

黄土丘陵区不同植被土壤水分的分异性特征

刘庚¹, 牛俊杰¹, 朱炜歆¹, 史建伟², 梁海斌²

(1. 太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心, 山西 太原 030012; 2. 山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 为定量研究半干旱黄土丘陵区不同植被深层土壤水分的时空分异性特征, 选择晋西北岢岚县为目标研究区域, 对撂荒地、柠条林、小叶杨林 3 种林型 4—7 月份 0—600 cm 深度剖面土壤水分的时空异质性特征进行了分析。研究表明: (1) 3 种植被 4 个月份内土壤含水量变化范围在 3.34%~17.19% 之间。在 0—200 cm 深度土壤含水量变化没有明显规律, 在 200—600 cm 深度土层范围内, 撂荒地、柠条林土壤含水量分别有升高和轻缓降低趋势, 小叶杨林有先轻缓降低再轻缓升高趋势。(2) 土壤含水量在 4 个月份间均存在显著性差异($p < 0.01$), 不同月份不同植被类型土壤含水量总体分布差异性也都不同。(3) 土壤含水量变异系数值大多集中在 0~30% 之间, 个别土层深度变异系数值超过 50%, 表明土壤水含量总体上具有结构稳定性, 但存在局部较强变异特征。

关键词: 土壤水分; 黄土丘陵区; 空间异质性; 生态重建

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0083-06

中图分类号: S153

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.023

Heterogeneous Characteristics of Soil Moisture of Different Vegetation Types in Loess Hilly Regions

LIU Geng¹, NIU Jun-jie¹, ZHU Wei-xin¹, SHI Jian-wei², LIANG Hai-bin²

(1. *Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Taiyuan, Shanxi 030012, China*; 2. *Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China*)

Abstract: The spatio-temporal heterogeneity of soil moisture in Kelan County, Northwestern Shanxi Province was studied in wasteland, *Caragana korshinskii* forest land and *Populus simonii* forest land. The soil moisture was determined for the 0—600 cm profile in April, May, June and July. Results showed that: (1) Soil moisture changed between 3.34%~17.19% with irregular variation in the layer of 0—200 cm; However, as the soil depth increased from 200 to 600 cm, the soil moisture of wasteland was increasing, the soil moisture of *Caragana korshinskii* forest land was decreasing gently and the soil moisture of *Populus simonii* forest land decreased at first and then increased gently, respectively. (2) The profile distribution of soil moisture had a significant difference($p < 0.01$) within different months and different land use types. (3) The variation coefficient of soil moisture was usually in the range of 0~30%, but some individual values are over 50%, suggesting that the structure of soil moisture presented overall stability except special points.

Keywords: soil moisture; loess hilly region; spatial heterogeneity; ecological reconstruction

土壤水分是植被生态系统生物过程中重要环境因子^[1], 在陆地水循环以及陆地—大气交互作用中具有重要功能^[2], 对半干旱区域土壤表层水和降水之间有很强的耦合作用^[3]。在半干旱黄土丘陵区, 土壤水是植被生长需水的最主要来源, 是限制植被类型、植被生长和分布的主要影响因素, 尤其该地区人工植被的生长, 对深层土壤水分的依赖更为强烈^[4]。深层土

壤水分的垂向分布特征对植被的根系分布和正常生长有重要影响, 是该区域人工植被生长和生态系统健康的重要水分来源^[5]。在半干旱黄土丘陵区生态重建过程中, 由于植被类型选择不当或生态重建缺乏科学指导, 导致深层土壤水分过度消耗, 出现利用性土壤干层的现象^[6], 对深层土壤水分产生了严重的威胁, 深层土壤干化现象成为区域性极为严峻的生态环

收稿日期: 2014-01-03

修回日期: 2014-03-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“晋西北生态重建优势种林地土壤水分研究: 以沙棘和柠条为例”(41171423), “顾及污染物向异性特征的土壤有机污染物三维空间分布预测方法研究”(41401236)

作者简介: 刘庚(1981—), 男(汉族), 山东省微山县人, 博士, 讲师, 主要从事土壤信息技术方面的研究。E-mail: liugeng9696@126.com。

通信作者: 牛俊杰(1968—), 男(汉族), 山西省岚县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事自然地理与区域环境研究。E-mail: junjieniu@fox-mail.com。

境问题^[7-9],因此在半干旱黄土丘陵区进行科学合理的植被建设,必须要查清实际的土壤水分状况。土壤水具有高度的时空异质性^[10-11],其在空间分布上具有结构性和随机性并存的特征,对不同尺度下土壤水分空间变异规律揭示是目前土壤水分研究中一个热点问题^[12]。在不同的空间尺度上,土壤水分异质性的影响因子有所不同^[13],分析土壤水分的时空分异性特征对半干旱黄土丘陵区生态重建以及植被合理配置具有重要作用。目前,国内外关于土壤水分的空间异质性已展开了相应的研究^[14-18],国内也从不同植被类型、空间尺度效应、空间变异分析方法、环境因子影响等方面^[19-24]对土壤水分的空间异质性进行了阐述,已有的研究虽然从多个方面分析了土壤水分空间变异,但对于半干旱黄土丘陵区多种植被类型、不同季节阶段、深层土壤水分的时空分异性特征研究还鲜有报道,比较不同植被下深层土壤水分时间、空间尺度上的分布规律和异质性特征,对指导该地区生态保护和生态重建具有重要作用。本研究以地处晋西北的岢岚县为目标研究区域,选择土壤水分大量失墒期的 4—7 月份进行土壤样品采集,对撂荒地、柠条林和小叶杨林 3 种类型 0—600 cm 深度剖面土壤水分在该时间阶段上的时空分异性特征进行研究,以期在当地的人工植被建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点选择在晋西北半干旱黄土丘陵区的岢岚县高家会乡羊圈会村,海拔高度为 1 440 m。岢岚县位于晋西北的黄土高原中部,管涔山西北麓,属于中温带大陆性季风气候,年平均气温为 6 °C,年平均无霜期为 120 d,年平均降水量为 456 mm,降雨多集中在 7—9 月份,降水区域分布很不均匀,平均而言,随海拔增高降水量增大,山区降水多于平川,南部山区多于北部山区。降雨季节不均匀,夏季最多,占全年的 60%,冬季最少,只有 3%。年际变化也很大,降水量多的年份和最少年份相差 2~3 倍。境内主要土类有灰褐土、棕壤、山地草甸土和草甸土,有机质含量总体水平不高,土壤贫瘠。该县东南、南和西南植被较好,北部较差。乔木主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柳树(*Salix matsudana*)等,灌木林主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)等,林草覆盖率约为 18%,生态环境问题较为严峻。

1.2 土样采集与分析

根据研究区人工植被和自然植被的现状、种类和分布特征,选择在该县具有代表性的柠条林、小叶杨林以及撂荒地作为研究对象,柠条林和小叶杨林于 1968—1970 年栽种,撂荒地表层覆盖有稀疏荒草。采样时间在 2013 年 4—7 月份中每个月的 22—26 号,采样时间内无明显降雨,土壤水分的变化不大。每种植被样地选 3 个点进行重复采样,撂荒地样地样方大小为 2 m×2 m,其它两种植被的样方大小为 10 m×10 m。采用土钻取土法,从地表向下垂直每隔 10 cm 采集 1 次样品,将采集好的样品装入铝盒内并用胶带密封。在实验室内采用烘干法进行土壤水分含量测定,在 105 °C 高温条件下,连续烘干 24 h,达到恒重后称重,依据公式计算。将样地中每层 3 次采样所测定出土壤含水量的平均值作为该层深度的土壤含水量。

1.3 数据分析方法

采用描述性统计分析、单因素方差分析、多因素交互分析、变异系数法等方法学来对研究区域不同植被类型土壤水分的时空异质性进行分析。数据的统计分析计算在软件 SPSS 16.0 内完成,制图在软件 OriginPro 8.0 内完成。

2 结果与分析

2.1 不同植被土壤水分数据的描述性统计分析

不同植被类型在不同月份土壤含水量数据的描述性统计分析结果详见表 1,土壤水分含量最小值范围在 3.34%~8.66%,最大值范围在 11.02%~30.09%,平均值范围在 8.02%~14.46%,变异系数范围在 0.12~0.25。同一种植被在不同月份以及相同月份不同植被类型的土壤水分含量数据描述性统计指标差异明显。对同一种植被不同月份来看,撂荒地土壤含水量最小值为 5 月,其次是 4 月>6 月>7 月;最大值为 4 和 6 月,其次是 5 和 7 月,变异系数表现为:5 月>6 月>4 月>7 月;柠条林土壤含水量最小值为 5 月,其次为 6 月>4 月>7 月;最大值为 7 月,其次为 6 月>4 月>5 月;变异系数为 7 月>6 月>5 月>4 月;小叶杨林土壤水分含量数据最小值同样出现在 5 月,其次为 4 月>7 月>6 月;最大值为 7 月,其次为 4 月>5 月>6 月;变异系数表现为:5 月>7 月>6 月>4 月。从水分含量数据极差的分析结果来看,撂荒地不同月份的最小值明显都高于其它两种植被类型。最大值为 7 月份的柠条林,撂荒地和其它 3 个月份的最大值均大于柠条林和小叶杨林。

不同植被类型不同月份土壤水分含量数据的变异系数数值均未超过 30%，表明土壤水分含量数据不具有较大的空间离散特性。统计结果中中值和均值较为

接近,除 5 月份柠条林、7 月份撂荒地的峰度值较大外,其它偏度和峰度值均较小,说明数据符合正态或近似正态分布特征。

表 1 不同植被土壤水分含量数据的描述性统计分析

植被类型	月份	最小值/%	最大值/%	均值/%	中值/%	标准差/%	偏度	峰度	变异系数
撂荒地	4 月	8.66	17.19	13.26	13.87	2.34	-0.49	-1.05	0.18
	5 月	4.01	16.64	12.96	13.52	2.90	-1.13	1.24	0.22
	6 月	8.00	17.19	13.73	14.91	2.58	-0.79	-0.73	0.19
	7 月	7.76	16.40	14.46	14.85	1.75	-2.23	5.86	0.12
柠条林	4 月	6.83	13.35	9.57	9.47	1.28	0.41	0.66	0.13
	5 月	3.34	11.02	9.16	9.29	1.36	-2.2	7.07	0.15
	6 月	7.23	16.02	10.01	10.03	1.78	1.25	2.49	0.18
	7 月	6.73	16.61	10.03	9.07	2.42	1.06	0.12	0.24
小叶杨林	4 月	7.19	12.64	9.38	9.04	1.38	0.65	-0.49	0.15
	5 月	3.75	11.84	8.02	8.43	2.03	-0.23	-0.79	0.25
	6 月	5.30	11.49	8.69	8.65	1.53	-0.37	-0.28	0.18
	7 月	6.19	16.24	10.07	9.71	2.18	0.88	0.74	0.22

2.2 不同植被土壤水分垂向分布的时空异质性

3 种植被 4 个月份内在 0—600 cm 土层深度内土壤含水量如图 1 所示。3 种植被 4 个月份内土壤含水量变化范围在 3.34%~17.19% 之间。本次采样时间在 4—7 月内,该时间阶段正处于晋西北春末夏初季节,温度逐渐升高,野外采样前研究区内无有效降

水,因此表层土壤水分蒸发较为强烈,受此因素影响,3 种植被在 0—100 cm 土层范围内的含水量没有为最大值。对同一月份不同植被类型来看,200 cm 分别为 4,5 和 6 月以及 100 cm 为 7 月土壤含水量的交叉点,在交叉点的深度下层,撂荒地的含水量明显高于其它两种植被,柠条林略高于小叶杨林。

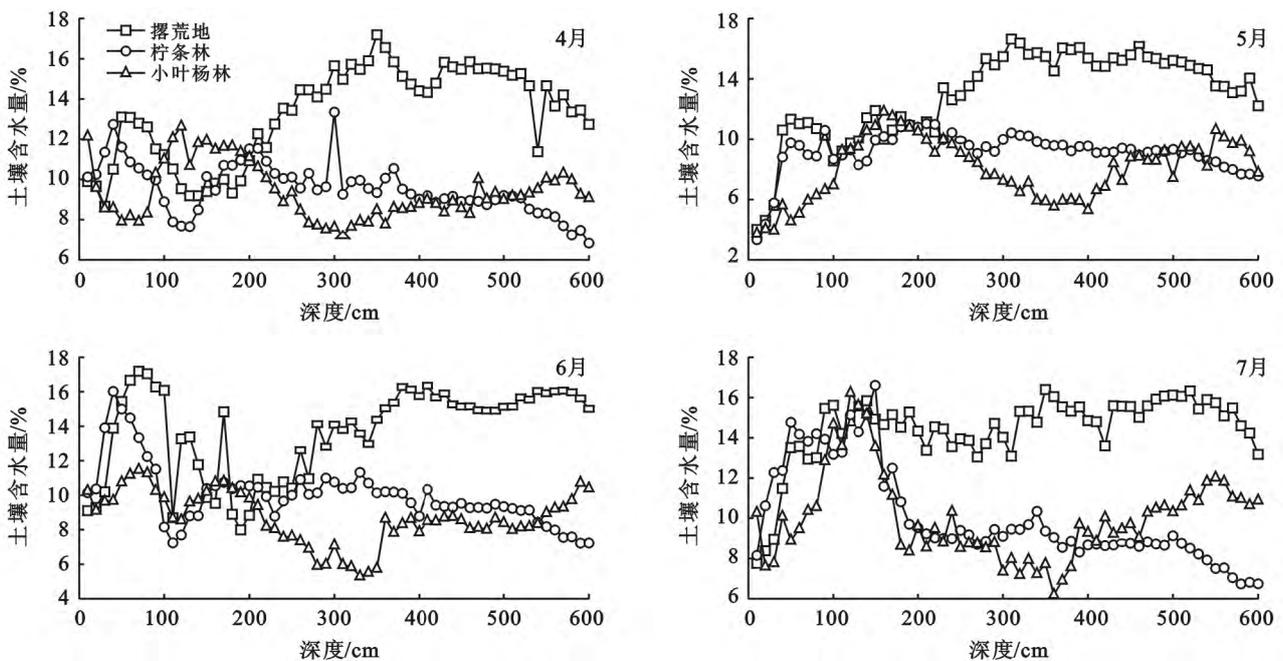


图 1 不同植被类型土壤在不同月份的水分状况

撂荒地在 4 个月份内的含水量近似表现为先升高后降低再升高的趋势,其中在 0—100 cm 土层深度范围内升高,100—200 cm 土层范围内降低,200—

600 cm 土层范围内再升高。由于撂荒地表层仅有稀疏荒草覆盖,表层土壤水分蒸发较为强烈,所以表层含水量在 0—100 cm 内为升高。由于稀疏荒草根系

浅,对土壤水分的吸收或者干扰较小,可以看出,100—200 cm 为承上启下土层,在大概 200 cm 达到最低值后,土壤含水量又继续升高,4 和 6 月份在 100—200 cm 深度内降低趋势变化较大,而 5 和 7 月份在该深度内降低较为轻缓。柠条林在 4 个月份内的变化没有呈现出明显的规律性,在 4 月份表现为 0—100 cm 范围内先降低,100—200 cm 范围内升高,200—600 cm 范围内轻缓降低,5 月份为 0—200 cm 深度内先升高,200—600 cm 范围内轻缓降低,6 月份为 0—100 cm 范围内先降低,100—200 cm 范围内升高,200—600 cm 范围内轻缓降低,7 月份表现为 0—100 cm 范围内先升高,迅速降到 200 cm 后再轻缓降低,总体上来看,5 和 7 月在 0—100 cm 范围内先升高,4 和 6 月份在 0—100 cm 内先降低,浅层土壤含水量受季节以及外界环境影响因素较大,没有明显的规律。柠条的根系主要分布在 0—200 cm 范围内,对 200 cm 深度土层需水量较大,200—600 cm 范围内均出现了轻缓降低的趋势。小叶杨林在 4 和 6 月 0—100 cm 范围内降低,5 和 7 月 0—100 cm 范围内升高,除 7 月 100—200 cm 范围内降低,其它规律均表现为 100—200 cm 内升高,200—400 cm 内降低,400—600 cm 范围内再轻缓升高,与撂荒地及柠条林对比来看,浅层土壤水分受季节和环境影响因素没有明显规律外,对于深层土壤 200—600 cm 范围内,土壤含水量大小和变化规律受时间和植被类型影响较大。

2.3 不同植被土壤含水量的差异性分析

上述分析可知,3 种植被类型土壤水分含量呈现出较大的时空异质性特征,为进一步揭示不同植被类型土壤水分含量的相关性和差异性,对 3 种植被的土壤水分含量数据做单因素方差分析和双因素交互作用分析。柠条林、撂荒地和 小叶杨林在 4—7 月份间的土壤含水量变化规律趋势并不一致,小叶杨林土壤含水量的变化幅度差异更为明显,3 种植被不同月份土壤含水量比较如图 2 所示($p=0.05$),小叶杨林土壤含水量的月变化幅度要明显高于柠条林和撂荒地,柠条林土壤含水量在不同月份之间变化最小,在 6 和 7 月份之间几乎没有变化。

通过对不同月份下各植被类型土壤含水量进行单因素方差分析结果可以发现,各植被类型土壤含水量在各月份之间都存在显著差异($p<0.01$),在此基础上,对各月份各植被类型土壤含水量进行多重比较,比较结果发现撂荒地和其他两种植被类型的土壤含水量均存在显著差异($p<0.05$),但不同月份之间不同植被类型之间的显著性差异略有不同,由各月份

不同植被类型各土层土壤含水量总体分布情况可以看出,不同植被在不同月份间存在异常高值或低值的情况。4 月份柠条林和小叶杨林土壤含水量差别不显著,5—7 月份间土壤含水量均呈现出显著差异,这可能是柠条林和小叶杨林在不同月份生长对水分需求量的差异造成的。通过对月份和植被类型这两个土壤含水量的显著因素进行双因素交互作用分析,发现各植被类型土壤含水量在各月份之间的显著差异不存在交互作用,说明随着时间的变化各植被类型的土壤含水量会发生显著变化,但不会对不同植被类型土壤含水量的差异性造成显著影响。

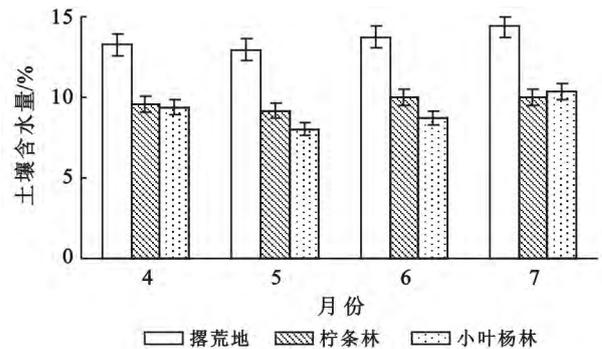


图 2 不同植被类型的土壤在不同月份中含水量比较

2.4 不同植被土壤水分含量分布的变异特征

土壤水分的转化或赋存受多种因素影响,包括植被类型、不同月份降水量、植被根系生长深度以及土壤质地结构等,因此有必要揭示土壤含水量在空间上的变异特征,采用变异系数反映不同植被含水量的空间变异情况。变异系数值越大,表示土壤含水量具有越大的空间离散特征,反之表示土壤含水量结构越稳定,根据已有研究结论,变异系数 $\leq 10\%$ 属于弱变异性,10% $<$ 变异系数 $< 100\%$ 属于中等变异性,变异系数 $\geq 100\%$ 属于强变异性。不同植被在 0—600 cm 范围内每层的变异系数值如图 3 所示。从图 3 可以看出,3 种植被在不同月份的变异系数值随深度变化总体上表现为先升高后降低再升高的趋势,但个别土层深度内变异系数值差异明显。4 个月份的土壤含水量变异系数值在 0.73%~62.24% 范围内,除部分深度土层内的变异系数值超过 40% 外,其它绝大多数土层的变异系数值在 30% 以内,表明土壤含水量在总体分布上具有较大的稳定性,但存在局部很强的离散特性。4 月份变异系数值最小为 280 cm 深度土层的撂荒地,其值为 0.73%,最大值为 10 cm 土层深度的小叶杨林,其值为 34.28%;5 月份变异系数值最小为 270 cm 土层深度的撂荒地,其值为 1.73%,最大值为 200 cm 深度土层的撂荒地,其值为 43.02%;6 月

份变异系数最小值为 280 cm 土层深度的小叶杨林, 其值为 2.67%, 最大值为 170 cm 深度土层的撂荒地, 其值为 62.24%; 7 月份变异系数最小值为 130 cm 深度土层的小叶杨林, 其值为 1.71%, 最大值为 240 cm 深度的撂荒地, 其值为 45.45%。从变异系数值随土层深度变化情况来看, 对于 3 种植被在 4 个月份中, 变异系数值在 100—300 cm 土层内的变化最大, 且变

异系数高值部分也大多出现在该范围土层内, 这与含水量在该土层范围内的分布有一定联系, 撂荒地、柠条林和小叶杨林在该土层范围内含水量呈现不同的降低或者升高趋势, 表明土壤含水量与植被生长需水量、植被根系生长深度以及环境变化等存在密切关系, 从变异系数值上来看, 变异系数在该土层深度的变化也最为剧烈。

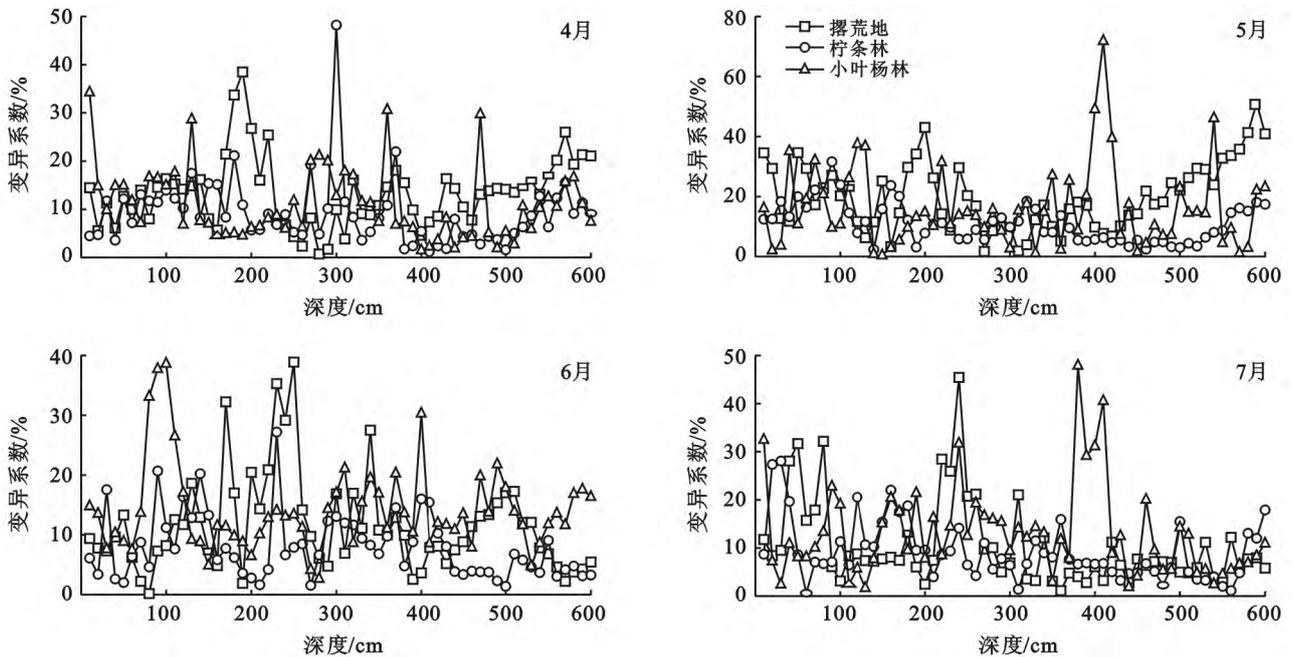


图 3 不同植被土壤含水量变异系数变化

3 结论

(1) 3 种植被浅层土壤(0—100 cm)剖面土壤水分含量在 4 个月份内表现出较强的时空异质性特征, 受植被根系深度以及生长需水量的影响, 柠条林和小叶杨林在 200—600 cm 土层深度范围内含水量有明显的趋势效应, 且植被生长需水大于撂荒地, 在 200 cm 深度以下, 撂荒地剖面含水量高于柠条林和小叶杨林。

(2) 小叶杨林土壤含水量月变化幅度高于另外两种植被, 单因素方差分析和双因素交互分析显示不同植被类型在不同月份以及其相互之间均存在一定差异性, 表明不同植被类型土壤含水量随时间变化具有相应的变化响应。

(3) 不同深度土壤水分含量的变异系数值分布上具有较大的稳定性, 变异系数值主要集中在 0~30% 范围内, 总体变化趋势为先升高后降低再升高, 个别深度土层内的变异系数值超过 50%, 具有局部较强离散特征。

[参 考 文 献]

- [1] Legates D R, Mahmood R, Levina D F, et al. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography[J]. Progress in Physical Geography, 2011, 35(1): 65-86.
- [2] Montzka C, Moradkhani H, Weihermüller L, et al. Hydraulic parameter estimation by remotely-sensed top soil moisture observations with the particle filter[J]. Journal of hydrology, 2011, 399(3): 410-421.
- [3] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation[J]. Science, 2004, 305(5687): 1138-1140.
- [4] Chen Hongsong, Shao Mingan, Li Yuyuan. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008, 143(1): 91-100.
- [5] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区深层土壤水分空间变异及其影响因子[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 355-362.
- [6] 王晗生. 旱区经营人工植被对土壤干化过程的调控[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 562-577.
- [7] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 71-82.

- [8] 赵景波, 孙桂贞, 岳应利, 等. 关中平原人工林地的干层及其成因[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 763-772.
- [9] 牛俊杰, 赵景波, 王尚义. 汾河流域上游人工林地深层土壤干燥化探讨[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 773-781.
- [10] Martinez C, Hancock G R, Kalma J D, et al. Spatio-temporal distribution of near-surface and root zone soil moisture at the catchment scale [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(14): 2699-2714.
- [11] Stoyan H, De-Polli H, Böhm S, et al. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale[J]. Plant and Soil, 2000, 222(1/2): 203-214.
- [12] 毕华兴, 李笑吟, 刘鑫, 等. 晋西黄土区土壤水分空间异质性的地统计学分析[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 59-66.
- [13] 姚月锋, 满秀玲, 毛乌素沙地不同林龄沙柳表层土壤水分空间异质性[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 111-115.
- [14] Zhao Long, Yang Kun, Qin Jun, et al. Spatiotemporal analysis of soil moisture observations within a Tibetan mesoscale area and its implication to regional soil moisture measurements[J]. Journal of Hydrology, 2013, 482(3): 92-104.
- [15] Savva Y, Szlavecz K, Carlson D, et al. Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area, in Maryland, USA [J]. Geoderma, 2013, 192(1): 202-210.
- [16] Maeda K, Tanaka T, Park H, et al. Spatial distribution of soil structure in a suburban forest catchment and its effect on spatio-temporal soil moisture and runoff fluctuations[J]. Journal of Hydrology, 2006, 321(1): 232-256.
- [17] He'brard O, Voltz M, Andrieux P, et al. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(1/2): 110-121.
- [18] Korres W, Reichenau T G, Schneider K. Patterns and scaling properties of surface soil moisture in an agricultural landscape: An ecohydrological modeling study [J]. Journal of Hydrology, 2013, 498(8): 89-102.
- [19] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [20] 马晓东, 李卫红, 朱成刚, 等. 塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4035-4045.
- [21] 王存国, 韩士杰, 张军辉, 等. 长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计学分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 849-855.
- [22] 蔡庆空, 蒋金豹, 崔希民, 等. 环境因子对土壤水分空间异质性的影响: 以北京市怀柔区为例[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 294-299.
- [23] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 483-492.
- [24] 尹传华, 冯固, 田长彦, 等. 塔克拉玛干沙漠边缘柽柳对土壤水盐分布的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 670-675.

(上接第 82 页)

- [7] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 祁连山水源区主要树种耐旱性研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2241-2247.
- [8] 田有亮, 郭连生. 几种针阔叶树种生长水势阈和生命水势阈的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 190-194.
- [9] 姜丽娜, 杨文斌, 卢琦, 等. 低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3192-3204.
- [10] 杨志国, 孙保平, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地东段风沙源治理模式初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(3): 83-88.
- [11] 国家林业局. LY/T1215—1999 森林土壤水分—物理性质的测定[S]. 北京: 国家林业局, 1999.
- [12] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 57-59.
- [13] 张友焱, 周泽福. 半干旱区主要树种水分生理特性研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 23-24.
- [14] 杨文斌, 王晶莹. 干旱、半干旱区人工林边行水分利用特征与优化配置结构研究[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 3-9.
- [15] 郭惠清, 田有亮. 杨幼树水分生理指标和光合强度与土壤含水量关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(2): 101-106.
- [16] 杨文斌, 任建民, 贾翠萍. 柠条抗旱的生理生态与土壤水分关系的研究[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 239-244.
- [17] 杨文斌, 包雪峰, 杨茂仁, 等. 梭梭抗旱的生理生态水分关系研究[J]. 生态学报, 1991, 11(4): 318-322.
- [18] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 744-749.