

干旱—半干旱地区不同植被条件下土壤含水量变化及植被建设途径分析

李玲芬¹, 延军平¹, 刘冬梅², 陈锋¹, 丁金梅¹

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 西京学院, 陕西 西安 710123)

摘要:以黄土高原中北部丘陵沟壑区至风沙滩区这一特殊的过渡区域为例,对干旱—半干旱地区土壤含水量空间分异进行了分析,并对该区植被恢复途径进行了探讨。研究表明:(1)土壤含水量具有由北向南递增的趋势,这种趋势主要受控于降水的地带性格局,越向干旱地区,土壤含水量越不稳定;(2)不同植被类型下,草地土壤含水量较高,随土壤深度增加呈上升趋势;林地含水量较低,随深度增加呈下降趋势,且土壤干层广泛发育。草地水分的变异程度小于林地,其土壤水分较为稳定;(3)榆林样点位于古湖盆地滩地的环境条件下,其土壤含水量较高,超过了半湿润地区的土壤含水量。干旱—半干旱地区进行生态恢复过程中,大面积进行植树造林是不可取的,应以草地建设为主,在某些特殊的古湖盆地地质条件下,可进行部分植树造林。

关键词:土壤含水量;空间分异;区域尺度;过渡区

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)01—0018—05

中图分类号: S152.7, 171.4

Variation of Soil Moisture in Arid and Semi-arid Areas Under Different Vegetations and the Ways of Ecological Construction

LI Ling-fen¹, YAN Jun-ping¹, LIU Dong-mei², CHEN Feng¹, DING Jin-mei¹

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062;

2. Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123, China)

Abstract: Taking the hilly area of the Loess Plateau to sandy beach as example, this paper analyzes the spatial diversification of soil moisture content in the arid and semi-arid regions using methods of laboratory analysis, and discusses the ways to ecological construction in the area. The study shows that: (1) The soil moisture is increasing along with north to south orientation, and the main cause is the precipitation character. The drier of soil moisture in the area is, the more instability of soil moisture is. (2) With different types of vegetation, grassland soil moisture is higher, and increases with the depth. Woodland soil moisture is lower, and decreases with the depth, developing dry soil layers extensively. The degree of variability of grassland soil moisture lower than woodland soil moisture, and the soil moisture are more stable. (3) Yulin samples are at environmental conditions of an ancient lake, the soil moisture content is higher than that in semi-arid regions. In the process of ecological restoration of arid and semi-arid areas, it is not desirable to forest in large area, and the right way should be ecosystem-based grass-building, in some special geological conditions such as ancient lake, we can make forestations partly.

Keywords: soil moisture; spatial variability; regional scale; transition region

水分是干旱—半干旱地区生态与环境的主要限制因子^[1-4],其空间分布及垂直变异状况对因地制宜地恢复黄土高原植被有着极为重要的意义。土壤水分具有高度的时空异质性,研究土壤水分的尺度不同,其影响因子与变化规律也不尽相同^[5-7]。我国从

20世纪80年代中期开始了土壤水分异质性方面的研究,近年来,该领域的研究得到很大的发展,但国内外的研究多集中在坡面尺度和集水区或小流域尺度^[8],区域尺度上土壤含水量的变化还缺乏系统的研究。本研究从区域尺度上对干旱—半干旱地区进行

收稿日期:2008-05-22

修回日期:2008-09-10

资助项目:教育部哲学社会科学重大课题攻关项目“西部经济发展与生态环境重建研究”(04JZD00010);教育部人文社会科学重点研究基地重大研究项目“陕甘宁老区生态脱贫途径研究”(05jjd770013)

作者简介:李玲芬(1984—),女(汉族),云南省玉溪市人,硕士研究生,主要从事资源开发与环境治理研究。E-mail:deer84@stu.snnu.edu.cn。

土壤含水量野外试验与系统分析,旨在揭示土壤含水量地域差异的规律性,为区域环境治理和植被建设提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区域为黄土高原中北部地区,北至乌审旗,南抵安塞县,跨越长城,连接毛乌素沙地与黄土高原丘陵沟壑区,位于东经 $108^{\circ}49' - 109^{\circ}56'$,北纬 $36^{\circ}51' - 38^{\circ}34'$,海拔 $1143 \sim 1301$ m。该区降水、地貌和植被等地理因素具有显著的过渡特征,降雨量等气候因素南北差异大,年均降雨量从南往北由 500 mm 降至 350 mm,降水集中于 $6-9$ 月,占全年降水量的 70% 左右,年内、年际变化大;地貌类型南部为黄土丘陵沟壑区,北部则为风沙滩区;植被状况整体较差,南部草类以蒿类、白羊草为主,灌木以蔷薇、柠条等居多,林木主要以天然次生林、人工林为主,北部植被具有草原植被的典型性质,以沙柳、沙蒿、柠条和杨树等沙生植物为主,它们大多呈斑块状分布。区域的过渡性寓含了土壤水分分异的复杂性^[9]以及植被恢复实践中研究土壤水分分布的重要性。

1.2 研究方法

本研究采用了以野外调查、观测、采样与室内分析相结合的方法。实验区选择在黄土高原中北部,具体考察路线为:安塞县—靖边县—横山县—榆林市—乌审旗,5 个样区共 11 个样点,研究干旱—半干旱地区植被恢复过程中土壤含水量的分布状况和空间分异规律。安塞县林地样点海拔为 1159 m,阴坡中坡位置,植被盖度为 50% ;草地样点海拔 1175 m,植被为铁杆蒿,阴坡上坡位置,坡度为 30° 。靖边县林地样点海拔 1172 m,阳坡中坡位置,植被为杨树,植被盖度为 10% 。草地样点海拔 1168 m,阴坡上坡位置。横山县林地、草地样点海拔为所有测点中最低,植被盖度 51% 。榆林市林地样点海拔 1189 m,植被为杨树林,植被盖度为 84% ,采样点位于古湖盆地环境;草地采样点海拔 1186 m,位于阳坡中坡处,坡度为 14° 。乌审旗林地样点海拔为 1258 m,植被为 15 a 杨树林,阴坡上坡位置,植被盖度为 40% ;草地样点海拔为 1301 m,植被为蒿草,阳坡中坡位置,坡度为 12° 。野外采样采用土钻法,用 GPS 确定采样位置,考虑到大气降水是黄土高原水资源的主要来源,黄土高原降水入渗深度一般不超过 200 cm,几乎没有深层渗漏^[10-12],因此采样深度为 200 cm,每隔 10 cm 取一个样。样品封存在铝制水分盒和塑料密封袋中,在实验室用烘干法测定土壤含水量。采样工作在 2007 年 4 月 26

日—5 月 1 日进行,采样期间没有降水过程,所测数值能真实反映土壤水分的自然变化状况。

土壤水分的垂直变化主要取决于降雨和蒸散过程的相互作用,土壤剖面水分的垂直变化,能间接反映降雨入渗规律和植被耗水特征。一般采用变异系数和标准差两个指标,本研究主要依照变异系数来分析土壤水分的垂直变化层次。

2 结果分析与讨论

2.1 土壤含水量水平空间变异特征

分析结果表明,干旱—半干旱地区土壤含水量水平分异明显。草地土壤含水量由低纬安塞县向高纬乌审旗递减,变化范围是 $12.42\% \sim 1.30\%$,从安塞到靖边段减少较为明显。图 1a 显示了 3 个不同深度处草地土壤含水量的水平变化特征。 10 cm 深度处土壤含水量变化幅度相对较小,变化范围为 $6.39\% \sim 1.30\%$; 100 cm 土层深处变化趋势加强,变幅在 $9.45\% \sim 1.47\%$ 之间,平均为 4.73% ; 200 cm 深处变化趋势最显著,变化范围为 $12.42\% \sim 2.23\%$,平均为 5.78% 。总体上看,3 个不同深度土壤含水量皆由南部安塞县至北部乌审旗递减。林地(图 1b)与之相应的 3 个深度土壤含水量变化规律与草地接近,由安塞县向乌审旗递减,总体变化范围在 $9.21\% \sim 1.01\%$ 之间, $10, 100, 200$ cm 各层平均含水量分别为 $4.31\%, 4.17\%$ 和 2.73% 。

区域尺度从宏观角度研究土壤含水量变化的大趋势,模糊了区域内的小差异,而区域的多年降雨特征、区域气候特征和大的地形特征等影响因子便突显出来。研究区内,从安塞县至乌审旗一线,区域多年降雨及气候特征均存在过渡性差异,刘引鸽^[3]研究表明,近 51 a 来,黄土高原年平均降水量从东南到西北逐渐递减。草地与林地土壤含水量由半湿润区向干旱—半干旱地区递减的趋势与降水的地域格局有关,由于秦岭山脉对冬季风的南下和夏季风的北上的阻碍作用,暖湿气团由南向北推进的过程中,水汽含量愈来愈少,使得黄土高原形成降水的概率也从南到北逐渐减少,形成了降水量分布南多北少的趋势,从而也相应形成了土壤含水量南多北少的分布格局。

2.2 土壤含水量垂直空间分异

2.2.1 林地土壤含水量垂直剖面变异 图 2 为林地植被下不同区域土壤含水量的垂直剖面变化曲线图,由图中可知,安塞林地 $0-200$ cm 土层含水量总的变化范围在 $5.39\% \sim 10.32\%$ 之间,平均值为 7.67% ,据含水量变化可将其分为两层, $0-100$ cm 之间含水量较高,变化范围在 $6.44\% \sim 10.39\%$ 之间,变化幅

度为 3.95 % ,平均值为 8.91 % ;110—200 cm 之间含水量有所降低,变化范围在 5.32 % ~ 8.33 % 之间,变

化幅度为 3.01 % ,平均值为 6.43 % ,有较强的土壤干化现象。

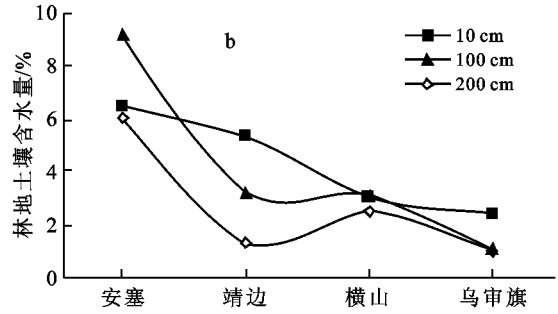
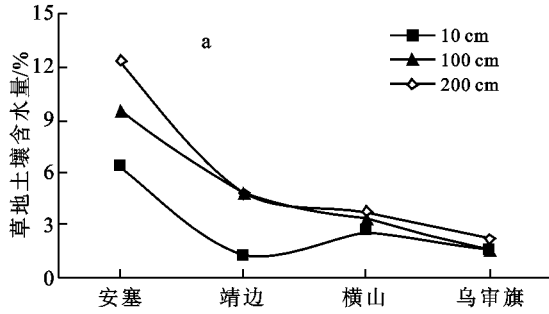


图 1 区域水平空间土壤含水量

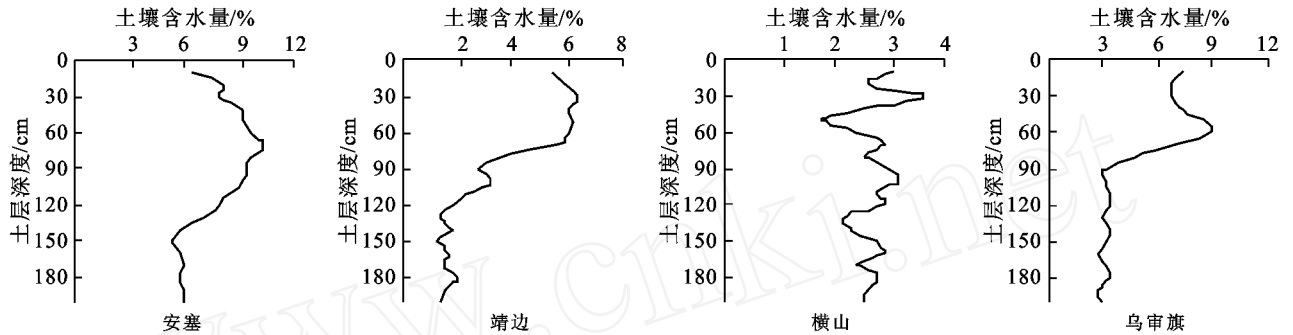


图 2 林地土壤含水量垂直变异

靖边林地土壤含水量变化范围在 1.14 % ~ 6.40 % 之间,变化幅度 5.26 % ,平均值为 3.37 % 。0—200 cm 从上向下含水量呈逐渐减小趋势。0—100 cm 之间,含水量变化范围为 2.70 % ~ 6.40 % ,变化幅度为 3.70 % ,平均为 5.11 % ;110—200 cm 之间,含水量变化范围为 1.14 % ~ 2.34 % ,变化幅度为 1.20 % ,平均为 1.63 % 。乌审旗林地剖面变化规律与靖边林地接近,0—200 cm 含水量总的变化范围在 0.95 % ~ 2.97 % 之间,0—100 cm,110—200 cm 之间的平均含水量分别为 2.11 % 和 1.06 % ,变化幅度分别为 0.99 % 和 0.19 % 。

横山林地土壤含水量变化范围 1.73 % ~ 3.59 % 之间,平均值为 2.68 % 。0—200 cm 土壤含水量变化呈波动下降趋势。0—100 cm,110—200 cm 两层土壤平均含水量分别为 2.77 % 和 2.59 % ,变化幅度分别为 1.86 % 和 0.75 % 。

从 0—200 cm 土层深度范围内,随着深度的增加,虽然各个区域采样点土壤含水量变化曲线不尽相同,但土壤含水量具有共同的变化趋势,即由表层向深层呈递减趋势。安塞、靖边、横山与乌审旗这 4 个采样点在 100 cm 深度以内土壤含水量均出现高值,高值集中在 30—70 cm 土层深度处。同时随着土层深度的增加,含水量变化的幅度变小直至趋于平稳。

2.2.2 草地土壤含水量垂直剖面变异 草地土壤含水量垂直空间分异特点与林地有较大的区别,整体变化趋势为随土层深度的增加,土壤含水量由表层向下逐渐递增(图 3)。测定结果表明,各区域草地土壤剖面含水量总体高于林地,且垂直空间分异也具有一定的规律性。安塞草地 0—200 cm 含水量变化范围在 6.39 % ~ 13.03 % 之间,平均值为 10.46 % ,水分含量相对较高。据含水量变化仍可分为两层,第一层为 0—100 cm 之间,变化范围在 6.39 % ~ 11.39 % 之间,变化幅度为 5 % ,平均值为 9.80 % ;第二层为 110—200 cm,含水量有所增加,变化范围为 7.71 % ~ 13.03 % ,变幅为 5.32 % ,平均值是 11.12 % 。

靖边草地 0—200 cm 含水量变化范围在 1.30 % ~ 6.17 % 之间,平均为 4.34 % ,从上向下变化趋势依然由小变大。0—100 cm 含水量变化范围在 1.30 % ~ 4.75 % 之间,变幅为 3.45 % ,平均值为 2.97 % ;110—200 cm 之间,土壤含水量增加明显,其变化范围在 4.78 % ~ 6.17 % 之间,变幅为 1.39 % ,平均值上升为 5.71 % 。

横山草地除去表层外,0—200 cm 土壤含水量平稳中有所增加,0—100 cm,110—200 cm 两层土壤平均含水量分别为 3.20 % 和 3.28 % ,变幅分别为 1.65 % 和 1.35 % 。乌审旗草地土壤含水量与之相反,呈现稍强

地波动变化,0—200 cm 含水量变化范围为 1.04%~3.86%,变幅为 2.82%,比横山草地剖面含水量变幅高

0.45%,0—100 cm,110—200 cm 平均含水量分别为 1.77%和 2.54%,土壤含水量增加趋势明显。

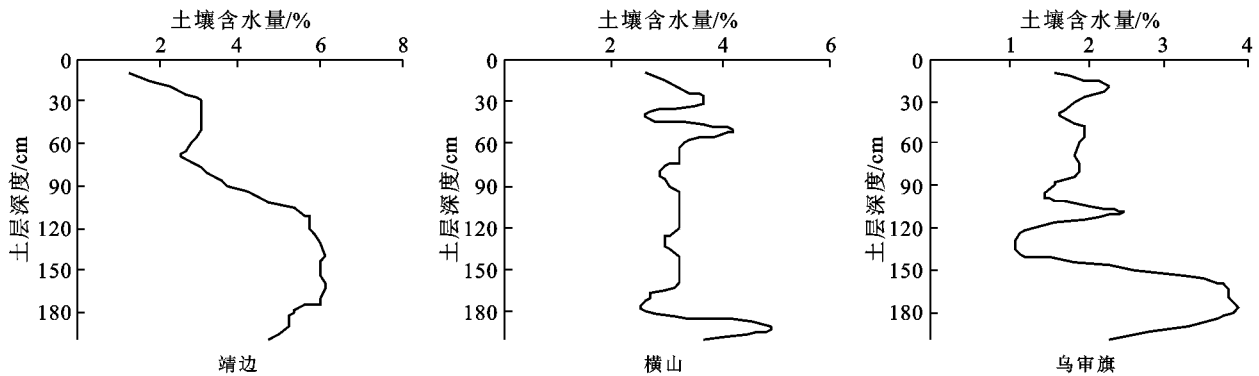


图 3 草地土壤含水量垂直变异

2.3 古湖盆滩地与黄土土壤水分状况的对比

图 4 为榆林样点林地和草地土壤含水量变化曲线图。榆林林地 0—200 cm 含水量变化范围在 2.81%~24.00%之间,随土层深度的加深呈上升趋势,0—100 cm 缓慢上升,变幅为 4.80%,110—200 cm 急速上升,变幅高达 18.66%,并在 130 cm 处出现飞跃。榆林草地 0—200 cm 含水量变化范围在 8.46%~25.38%之间,在 50 cm 处出现一峰值,整体仍处于波动上升状态。同时从表 1 可知草地与林地土壤含水量最大变化区间皆为榆林样区,分别为 16.92%和 21.19%,并且该区土壤水分平均值远高于安塞地区,草地土壤含水量平均值高达 17.03%,超过安塞草地平均值 6.57%;林地平均值为 10.78%,高于安塞林地平均值 3.11%,同时还高于安塞草地的土壤含水量平均值。这是因为该采样点地处榆林滩地环境,其下为古湖盆的地质结构,二者均随深度的加深土壤水分表现为增加趋势,且在一定深度发生突变,草地在 110 cm 深度处剧增,而林地则在 130 cm 处发生突变,此后处于波动上升状态。对于古湖盆滩地环境,可以进行林木种植,因其水分有充足的保证。

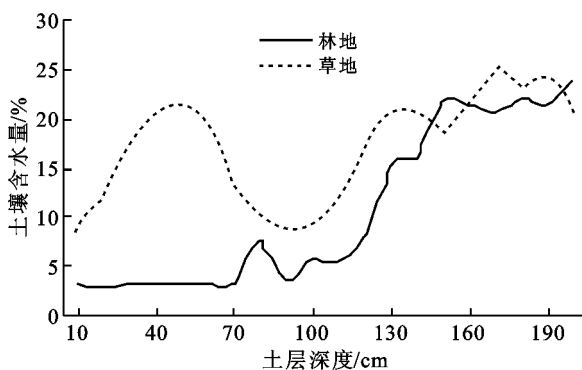


图 4 古湖盆滩地环境土壤含水量(榆林样点)

从表 1 中分析可见,各样区采样点的变异系数值在 15.87%~77.64%之间,均为中等变异。安塞地区草地与林地土壤含水量的变异系数相对较小,表明其较均匀稳定,而越向干旱地区,变异系数越大,表明土壤水分不稳定性增强。林地的变异系数相对于草地普遍偏高,土壤水分不稳定性态势强于草地。此外,不论任何样区,草地剖面土壤含水量的平均值均高于林地的平均值,这正好说明了较高的植被生产力消耗较多的土壤水分。

林地土壤含水量较低是因为林地树冠蒸腾及耗水量较大所致;而草地的土壤含水量较高主要是因为草本植物与林木相比具有较浅的根系和较小的冠层,故其蒸腾和耗水较小,另外,随着植被恢复的不断进行,草被盖度不断增加和大量枯枝落叶层的累积,就像盖了一层地膜,减少了地表径流和地表蒸发,增加了土壤的入渗和保水能力。王力^[20]等认为,高生产力,高耗水植被利用水分多,土壤水分由于累积亏损,差异会明显。Singh^[21]等在研究草地的土壤水分动态时也发现,土壤水分含量与植物耗水密切相关。一般来说,多年生植被生育期强,根系分布较深,年蒸发蒸腾量大于一年生植被^[22]。

2.4 土壤含水量空间变化与植被营建对策

土壤含水量在垂直方向的分布受降水、蒸发、土地利用类型和植被等的影响较大^[4]。林地与草地植被下土壤含水量存在明显差异,处于干旱—半干旱条件下的安塞林地剖面土壤含水量平均值仅为 7.67%,不足 10%,表明其下发育土壤干层。

以往研究表明,由于土壤严重缺水导致的土壤干层现象在延安及以北地区广泛存在^[13-14]。杜娟^[15]等的研究表明,土壤干层的分布范围已到达关中地区。在土壤干层广泛发育且程度较大的地区进行大规模

“植树造林”不利于涵养水分,会造成生态贫水化^[16],不利于长远的植被恢复和生态重建。对于水分条件更差的干旱—半干旱地区来说,进行大范围的植树造林更是违背自然规律,种植的树木不但不会成为保持

水分的“蓄水池”,反而会加重土壤干层的发育程度,成为消耗土壤水分的“抽水机”,特别是近 10 a 来年均降雨量比多年平均值偏低 50 mm 以上^[3],干旱区树木“抽水机”的功能更加显著。

表 1 土壤含水量垂直剖面统计特征值

样区	剖面深度/ cm	草地				林地			
		平均值/%	标准差	极差	变异系数/%	平均值/%	标准差	极差	变异系数/%
安塞	0—200	10.46	1.66	6.65	15.87	7.67	1.67	5.07	21.77
靖边	0—200	4.34	1.57	4.88	36.18	3.37	2.04	5.26	60.53
横山	0—200	3.24	0.57	2.37	17.59	2.68	0.40	1.86	14.93
榆林	0—200	17.03	5.40	16.92	31.71	10.78	8.37	21.19	77.64
乌审旗	0—200	2.16	0.86	2.81	39.81	1.59	0.71	2.02	44.65

伍光和^[17]研究认为,依据地域分异规律,干旱区的主要植被类型为各类灌木、半灌木荒漠,半干旱区以荒漠草原和典型草原为代表,森林仅出现于山地的某一高度层带,或发育于河流沿岸,认为西北广大地域的造林问题需进行重新审视。从草原生态学的角度来看,降雨量在 500 mm 以下的这一类地区,属干旱—半干旱区,是干旱草原向草原过渡的中间地带,其自然植被类型应是草原和灌丛。而乔木植物生长发育一般都需要有 600 mm 以上的降雨条件。因此,在这一地区实施退耕还林还草,应选择低干、矮冠、叶片小的灌木特别是草本植物^[18]。在陕北榆林、靖边以北的地区,年均降水低于 400 mm,土壤水分背景含量低于 5.5%甚至 5%,地形为不同于黄土高原丘陵沟壑地貌的平缓台地,适合天然草被群落的生长和自然恢复,属典型草原植被地带^[19]。

在黄土高原,植被与土壤水的辩证关系为:土壤水决定植被的类型及其生长状况;植被通过生物利用(蒸散等)反作用于土壤水;植被生长状况是土壤水分条件的直接标志和度量^[19]。在野外调查过程中,发现在干旱—半干旱地区种植的树木大部分都是“小老头”树,树干矮小,枝叶短而稀疏,林下地表裸露,不利于截留降雨,其结果是树木大量吸取深层土壤水分造成土壤干层,破坏草地生态系统,水土流失面积增加。而草地却与之不同,草地地表被枯枝落叶覆盖,既利于截留降雨,也利于护沙。在生态恢复过程中,干旱地区的树木,对土壤水分具有抽水机的功能,干旱—半干旱地区草地植被的生态效益要优于林地植被,从长远方向看,草地植被水分循环的持续性更强。

3 结论

(1) 土壤含水量具有由北向南的地带性增加趋势,这种趋势主要受控于降水的地带性格局;越接近

干旱地区,变异系数越大,土壤水分不稳定性越强。

(2) 草地植被土壤含水量平均值要高于林地植被平均值,随深度的增加,草地土壤含水量呈增加趋势,而林地与之相反,随深度的增加表现为下降趋势;草地土壤水分变异程度小于林地,表明草地土壤水分稳定性较强。

(3) 榆林样区由于位于古湖盆滩地的环境条件下,土壤含水量较高,远高于安塞等半湿润地区土壤含水量。

(4) 干旱—半干旱地区不同植被条件下土壤含水量的平均值和变异系数均具有明显的空间变异性,该区在进行生态建设过程中应遵循土壤水分的空间分异规律,重视草地植被在干旱—半干旱地区的生态作用。

[参 考 文 献]

- [1] 韩德儒,杨文斌,杨茂仁,等. 干旱—半干旱沙地灌(乔木)种水分动态关系及其应用[M]. 北京:中国科学技术出版社,1996.
- [2] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等. 绿洲—荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究[J]. 植物生态学报,2002,26(2): 203-208.
- [3] 刘引鸽. 陕北黄土高原降水的变化趋势分析[J]. 干旱区研究,2007,24(1): 49-52.
- [4] 胡伟,邵明安,王九全. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 水科学进展,2006,17(1): 74-80.
- [5] Andrew W W, Rodger B G. The tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements[J]. Water Resources Research, 1998, 34(10): 2765-2768.
- [6] Kachanoski R G, De Jong E. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage[J]. Water Resources Research, 1988, 24: 85-91.

(下转第 27 页)

树干茎流量与降雨强度则无明显相关性。叶面积指数以及胸径对毛竹林树干茎流量有一定影响,在同一降雨事件下:叶面积指数越大,茎流量越大;胸径越大,茎流量越大。

(4) 林冠截留受降雨特征、林分类型、林冠特征、等多种因素的影响,但是对于某一指定林分,林冠截留量主要决定于降雨量。与多数研究结果相似,本研究中毛竹林林冠截留量与降雨量具较强的相关性,随着降雨量的增加,林冠截留量增加;同时毛竹林林冠截留量还受到降雨强度的影响,降雨强度与截留量呈负相关性,随着降雨强度的增加,毛竹林截留量逐渐减小。而毛竹林林冠截留率与降雨量、降雨强度均呈显著的负相关性,均随其增大而减小。表征林冠特征的叶面积指数对毛竹林林冠截留量有一定影响,在同一降雨事件下,较高的叶面积指数其截留量较高。

[参 考 文 献]

- [1] 马雪华. 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用的研究[J]. 林业科学, 1987, 23(3): 356-369.
- [2] 马雪华, 杨茂瑞, 胡星弼. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J]. 林业科学, 1993, 29(3): 199-206.
- [3] 王景升, 任青山, 兰小中. 急尖长苞冷杉原始森林降水分配格局[J]. 林业科技, 2002, 27(6): 8-10.
- [4] 谢春华, 关文彬, 吴建安. 贡嘎山暗针叶林生态系统林冠截留特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 68-71.
- [5] 杨茂瑞. 亚热带杉木、马尾松人工林的林内降雨、林冠截留和树干茎流[J]. 林业科学研究, 1992, 5(2): 158-162.
- [6] 谢锦忠, 傅懋毅, 马占兴, 等. 丛生竹林生态系统的水文效应研究: 麻竹林林冠对降水的截持作用[J]. 竹子研究汇刊, 2003, 22(1): 13-22.
- [7] 傅懋毅, 方敏瑜, 谢锦忠. 竹林养分循环规律研究: 毛竹林内降水的养分输入及其林地茎流的养分输出[J]. 林业科学研究, 1992(5): 497-505.
- [8] Navar J, Bryan B. Fitting the analytical model of rainfall interception of Cash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 68: 133-143.
- [9] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees[J]. J. Hydrol., 1979, 42: 383-396.
- [10] Pearce A J. Nighttime, wet canopy evaporation rates and the water balance of an evergreen mixed forest[J]. Water Resour Res, 1980, 16: 955-959.
- [11] 崔启武, 边履刚, 史继德, 等. 林冠对降水的截留作用[J]. 林业科学, 1980, 16(1): 40-47.
- [12] 崔启武, 边晨刚. 林冠对降水的截留作用[J]. 林业科学, 1980, 5(2): 141-146.
- [13] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵小流域土地利用变化对生态环境的影响[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 241-245.
- [14] 张北赢, 徐学选, 李贵玉. 土壤水分基础理论及其应用研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 122-129.
- [15] 徐学选, 刘文兆, 高鹏, 等. 黄土丘陵区土壤水分空间差异性探讨[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 52-55.
- [16] 张勃, 张华, 张凯, 等. 黑河中游绿洲及绿洲—荒漠生态脆弱带土壤含水量空间分异研究[J]. 地理研究, 2007, 26(2): 322.
- [17] 杨海军, 孙立达, 余新晓. 晋西黄土区水土保持林水量平衡的研究[J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 42-50.
- [18] 袁建平, 蒋定生. 黄土丘陵沟壑区小流域降雨入渗产流点面转化[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 262-266.
- [19] 王力, 邵明安, 侯庆春. 黄土高原土壤干层初步研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(4): 34-38.
- [20] 王力, 邵明安, 侯庆春, 等. 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 101-106.
- [21] 杜娟, 赵景波. 西安高陵人工林土壤干层与含水量季节变化研究[J]. 地理科学, 2007, 27(1): 98-101.
- [22] 延军平. 秦岭南北环境响应程度比较[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 伍光和, 王文瑞. 地域分异规律与北方农牧交错带的退耕还林还草[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 441-442.
- [24] 祁凤鹏. 半干旱黄土丘陵地区退耕还林还草初探[J]. 中国水土保持, 2000(12): 30-33.
- [25] 胡良军, 邵明安, 杨文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J]. 草业学报, 2004, 13(6): 14-18.
- [26] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 87-90.
- [27] Singh J S, Milchunas D G, Lauenroth W K. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland[J]. Plant Ecology, 1998, 134: 77-89.
- [28] 马祥华, 白文娟, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(5): 19-23.

(上接第 22 页)