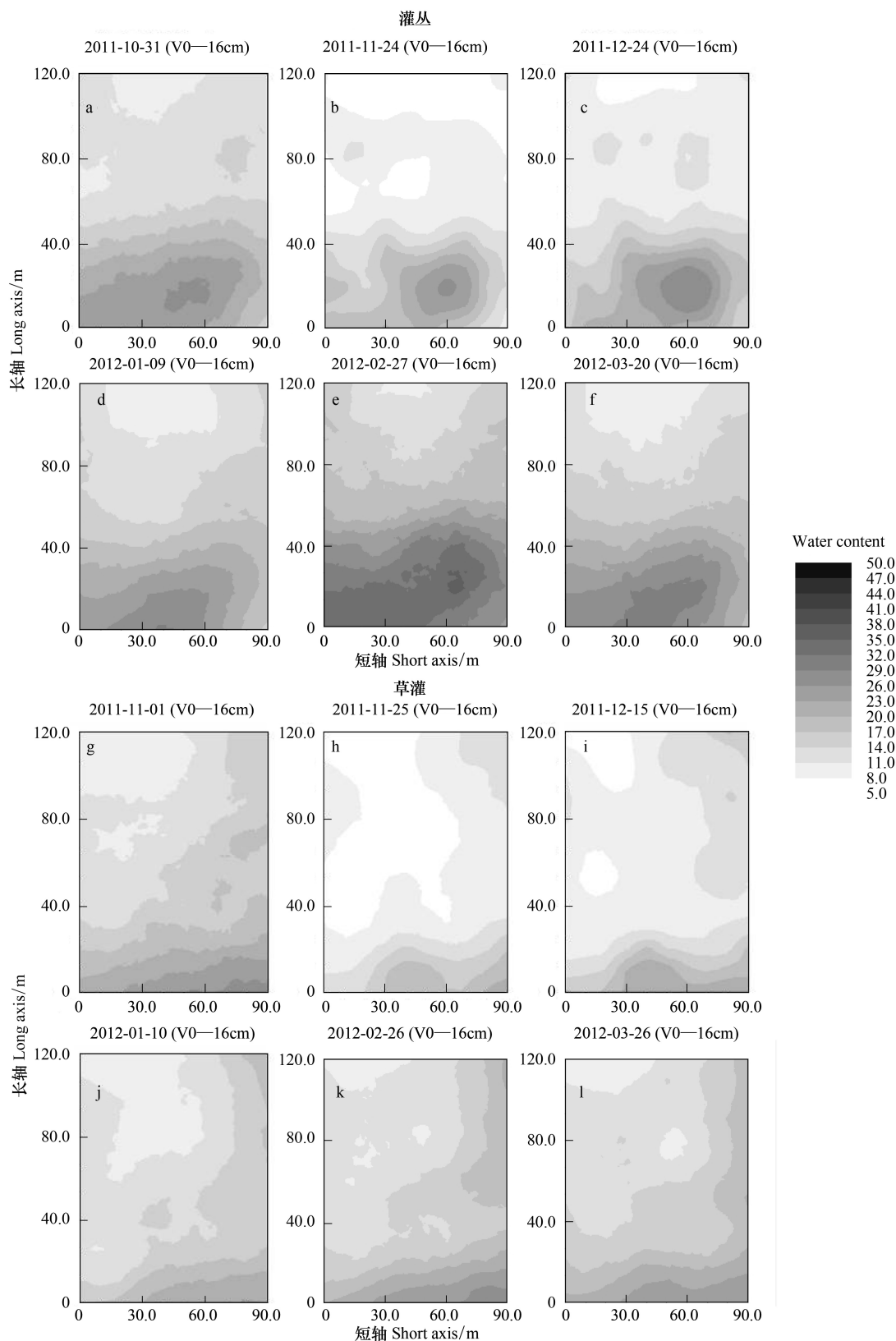


图5 土壤水分含量空间分布图(灌丛 a-f,草灌 g-l)

Fig.5 Spatial distribution map of soil water contents (0—16cm) on (a-f) shrub slope and (g-l) shrub-grass slope

水量的升高而减小,这与张继光等^[33]在喀斯特地区和 Hu 等^[29]在黄土高原地区的研究结果一样。变程的减小主要与该取样尺度下影响土壤水分各种过程的空间相互作用加强有关^[31]。在土壤水分较高或持续降雨过后,有研究认为由于土壤饱和区域的扩张等会造成土壤水分的变程增加^[4],但在喀斯特地区变程却变小,这可能与该地区特殊的地形和微地貌有关,由于地形的起伏,必然有地表径流和侧向流的发生,侧向流的再分配能导致排水线内形成湿润的窄带从而改变了土壤水分的空间格局;此外石丛的存在也使得降雨后其周围土壤含水量明显增加,两者的叠加作用可能强化了土壤水分分布的不连续性,使变程减小。而到采样后期,变程又与土壤水分变化相一致,这种情况可能由控制土壤水分格局的自然过程(如降雨等)的作用所致^[22]。而草灌坡地变程与土壤水分均值的变化趋势大致相同,与以往的研究结果类似^[4]。灌丛与草灌坡地变程与土壤水分均值的变化趋势的差异可能是由于两块样地植被、土壤、地形等因素的差异综合作用所致。

本研究两种植被类型坡地土壤水分的空间分布规律与以往在喀斯特地区的研究结果相反,据张继光等^[6]的研究在石灰岩坡地土壤水分沿坡向下具有不断减小的变化趋势,这可能主要与研究区地质背景差异有关(本研究区基岩为白云岩)。石灰岩坡地各种封闭或半封闭的小生境普遍发育,尤其以中上坡发育较多,导致上坡位土壤水分含量较高,而白云岩坡地基岩以整体风化为主,各种小生境发育不明显,而土壤碎石含量具有一定的坡位分异规律,造成土壤水分呈现出与石灰岩坡地截然不同的空间分布规律。研究区土壤碎石体积含量可达 10%—40%,且随海拔的升高而增加^[28],导致两块样地土壤水分含量随坡位升高而降低,且土壤水分含量最小值均出现在上坡。虽然灌丛和草灌坡地表层土壤水分含量整体沿坡面自上而下呈递增趋势,但土壤水分含量最大值均分布在样地下坡位右侧地段,这主要与该地段坡度较缓、土壤厚度较大且碎石含量较低有关。

4 结论

本研究利用的经典统计及地统计方法比较了两种不同植被类型的典型喀斯特坡地(灌丛与草灌)旱季土壤水分的时空变异特征。结果表明,在整个采样期灌丛坡地的土壤水分含量均高于草灌坡地,说明灌丛植被相对于草灌植物更有利于表层土壤水分的保蓄。土壤水分含量与降雨量的波动变化趋势相同,而与变异系数的变化趋势整体上相反。

两种植被类型坡地土壤水分含量均具有明显的空间依赖性和空间结构。两种类型坡地土壤水分的变程与块基比的变化趋势都大致相反,灌丛坡地土壤水分的变异系数与变程的变化趋势相反,而草灌坡地土壤水分的变异系数与变程的变化趋势相同。两块样地土壤水分的变异系数、变程与块基比均随土壤水分含量的变化有一定的季节变化规律,说明平均土壤水分含量对土壤水分空间格局的主导作用是持续存在的,结合研究目标可以有效指导后续的土壤采样。

两种植被类型坡地表层土壤水分含量整体沿坡面自上而下呈递增趋势,但土壤水分含量最大值均分布在样地下坡位右侧地段,这主要与该地段坡度较缓、土壤厚度较大且碎石含量较低有关。

致谢:感谢李德军研究员修改英文摘要。

参考文献 (References):

- [1] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602-606.
- [2] 陈洪松, 王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究. 农业现代化研究, 2008, 29(6): 734-738.
- [3] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [4] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the tarrawarra catchment. Journal of Hydrology, 1998, 205(1/2): 20-37.
- [5] 陈洪松, 傅伟, 王克林, 张继光, 张伟. 桂西北岩溶山区峰丛洼地土壤水分动态变化初探. 水土保持学报, 2006, 20(4): 136-139.
- [6] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 梁洪波, 孔祥丽, 张伟. 喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系. 农业工程学报, 2010, 26

- (9): 87-93.
- [7] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(2): 317-326.
- [8] Mallarino A P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1473-1481.
- [9] 张伟, 陈洪松, 王克林, 侯娅, 张继光. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异性. 生态学报, 2007, 27(12): 1-8.
- [10] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 基于环境相关法和地统计学的土壤属性空间分布预测. 农业工程学报, 2009, 25(7): 237-242.
- [11] 马风云, 李新荣, 张景光, 李爱霞. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性. 应用生态学报, 2006, 17(5): 789-795.
- [12] 邬建国. 景观生态学: 格局过程尺度与等级 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [13] Warrick A W, Nielsen D R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D(ed.). Applications of Soil Physics. New York: Academic Press, 1980: 319-344.
- [14] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56.
- [15] uran L, Okin G S, Alvarez L, Epstein H. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. Biogeochemistry, 2008, 88(1): 73-88.
- [16] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, McMahon T A, Blöschl G, Wilson D J. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship o dominant spatial hydrological processes. Journal of Hydrology, 2004, 286(1/4): 113-134.
- [17] 王淑英, 路苹, 王建立, 杨柳, 杨凯, 于同泉. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征——以北京市平谷区为例. 生态学报, 2008, 28(10): 4957-4964.
- [18] 隋鹏飞, 郝晋珉, 李双昇, 汪景宽, 朱平. 吉林省公主岭地区土壤主要养分指标的时空变异特征. 土壤通报, 2006, 37(1): 7-12.
- [19] 刘璐, 宋同清, 曾馥平, 彭晚霞, 王克林, 覃文更, 谭卫宁. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [20] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 陈洪松, 韦国富. 桂西北喀斯特峰丛洼地土壤物理性质的时空分异及成因. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2249-2256.
- [21] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
- [22] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 张伟. 喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究. 农业工程学报, 2006, 22(8): 54-58.
- [23] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 张伟, 卢洲, 谭江明. 喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究. 水土保持学报, 2006, 20(2): 114-117, 134-134.
- [24] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探. 土壤学报, 2006, 43(4): 554-562.
- [25] 傅伟, 陈洪松, 王克林. 喀斯特坡地不同土地利用类型土壤水分差异性研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 59-62.
- [26] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区土壤水分的时空变异分析——以贵州清镇王家寨小流域为例. 地球与环境, 2008, 36(3): 193-201.
- [27] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27(4): 315-334.
- [28] Chen H S, Liu J W, Wang K L, Zhang W. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China. Catena, 2011, 84(1/2): 21-28.
- [29] Hu W, Shao M A, Han F P, Reichardt K. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land. Geoderma, 2011, 162(3/4): 260-272.
- [30] 张川, 聂云鹏, 陈洪松, 张伟, 冯腾, 王克林. 喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1225-1232.
- [31] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. 地理学报, 2000, 55(4): 428-438.
- [32] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [33] 张继光, 陈洪松, 苏以容, 张伟, 孔祥丽. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异. 生态学报, 2008, 28(12): 6334-6343.