

# 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性

刘 鹤, 赵文智\*, 何志斌, 张立杰

(中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所流域水文及应用生态实验室, 兰州 730000)

**摘要:**资源供给的时间异质性与环境异质性对植被群落动态甚至景观格局的形成有着同等重要的意义。干旱区山地生态系统植被通常具有明显的空间自组织特征, 土壤水分时间异质性可能在这种自组织格局的形成和稳定过程中扮演了重要角色。以祁连山排露沟小流域林草复合景观为例, 通过连续监测林线附近草地、灌丛及林地对应的土壤水分状况, 比较不同植被类型降水截留以及植物根系提水作用对土壤水分的影响, 发现在生长季内典型月时间尺度上草地、灌丛及林地之间土壤水分时间异质性(变异系数 CV)具有显著差异(5cm 深度,  $F_{2,27} = 11.25, P < 0.01$ ; 20cm 深度,  $F_{2,27} = 5.51, P < 0.01$ ), 草地与灌丛 5cm 深度土壤水分时间异质性(CV = 0.65, 0.61)明显高于林地(0.52), 灌丛与林地 20cm 深度土壤水分时间异质性(CV = 0.84, 0.84)明显高于草地(0.72)。灌丛 5cm 深度土壤水分具有较高的时间异质性是因为其较高的冠层截留率, 而草地表层 5cm 深度具有相对较高的时间异质性是因为强烈的土壤蒸发; 20cm 深度土壤水分时间异质性差异则主要由植被截留差异所致。不同植被类型 5cm 深度土壤水分时间异质性均明显低于 20cm 深度( $P < 0.01$ ), 土壤湿度变异系数最大值并不一定发生在表层。

**关键词:**祁连山; 降水; 植被类型; 土壤水分; 时间异质性

文章编号: 1000-0933(2008)05-2389-06 中图分类号: Q142, Q948 文献标识码: A

## Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian Mountain

LIU Hu, ZHAO Wen-Zhi\*, HE Zhi-Bin, ZHANG Li-Jie

Linze Inland River Basin Research Station, CERN, Lanzhou 730000; Hydrology and Ecology Laboratory of Watershed, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2389 ~ 2394.

**Abstract:** Temporal heterogeneity of resources supply is as important a factor as environmental heterogeneity (spatial) to vegetation dynamics and landscape evolution. Mountain ecosystems in arid and semiarid regions are frequently characterized by significant spatial self-organization, and temporal heterogeneity of soil moisture maybe an important driver factor in the vegetation pattern formation and maintenance. A series of observations and experiments were conducted near the forest boundary in Qilian Mountain to test the differences in daily variability of soil moisture between grassland, shrubland and forest habitats, and to examine the contributions of canopy interception and plant uptake to any observed differences. The results show that; daily measurements of soil moisture during a month of growing season showed strong interactions between habitat and time ( $F_{2,27} = 11.25, P < 0.01$  for 5cm depth;  $F_{2,27} = 5.51, P < 0.01$  for 20 cm). The coefficient of variation

**基金项目:**国家自然科学基金基础人才培养基金资助项目(J0630966); 国家自然科学基金资助项目(40601007)

**收稿日期:**2007-02-02; **修订日期:**2007-10-22

**作者简介:**刘鹤(1980~), 男, 兰州人, 博士, 主要从事生态水文学研究. E-mail: lhayz@lzb.ac.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowzh@ns.lzb.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by the National Fundamental Fund Project Subsidy Funds of Personnel Training (Grant No. J0630966) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40601007)

**Received date:** 2007-02-02; **Accepted date:** 2007-10-22

**Biography:** LIU Hu, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecohydrology. E-mail: lhayz@lzb.ac.cn

(CV) of soil moisture content of 5cm depth over time during the growing season was significantly higher in grassland and shrubland (0.65, 0.61) than in forest (0.52), while the CV of 20cm was significantly higher in shrubland and forest (0.84, 0.84) than in grassland (0.72). We found much more interception of rainfall in shrubs (44%) than in forest (27%) and grassland (12%), and believe that the higher interception of rainfall should be responsible for the higher temporal variability of soil moisture content of 5cm depth in shrubland, while the intense soil moisture evaporation may be the major mechanism that contributes to higher temporal variability of soil moisture content of 5cm depth in grassland. Also we find that the net effect of vegetation on soil moisture was significantly greater in grassland than in forest and shrubland, but continuing analysis suggested that water uptake ability provide little contribution to the differences of CV of soil moisture content in both 5cm and 20cm depth. Another interesting finding in this field experiment is that the CV in depth of 20cm was significantly higher than in 5cm, suggesting that the most active area of soil moisture not necessarily happened in the surface.

**Key Words:** Qilian Mountain; precipitation; vegetation types; soil moisture; temporal heterogeneity

不同植物类型对其缀块分布的影响和响应有着显著差异,所以环境异质性(空间异质性)对植物群落的影响很早就受到生态学界的广泛关注<sup>[1]</sup>。事实上不同植物种类对资源供给时间异质性的响应也存在较大差异<sup>[2]</sup>,在资源处于匮乏状态时尤其如此,但关于植物这种适应与创造时间异质性能力的报道却很少<sup>[3]</sup>。早期的研究认为不同植被土壤水分不存在显著的时间异质性<sup>[4]</sup>或具有不同土壤水分时间异质性的植被其生长形式及状况上无明显差异<sup>[5]</sup>,这些研究均是在相对比较湿润的地区进行,而植物只有在资源处于相对匮乏状态才会发生明显的响应<sup>[6]</sup>。半干旱环境中水分获得性往往呈脉动(Pulse)状态<sup>[7]</sup>,因此不同的植物种类可能会利用着不同的水分时间异质性<sup>[8]</sup>。James<sup>[6]</sup>发现北美大平原地区天然草地、灌丛与森林土壤水分时间异质性存在显著差异,草地土壤水分在时间上的变异系数明显高于森林,Jennie<sup>[9]</sup>的实验进一步证明植物不仅能适应这种土壤水分的时间异质性,而且还能创造甚至放大这种异质性。植物对土壤水分时间异质性的适应、创造和放大能力可能是景观格局塑造过程中的动力之一<sup>[3]</sup>。

我国西北干旱半干旱区山地生态系统多呈现一种以草地景观为基质、森林景观以及其它景观类型作为斑块镶嵌的、空间上具有明显自组织格局的林草复合结构<sup>[10]</sup>。作为综合气候、土壤以及植被对水分平衡的响应和水分平衡对植被动态影响的关键变量<sup>[11]</sup>,土壤水分在时间尺度上的异质性无疑在这种景观格局的形成和稳定过程中扮演了重要角色。事实上土壤水分时间异质性研究不仅是干旱区山地生态系统植被空间自组织格局研究的重要内容,也是进一步探讨其生态水文过程和效应的必要准备。不同植被类型对应的土壤水分时间异质性在大小和方向上均具有不确定性,如草地单位体积土壤中包含的植物细根长度是森林中的 20 倍<sup>[12]</sup>,草本植物吸水能力也数倍于木本植物<sup>[13]</sup>,较高的根系提水能力可能导致草地生态系统具有较高土壤水分时间异质性<sup>[14]</sup>;同时由于植物蒸腾主要受叶面积指数驱动,森林对应的叶面积指数要远大于草地,此外木本植物高大的冠幅还会导致较多的降水截留,这也可能使木本植物具有较大的土壤水分时间异质性<sup>[3]</sup>。这种不确定性表明在干旱区山地生态系统植被土壤水分时间异质性极可能具有其特殊性,但目前还很少见到有类似的研究工作报告。本文以祁连山排露沟小流域林草复合景观为例,通过连续监测林线附近草地、灌丛以及林地对应的土壤含水量,比较不同植被类型对应的冠层降水截留及根系提水作用对土壤水分的影响,试图确定祁连山浅山区 3 种不同植被类型对应的土壤水分时间异质性是否存在差异,并探讨引起这种差异的原因,为进一步开展干旱区山地植被空间自组织格局研究提供必要的信息和数据积累。

## 1 方法与材料

### 1.1 研究区概况

试验区位于祁连山中段西水林区排露沟流域,坐标 100°17'E, 38°34'N,年平均气温 0.7℃,平均温度 7 月份最高 12.2℃,1 月份最低 -12.9℃;年降水量 433.6 mm;年蒸发量 1081.7mm;年均相对湿度 60%;年日照时

数 1892.6 h; 日辐射总量  $110.28 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。研究区内建群种青海云杉呈斑块状分布在海拔 2400 ~ 3300 m 的阴坡和半阴坡地带, 与阳坡草场相互交错在一起; 祁连圆柏 (*Sabina przewalskii*) 呈小块状分布于阳坡、半阳坡; 灌木优势种有金露梅 (*Dasiphora fruticosa*), 箭叶锦鸡儿 (*Caragana jubata*)、吉拉柳 (*Salix gilashanica*) 等。阴坡草地主要分布珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、黑穗苔 (*Carex atrata*) 和针茅 (*Stipa*) 等, 阳坡草地主要分布红砂 (*Reaumuria soongorica*)、合头草 (*Sympegma regelii*)、驼绒藜 (*Ceratoides latens*) 和芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 等。土壤类型在阴坡水源涵养林和林旁草地为森林灰褐土, 阳坡草地为山地草原栗钙土。

## 1.2 样地布设及样地信息

在实验区阴坡林下线附近选择选择 3 个毗邻的草地、灌丛、乔木林分布样带, 带长约 200m, 乔木林内样地位于林线上约 15 ~ 20m 范围, 灌丛林与草地内样地在林线下 10 ~ 30m 范围内。沿林线方向根据草本植物长势、灌木盖度及乔木郁闭度在各样带内分别布设 10 个  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$  的固定监测样方, 为保持各样方内降水与土壤类型基本一致, 样地布设相对比较集中。各样带土壤类型均为山地栗钙土, 各带内物种分布基本一致, 草地样带内主要分布珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、苔草 (*Carex*)、鲜马蔺 (*Iris ensata* Thunb)、针茅 (*Stipa*)、蒿草 (*Artemisia*)、棘豆 (*Oxytropis*) 等; 灌丛样带内主要分布金露梅 (*Potentilla fruticosa*); 乔木林样带内主要分布青海云杉 (*Picea crassifolia*), 林下伴有零星苔藓分布。在草地样内随机选择  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$  的样方 3 块, 使用除草剂清除地表植物用作对比裸地。

## 1.3 土壤水分测定及数据处理

使用便携式 TRIME-TDR (德国) 在各样方中心 15cm 范围内每日 10:00 ~ 11:30 按草地-灌丛-林地-裸地的固定顺序依次测量 5cm 及 20cm 土壤水分, 3 次重复取其均值, 持续时间: 2006 年 7 月 1 ~ 8 月 1 日。期间若发生降水事件, 观测时间则推迟到降水后 1h, 若全天降水则免测当日土壤水分。为了尽可能避免空间变异性对土壤水分时间异质性的干扰, 将实测的土壤体积含水量折算为相对含水量: 相对含水量 = (实测值 - 样带内实测到的最小值) / (样带内实测最大值 - 样带内实测最小值), 各样带内土壤水分观测数据分层逐日求取均值代表样带内当日土壤相对含水量的真实水平。土壤水分时间变异性用变异系数 CV 表示 (CV 为一相对值, 表样本标准差相对于平均值的偏离程度, 与尺度无关)<sup>[15, 16]</sup>, 对不同植被类型对应的相对土壤含水量计算其变异系数。

## 1.4 降水量及穿透量测定对比

在草地样带内选择空旷处随机布设 3 个齐口塑料杯 ( $\phi = 6 \text{ cm}$ ,  $h = 10 \text{ cm}$ ) 和 1 个标准雨量筒 ( $\phi = 20 \text{ cm}$ ,  $h = 60 \text{ cm}$ )。塑料杯置于地面 60cm 高处, 杯口与带内布设的标准雨量桶口高度一致, 用来测量降水, 雨量桶用来校准塑料杯测量数据。30 个固定样方中分别布埋设 1 个相同规格的塑料杯, 杯口高出地面 1cm, 用来测量各样方内植被截留后的降水穿透量。样方在选择和布设过程中充分考虑了植被盖度对截留量的影响, 埋设塑料杯的样地中植被盖度有疏有密, 不同盖度或郁闭度的植被均有对应的植被截留数据。为了获得足够多的数据, 降水穿透观测共持续了 2 月 (2006 年 7 月 1 日 ~ 9 月 1 日), 期间共记录到 34 次降水事件。使用协方差分析方法 (ANCOVA) 检验不同植被对应的降水截留有无显著差异。

## 1.5 不同类型植被根系提水作用对土壤水分的影响

裸地土壤水分只受土壤蒸发与降水的影响, 而植被覆盖样地内除土壤蒸发与降水外, 还受植物蒸腾的影响。植物虽然可能通过遮荫、减缓风速等方式减少土壤蒸发, 但同时也可能通过冠层截留减少土壤水分降水补给, 考虑到生长季内植物蒸腾较强烈, 而本试验的主要目的也只是用来检验其生态效应, 所以文中假设两种作用对土壤水分的影响可以相互抵消, 裸地土壤水分与植被覆盖的样地内土壤水分之间的差异一定程度上代表了植物根系提水作用对土壤水分的影响差异<sup>[6]</sup>, 将 3 个裸地样方每日测量土壤含水量数据取均值作为当日无植被条件下土壤含水量, 并结合逐日降水量与其他样带内土壤含水量, 通过协方差分析 (ANCOVA) 检验不同植被类型根系提水能力有无显著差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤水分时间异质性

祁连山浅山区降水主要发生在 5~10 月生长季内,期间降水事件发生频度高但强度却小,土壤水分观测期处于 2006 年 7 月 1 日~8 月 1 日之间,为该地区生长季中间月份,降水分布在生长季内具有代表性(图 1)。调查结果表明该地区内草本植物 80% 以上的根系集中分布在表层 0~20cm,灌木与林地根系也主要分布在 0~40cm 以内,表层 5cm 与 20cm 的土壤湿度对不同植被类型具有一定代表性。不同生境中土壤相对含水量随时间变化显著( $P < 0.01$ ),不同植被类型之间 5cm 及 20cm 深度土壤相对含水量无显著差异( $P > 0.05$ ),但土壤水分时间异质性差异显著(5cm 深度,  $F_{2,27} = 11.25$ ,  $P < 0.01$ ; 20cm 深度  $F_{2,27} = 5.51$ ,  $P < 0.01$ )。草地与灌丛 5cm 深度土壤水分时间异质性(CV = 0.65、0.61)明显高于林地(0.52),灌丛与林地 20cm 深度土壤水分时间异质性(CV = 0.84、0.84)明显大于草地(0.72)。不同植被类型 5cm 深度土壤水分时间异质性均明显低于 20cm 深度( $P < 0.01$ )(图 2)。可见祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性在生长季内典型月尺度上具有显著差异,该结论与 James 等<sup>[6]</sup>在北美大平原地区的研究结果一致,而与 Mitchell 等<sup>[5]</sup>在美国阿拉巴马地区得出的结论(草本植物与木本植物对土壤水分时间异质性无显著的影响)及 Farley 等<sup>[4]</sup>在英国的研究结果(具有不同土壤水分时间异质性的植被其生长形式及状况上无明显差异)相悖。James 认为 Mitchell 与 Farley 的研究<sup>[4,5]</sup>均在湿润地区进行,相对较高的水分获得性可能削弱了植物对土壤水分时间异质性影响,而植物对资源异质性的影响在资源供给短缺的环境中才能体现出来<sup>[6]</sup>。本文试验结果在 James 等<sup>[6]</sup>的基础上进一步证明在水分限制环境中,不同植被类型对应的土壤水分存在较为明显的时间异质性。

### 3.2 植被截留与根系提水作用对土壤水分时间异质性的影响

Knapp 的研究认为在全球尺度上草地生态系统对应的降水年际变异性要高于森林,草本植物很可能选择利用着较高的时间异质性<sup>[16]</sup>,James<sup>[6]</sup>等在北美大平原地区的研究结果也表明该地区生长季草地 10cm 及 30cm 深度土壤水分时间异质性均大于灌丛与林地,时间异质性差别主要源于植物根系提水能力方面的差异,而不同植被类型在对降水的截留上无统计差异。对祁连山浅

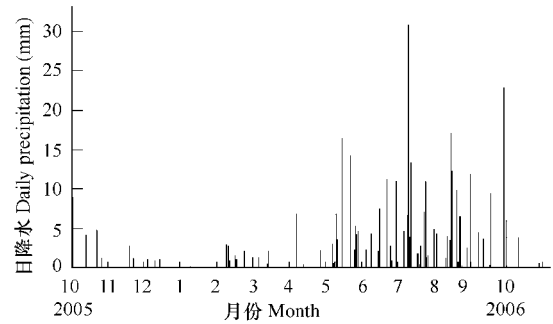


图 1 2005 年 10 月~2006 年 10 月降水分布情况  
Fig. 1 Temporal distribution of precipitation events during 13 months (Oct 2005—Oct 2006)

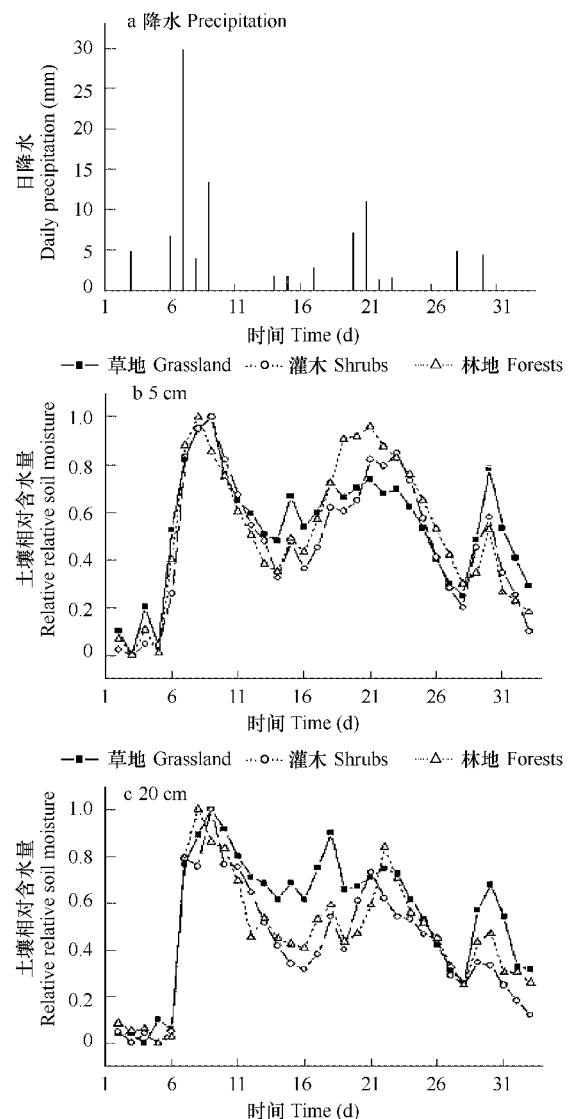


图 2 研究区降水及草地、灌丛和林地内 5cm 与 20cm 深度土壤水分变化  
Fig. 2 Precipitation (a) and relative soil moisture content under grassland, shrubs and forest, 5cm (b) and 20 cm (c) below the soil surface

山区不同植被类型土壤水分时间异质性分析结果表明:不同植被类型降水穿透与降水量均呈较好的线性关系,草地与林地对应的回归直线接近 1:1 线,灌丛对应的回归直线离 1:1 线较远(图 3),不同植被类型对应的回归直线斜率之间差异显著( $P < 0.01$ ),既不同植被类型冠层对降水的截留存在显著差异,灌木冠层降水截留率约为 44%,远大于草地(12%)或林地(27%),较高的冠层截留率是灌丛 5cm 深度土壤水分具有较高时间异质性的主要原因。灌丛、林地与裸地 5cm 及 20cm 深度土壤相对含水量回归直线斜率之间均无显著差异( $P > 0.05$ ),表明灌木与乔木根系提水作用对 5cm 与 20cm 深度土壤水分影响接近;草地 5cm 深度对应的回归直线斜率显著小于灌丛和林地( $P < 0.01$ ),这可能是因为草地表层土壤蒸发强烈,与灌丛及林地相比,土壤水分状况较好时草地 5cm 深度土壤蒸发远大于灌丛和林地,导致其较高的土壤水分时间异质性;20cm 深度对应的回归直线斜率又显著大于灌丛与林地( $P < 0.01$ )(图 4),这可能是因为草本植物 80% 以上根系分布于 0 ~ 20cm 的表层土壤<sup>[17]</sup>,土壤水分状况较差时草本植物根系提水作用对该层土壤水分的影响要高于灌木和乔木。可见控制草地不同深度土壤水分时间异质性(生长季内典型月尺度)的主要过程并不完全相同。

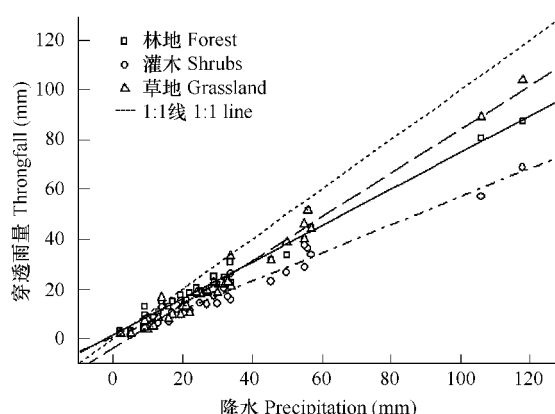


图 3 不同植被条件下的降水与穿透关系

Fig. 3 The relationship between throughfall and precipitation in grassland, shrubs and forest

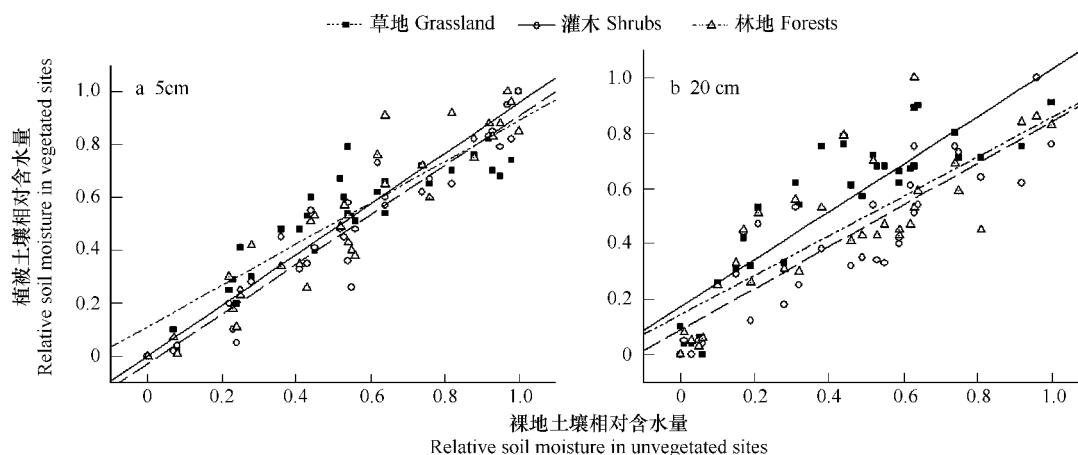


图 4 不同植被类型 5cm (a) 与 20cm (b) 深度土壤相对含水量与裸地土壤相对含水量相关关系

Fig. 4 The relationship between soil moisture content in vegetated and unvegetated plots in grassland, shrubs and forest 5cm (a) and 20cm (b) below the soil surface

### 2.3 土壤水分垂直异质性

植物蒸腾及土壤蒸发均依赖于土壤水分状况,由于降水脉动强度、不同植被根系分布深度及土壤质地的差异,不同植被类型对应土壤水分时间异质性在垂向上也会有所区别,这种垂向上的差异可能深刻影响和决定着干旱生态系统降水入渗、拦蓄、径流等水力再分布的过程<sup>[18]</sup>。祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性实验结果表明:在草地、灌丛、林地 3 种植被条件 20cm 深度土壤相对含水量变异系数均高于 5cm 深度。在该地区进行的另一项长期观测实验中也得到了类似的结果:无论是丰水年还是枯水年,土壤湿度变异系数最大值并不一定发生在表层,最大值发生的深度在不同的水文年份各有差异<sup>[19]</sup>。这可能是土壤对生长季内降水脉动信息在垂直方向上进行再分布的结果<sup>[18]</sup>。

### 3 结论

通过连续监测祁连山排露沟小流域内林线附近草地、灌丛以及林地 5cm 与 20cm 深度土壤含水量,比较不同植被类型冠层降水截留以及根系提水能力情况,发现生长季内典型月时间尺度上不同植被类型对应的土壤水分时间异质性(变异系数)具有显著差异(5cm 深度,  $F_{2,27} = 11.25, P < 0.01$ ; 20cm 深度  $F_{2,27} = 5.51, P < 0.01$ ), 草地与灌丛 5cm 深度土壤水分时间异质性(CV = 0.65、0.61)明显高于林地(0.52), 灌丛与林地 20cm 深度土壤水分时间异质性(CV = 0.84、0.84)又明显大于草地(0.72)。灌丛 5cm 深度土壤水分具有较高的时间异质性是因为其较高的截留率,而草地表层 5cm 深度具有相对较高的时间异质性是因为强烈的土壤蒸发; 20cm 深度土壤水分时间异质性差异则主要由植被截留差异所致。不同植被类型 5cm 深度土壤水分时间异质性均明显低于 20cm 深度( $P < 0.01$ ), 土壤湿度变异系数最大值并不发生在表层。以上结论均是基于生长季内典型月尺度上的连续观测数据得到,而土壤水分时间异质性的研究基于多年连续观测分析得出的结论才更为可靠,目前这项试验仍在继续,本文中的结论在更长时间尺度上的正确性有待进一步的检验。

### References:

- [1] Hutchings M J, John E A, Stewart A J A, *et al.* The Ecological Consequences of Environmental Heterogeneity. London: Blackwell Science, 2000.
- [2] Grime J P. The role of plasticity in exploiting environmental heterogeneity. In: M. M. Caldwell and R. W. Pearcy, eds. Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants, Academic Press: San Diego, 1994.
- [3] Wilson S D. Heterogeneity, diversity, and scale in plant communities. In: M. J. Hutchings, E. A. John, and A. J. Stewart, eds. Ecological Consequences of Habitat Heterogeneity. Blackwell Science: Oxford, 2000.
- [4] Farley R A, Fitter A H. Temporal and spatial variation in soil resources in a deciduous woodland. *Journal of Ecology*, 1999, 87: 688—696.
- [5] Mitchell R J, Zutter B R, Green T H. *et al.* Spatial and temporal variation in competitive effects on soil moisture and pine response. *Ecological Applications*, 1993(3): 167—174.
- [6] James S E, Partel M, Wilson S D, *et al.* Temporal heterogeneity of soil moisture in grassland and forest. *Journal of Ecology*, 2003, 91(2): 234—239.
- [7] Sala O E, Lauenroth W K. Small rainfall events: an ecological role in semiarid regions. *Oecologia*, 1982, 53: 301—304.
- [8] Goldberg D, Novoplansky A. On the relative importance of competition in unproductive environments. *Journal of Ecology*, 1997, 85: 409—418.
- [9] McLaren J R, Wilson S D, Peltzer D A. Plant feedbacks increase the temporal heterogeneity of soil moisture. *OIKOS*, 2004, 107: 199—205.
- [10] Gaylor K K, 'Odorico P D, Rodriguez-Iturbe I. On the ecohydrology of structurally heterogeneous semiarid landscapes. *Water Resources Research*, 2006, 42(7): W07424.
- [11] Neilson R P. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Application*, 1995, 5(2): 362—385.
- [12] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 1997. 94: 7362—7366.
- [13] Köchy M, Wilson S D. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie. *Ecology*, 1997. 78: 732—739.
- [14] Köchy M, Wilson S D. Competitive effects of shrubs and grasses in prairie. *Oikos*, 2000, 91: 385—395.
- [15] Kleb H R, Wilson S D. Vegetation Effects on Soil Resource Heterogeneity in Prairie and Forest. *The American Naturalist*, 1997, 150(3): 283—298.
- [16] Knapp A K, Smith M D. Variation between biomes in temporal dynamics of aboveground primary productivity. *Science*, 2001, 291: 481—484.
- [17] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A. Intensive or extensive use of soil moisture: plant strategies to cope with stochastic water availability. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(23): 4495—4497.
- [18] Michael E L, Breshears D D, Lauenroth W K, *et al.* A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia*, 2004. 141(2): 269—281.
- [19] Liu H, Zhao W Z, He Z B, *et al.* Stochastic Modelling of Soil Moisture Dynamics in a grassland of Qilian Mountain at point scale. *Science in China, Series D*, 2007, 50(12): 1844—1856.