

晋西黄土丘陵沟壑区春季土壤水分动态研究^{*}

高艳鹏^{1,2}, 王志明¹, 骆 汉¹, 赵廷宁¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 山东省兖州市
林业局, 山东 兖州 272100)

摘 要:采用固定点动态监测的方法,对黄土丘陵区方山县峪口镇花果山人工植被恢复过程中春季土壤水分动态变化进行了研究。结果表明:5 月份土壤含水量有较大的升高;荒草坡土壤水分条件最好,针叶林、经济林土壤水分条件较好,柠条灌丛土壤水分条件一般,刺槐纯林土壤水分条件最差;土壤水分阴坡好于阳坡;土壤水分随林分密度的变化规律较为明显,黄土区造林密度不宜过大或过小,以适应有限的土壤水分资源。测点剖面不同部位土壤水分含量差异较大,形成剖面土壤水分总体上高下低的分布规律;各样地表层土壤水分的变异程度最大,而后不断减小至基本保持不变。

关键词:黄土丘陵沟壑区;春季;土壤水分

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)03-0092-05

Study on Spring Soil Moisture in Loessial Gully Hill Area of West Shanxi Province

GAO Yan-peng^{1,2}, WANG Zhi-ming¹, LUO Han¹, ZHAO Ting-ning¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Lab. of Soil & Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Yanzhou Forestry Bureau of Shandong, Yanzhou, Shandong 272100, China)

Abstract: Using fixed-point dynamic monitoring methods, soil water was studied during the process of cultivated vegetation succession on the Huaguo mountain area in spring. The results showed that: The soil moisture increased significantly in May. The soil moisture in slope grassland was the best. Coniferous forest and economic forest soil moisture conditions were better. *Caragana* shrub soil moisture conditions was in general, *Robinia pseudoacacia* was the worst of all. The coefficient can reflect a law that the soil moisture in north-slope was better than that in south-slope. The change of soil moisture in different vegetation density was obvious. The vegetation density was moderate in the Loess Gully Hill Area. The soil moisture content of different depths was different. The surface was better than the bottom. The variability of surface soil moisture was the greatest, and then decreases, and to essentially unchanged.

Key words: Loess Gully Hill Area; spring; soil moisture

土壤水分是黄土高原生态环境建设的决定性因子,土壤水分的亏缺及其时空分布的特点决定了土壤水分的承载力十分有限,为黄土区防护林体系的建设增加了难度^[1-2]。土壤水分是制约黄土高原地区植被恢复与重建的主要限制因子,也是决定土壤生产力的一个重要因素^[1,3]。由于黄土高原地区土

壤含水量主要靠降水补偿,不同季节降水随着季相发生变化,土壤水分也发生了相应的季节变化^[4]。李开元等将黄土高原土壤水分的季节变化分为春季缓慢蒸发、夏季蓄水增墒、秋季强烈蒸发损耗、冬季相对稳定四个阶段^[5],黄土地区春季末期,即四、五月份年内土壤含水量为最低,一般造林都集中在春

^{*} 收稿日期:2009-11-10

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划课题“黄土高原丘陵沟壑半干旱区水土保持抗旱造林及径流林业技术试验示范”(2006BAD03A1201)

作者简介:高艳鹏(1973-),男,山东兖州人,博士研究生,研究方向:工程绿化。E-mail:gaoyanpeng88@163.com

通信作者:赵廷宁(1962-),男,河北阳原人,教授,博士生导师,研究方向:工程绿化、生态恢复方面的研究。E-mail:zhtning@bjfu.edu.cn

季,这时春季土壤水分状况对造林成活率影响最大,土壤水分含量成为影响林木生长的限制因子。许多学者对黄土高原土壤水分的特性,黄土高原不同植被类型、不同地形和不同土地利用结构类型对土壤水分的影响进行了研究^[6-11]。但是就对黄土丘陵沟壑区植被恢复过程中春季土壤水分动态的研究还很少。因此本文对黄土丘陵沟壑区在植被恢复过程中春季土壤水分的变化进行研究,分析植树造林时期的黄土区土壤水分分布状况,为该区域的植被恢复,林木合理经营,提高林地生产力,充分发挥林地的生态效益提供理论依据。

1 研究区概况

试验区地处山西省西部方山县峪口镇花果山,属于典型的黄土丘陵沟壑侵蚀地貌,最高海拔 1 485 m,最低海拔 1 170 m,相对高差达 315 m,平均海拔 1 300 m 左右。本境气候多样,光照充足,属暖温带半干旱气候,年均气温 8.7℃,1 月均温 - 8.2℃,7 月均温 22℃,年均降雨量 440~650 mm,霜冻期为 9 月下旬至次年 5 月上旬,无霜期为 90~150 d。造林地的土壤为黄绵土,由黄土母质直接发育形成,层次

过渡不明显;土层深厚,质地均匀,为中壤土,pH 值为 8.0~8.4。乔木树种主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、白榆(*Ulmuspumila*)、油松(*Pinustabulaeformis*)、华北落叶松(*Larixprincipis*)、侧柏(*Platycladusorientalis*);灌木主要有黄刺玫(*Rosaxanthina*)、沙棘(*Hippophaerhamnoides*)、文冠果(*Xanthocerasorbifolia*)、大果榆(*Ulmusmacrocarpa*)、矮卫矛(*Euonymusnanus*)等;草本植物以菊科和禾本科为主,有铁杆蒿(*Artemisiasacrorum*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、南牧蒿(*A. Eviopoda*)、吉蒿(*A. giraldii*)、抱茎苦苣菜(*Ixeris chinensis*)、多叶隐子草(*Cleistogenespolyphylla*)、糙隐子草(*C. squarrosa*)、披硷草(*Elymusdahruicus*)、铁线草(*Poasphondylodes*)、刺草(*Aneurolepidiumdasystachys*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

根据植被类型,土地利用方式的不同,选择典型样地 21 处,进行点位调查,记录坡向、坡度、坡位、经纬度、海拔、林分类型等,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

点位	海拔/m	纬度	经度	坡度/(°)	坡向	坡位	整地方式	植被
1	1116	37°43'42.2" N	111°13'21.8" E	29	阳坡	下坡	带状整地	小油松
2	1121	37°43'29.6" N	111°13'19.8" E	8	阳坡	下坡	带状整地	小油松
3	1118	37°43'37.7" N	111°13'21.9" E	28	阳坡	沟谷	带状整地	小油松
4	1186	37°43'39.1" N	111°13'37.3" E	14	阴坡	中坡	带状整地	经济林
5	1180	37°43'44.0" N	111°13'23.2" E	5.5	阴坡	上坡	带状整地	梨树
6	1195	37°43'35.2" N	111°13'41.8" E	21	阳坡	中坡	带状整地	山杏
7	1236	37°43'28.3" N	111°13'03.0" E	17	阴坡	沟坡	自然斜坡	荒草地
8	1220	37°43'21.5" N	111°14'07.5" E	12	阳坡	上坡	自然斜坡	刺槐
9	1220	37°43'26.7" N	111°14'10.0" E	14	阳坡	下坡	带状整地	大梨树
10	1258	37°43'30.6" N	111°14'09.8" E	1	阳坡	梁峁顶	平地	经济林
11	1306	37°43'28.7" N	111°14'39.2" E	17	阳坡	中坡	自然斜坡	刺槐
12	1297	37°43'29.6" N	111°14'39.6" E	7	阳坡	山脊	平地	油松、刺槐
13	1329	37°43'23.9" N	111°14'53.2" E	16	阳坡	中坡	带状整地	油松
14	1354	37°43'24.7" N	111°14'53.7" E	22	阴坡	上坡	带状整地	油松
15	1358	37°43'23.1" N	111°14'54.9" E	31	阳坡	上坡	自然斜坡	柠条
16	1398	37°43'18.4" N	111°14'04.5" E	13	阳坡	上坡	自然斜坡	刺槐
17	1412	37°43'18.4" N	111°14'07.3" E	32	阳坡	中坡	自然斜坡	荒草地
18	1408	37°43'20.1" N	111°14'04.7" E	26	阳坡	上坡	带状整地	油松
19	1449	37°43'20.1" N	111°14'12.7" E	10	阴坡	上坡	自然斜坡	油松、榆树
20	1450	37°43'19.1" N	111°14'12.5" E	15	阳坡	峁顶	自然斜坡	荒草地
21	1460	37°43'18.7" N	111°14'14.6" E	13	阳坡	上坡	自然斜坡	荒草地

2.2 土壤水分测定

在 21 个样地中,分别安装土壤水分测管,采用中子水分测定仪定位观测的方法,每 10 cm 为一层,观测深度为 2 m,在 2009 年 4 月与 5 月,平均每 4 天测定一次。测定时注重时间的误差控制,按照点位的海拔依次从上至下和从下至上轮流交替进行测定。

3 结果与分析

3.1 植被类型对土壤水分动态变化的影响

将试验区立地类型相似、造林密度相当的不同植被类型样地(5 号梨树、11 号刺槐、14 号油松、19 号油松 × 榆树)的土壤水分随时间的变化见图 1。

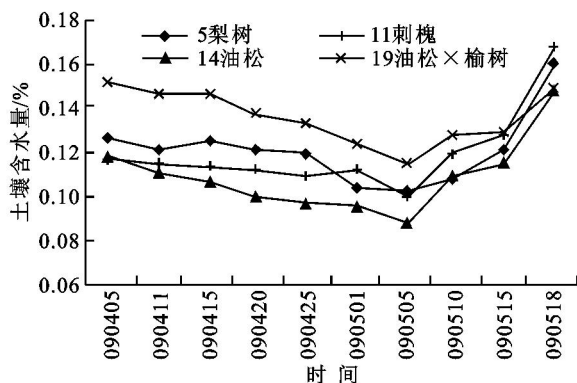


图 1 不同植被类型土壤水分动态变化图

由图 1 可见,不同植被类型样地土壤水分随时间的变化情况较为相似,总体上呈波动先减小后上升趋势,这主要是由于 5 月降水资源较 4 月有了较大增加,土壤水分总体上升。因植被类型不同造成的样地间土壤水分差异较为明显,4 月以油松 × 榆树的土壤水分条件最好,其后依次为梨树、刺槐、油松,5 月各植被类型土壤水分差异不明显。由于植被因子的影响,不同植被类型剖面土壤水分的总体特征出现了一定程度的分异在晋西黄土区春季,降水较少,油松林地表现出较大的变异性。

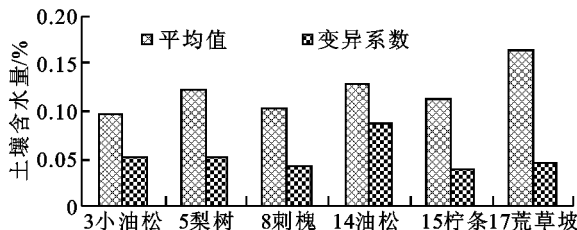


图 2 2009 年 4 月不同植被类型土壤水分均值、变异系数图

由图 2 可以看出,2009 年 4 月全剖面土壤水分平均值荒草坡最高(16.20%),小油松最低(9.64%),减少了 6.56%。土壤水分平均值由高到低的顺序依次为:17 荒草坡 > 14 油松 > 5 梨树 > 15 柠条 > 8 刺槐 > 3 小油松。由此可以看出荒草坡、针

叶树种土壤水分状况较好,刺槐纯林剖面土壤水分条件较差。2009 年 4 月土壤水分变异系数 14 号油松地最高(8.64%),柠条最低(4.16%),减少了 4.48%。土壤水分变异系数由高到低的顺序依次为:14 油松 > 3 小油松 > 5 梨树 > 17 荒草坡 > 8 刺槐 > 15 柠条。可见在降水量比较贫乏的情况下,针叶林的变异程度较大,刺槐、柠条灌丛等变异程度较小。

一般来说,在相同立地条件下,土壤含水量裸地 > 荒草地 > 灌木林地 > 乔木林地^[12]。然而灌木林柠条的土壤水分含量确比 14 号油松和 5 号梨树的低,这可能与柠条种植的密度过大有关系。3 号样地小油松是 2008 年刚种植的,由于人为干扰严重,地面覆盖植被很少,蒸腾量大,造成土壤水分含量较低。

3.2 造林密度对土壤水分动态变化影响

选择坡向和坡度基本相同但密度不同的刺槐纯林土壤水分状况进行对比,8 号样地的密度为 3 m × 5 m,11 号样地的密度为 1.5 m × 4 m。由图 3 可见,在相似坡向,不同密度的刺槐纯林中,土壤水分含量在 3 m × 5 m 株行距的刺槐林中要比 1.5 m × 4 m 的大,可见密度的大小对土壤水分的影响明显。密度过大,植物生长需水量增加,对土壤水分过度利用,造成土壤干化^[13];但是密度过小,植被对水土资源的保护能力较差,土壤保蓄降水的能力较小,土壤水分含量偏低。因此,黄土区造林密度不宜过大或过小,以适应有限的土壤水分资源^[14]。

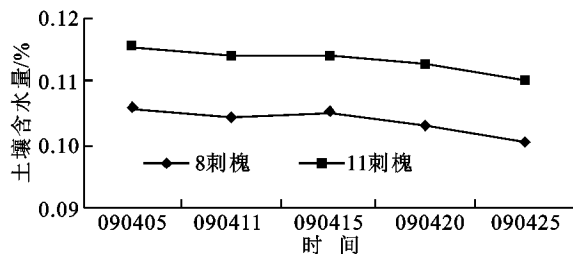


图 3 不同密度刺槐林土壤水分动态变化图

3.3 坡向对土壤水分动态变化影响

将试验区坡向不同的油松纯林(13 号油松为阳坡;14 号油松为阴坡)土壤水分状况进行对比,见图 4。

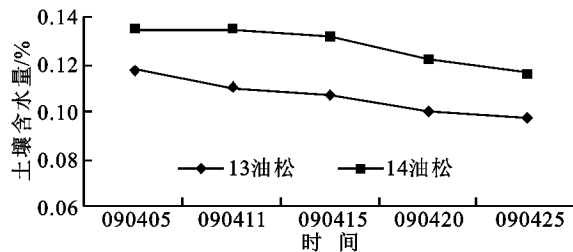


图 4 不同坡向土壤水分动态变化图

由图 4 可以看出,坡向对土壤水分的影响非常显著,油松纯林土壤水分阴坡明显好于阳坡。由于不同坡向的坡面接收太阳辐射能量值存在较大差

异,使得不同坡向植物蒸腾、土壤蒸发水平产生较大差别,形成土壤水分的坡向差异性。无论何种地类,阴、阳坡土壤含水量差异都是显著的,因为阳坡日照时数大于阴坡,太阳直接辐射多,土壤温度及土壤上方空气的温度均比阴坡高。阳坡长期干燥,植物种类少,使阳坡土壤的形成速度明显低于阴坡,加上降水引起的土壤侵蚀严重,土层薄,结构不佳,土壤保

水能力差,这些因子的综合作用,致使阳坡土壤水分蒸发增加,植物蒸腾加剧,阳坡消耗水分比阴坡多,使得阳坡土壤水分含量少于阴坡。

3.4 土壤水分剖面动态变化

3.4.1 剖面土壤水分分布特征 试验区各样地剖面土壤水分含量随时间变化呈现出不同的剖面分布特点,见图 5。

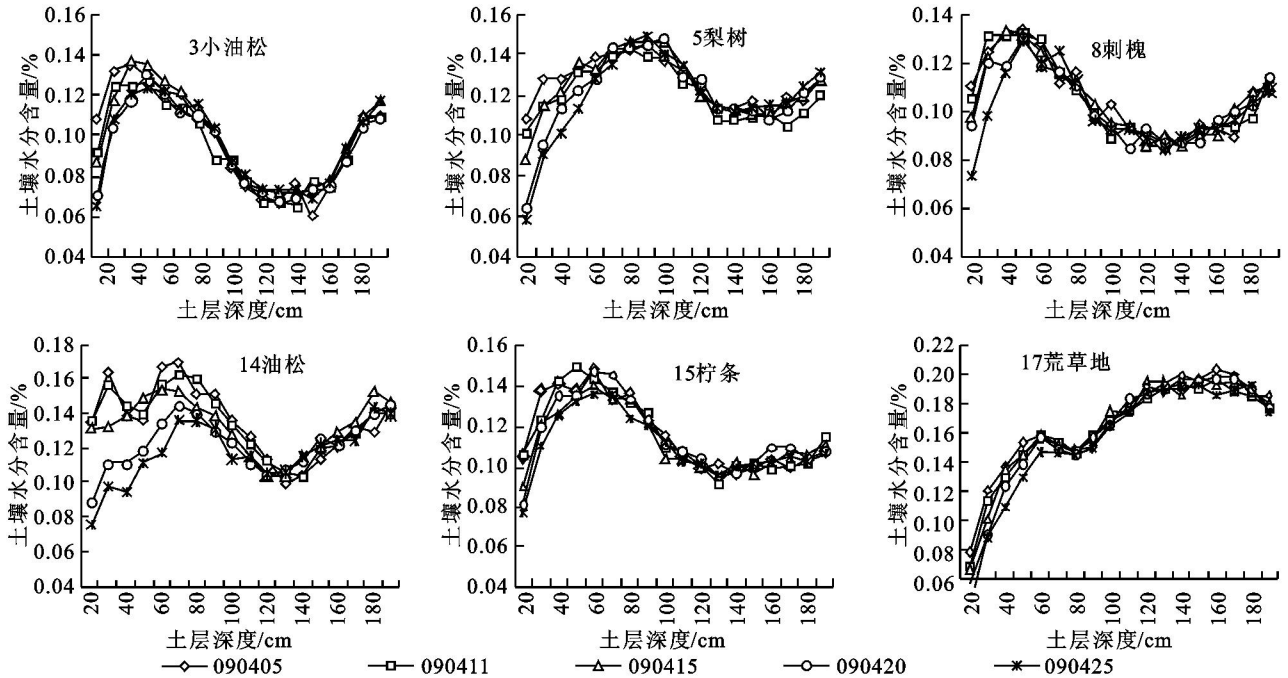


图 5 土壤水分剖面分布图

由图 5 可以看出,4 月份各样点土壤水分含量都会呈现较为规则的剖面分布特点。有林地 50 - 120 cm 之间土壤水分含量呈下降趋势,120 cm 以下不断增加,而荒草地在 20 - 160 cm 之间土壤含水量基本呈上升态势,这是荒地 with 林地的一个主要区别。剖面不同部位土壤水分含量差异较大,而且随土层深度变化的波动性也较大,这与降水入渗和土壤蒸发、植物蒸腾强烈的相互作用有很大关系。2009 年 4 月,当地降雨量很小,属于干季,同时,植物生长旺盛,需水量增大,小油松、刺槐、油松、柠条、梨树土壤下层(60 - 140 cm)水分含量减少;140 - 190 cm 土壤水分含量又继续增加,显示出较大的波动性。荒草地下层土壤水分含量明显比上层大,这主要是由于其表层土壤蒸发强烈。所有表层测点土壤水分均比下部要小,这主要是由土壤表层植被为维持正常的生长不断吸水,同时表层土壤蒸发强烈所致。

植被类型对土壤水分剖面分布特征有重要影响,根系的分布区域决定了不同样地土壤剖面水分低分布区的数量和位置,植被冠幅的形态决定了对表层土壤水分的保存能力,直接影响了表层土壤水分的含量^[15]。通过对不同样地剖面土壤水分观测

数据的统计学分析,得出了随剖面深度变化的土壤水分均值变化(图 6)。

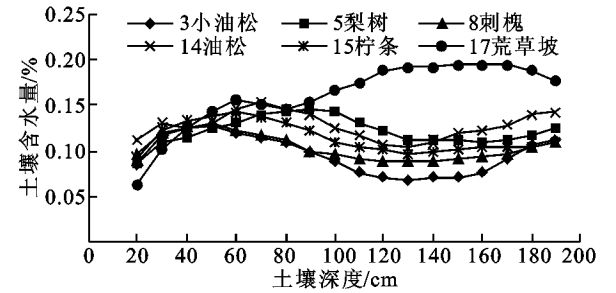


图 6 土壤剖面水分分布均值图

由图 6 可见,自表层向下 2 m 深土层中,土壤水分随深度的变化有 2 种情况,先增加后减小再增加的倒“S”型,包括梨树、小油松、刺槐、油松、柠条,由于表层土壤水分的蒸发,在 20 - 60 cm 出现了土壤水分由小到大的增加过程,而后土壤水分含量开始下降。一般在 120 - 140 cm 降到最低点。如油松由表层含水量 11.30 % 升至 15.27 % (20 - 70 cm 处),而后下降,在 130 cm 土层降至最低点 10.47 %,而后上升至 14.34 %。

荒草地呈两次增减变化,其土壤水分表现出较大幅度的增减变化(6.26 % ~ 19.57 %),主要由于表

层土壤水分的强烈蒸发、不同灌丛根系分布深度不同和根系吸水层次相对集中造成的,使土壤剖面上形成了两个极低的土壤水分含量区(0 - 20 cm 土壤水分含量 6.26 %;70 - 80 cm 土壤水分含量 14.67 %)。

不同植被类型样地剖面土壤水分的变化形状虽然相近,但由于不同植物的生物学特性,土壤水分增减拐点在土壤剖面上的位置有一定的差别,最大值与最小值之间的差异也较大。

3.4.2 剖面土壤水分变异特征 通过对不同植被类型剖面土壤水分观测数据进行统计学分析,得出了随剖面深度变化土壤水分的变异情况。土壤水分的变化程度,以变异系数 C_v 作为指标,变异系数越大,说明土壤水分变化越剧烈;变异系数较小,说明土壤水分变化轻微。

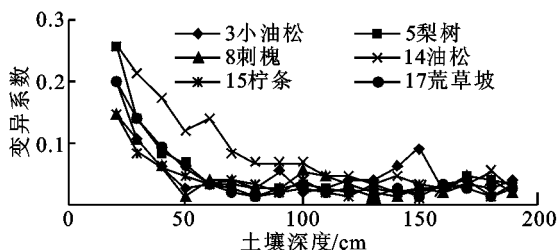


图 7 土壤剖面含水量变异系数图

由图 7 可以看出,各样地表层土壤水分的变异程度最大,而底层变异系数较小。在 0 - 100 cm 土层土壤水分变异系数呈减小趋势,而在 100 - 200 cm 土层土壤水分变异系数基本保持不变。但由于植被类型不同,不同样地土壤水分具体变异情况有一定差异,利用各林地剖面土壤水分变异系数变化的拐点位置,划分土壤剖面的土壤水分速变层和土壤水分稳定层。

油松林地的变异系数在剖面的变动范围最大,在 20 - 90 cm 土层由 25.59 %降至 2.64 %,0 - 120 cm 变化迅速,而 120 - 190 cm 变化相对平缓,100 - 120 cm 土层为土壤水分速变层与稳定层的界限。小油松的变异程度相对较小,在 20 - 60 cm 土层由 20.40 %速降至 3.02 %,在 60 - 190 cm 土层中基本保持在 4.12 %左右,50 - 60 cm 土层为土壤水分速变层与稳定层的界限。刺槐林地的变异系数在 20 - 60 cm 土层由 14.94 %速降至 1.30 %,而后升高至 5.56 %,50 - 60 cm 土层为土壤水分速变层与稳定层的界限。梨树的变异系数在 20 - 190 cm 土层由 26.14 %降至 1.40 %,0 - 80 cm 变化迅速,而 80 - 190 cm 变化较平缓,60 - 80 cm 土层为土壤水分速变层与稳定层的界限。柠条灌丛的变异系数在 20 - 80 cm 土层由 14.51 %降至 3.67 %,80 - 190 cm 土层变异系数保持在 2.72 %左右,60 - 80 cm 土层为土壤水分速变

层与稳定层的界限。灌草坡的变异系数由 20 - 80 cm 土层的 19.92 %迅速降至 1.13 %而后趋于平缓,在 80 - 190 cm 土层保持在 2.33 %左右,60 - 80 cm 土层为土壤水分速变层与稳定层的界限。

综上所述,除油松林地 100 - 120 cm 土层为土壤水分速变层与稳定层的界限外,其他样地基本可以将 60 - 80 cm 土层作为土壤水分速变层和稳定层的分界限。

4 结论

(1) 黄土丘陵沟壑区 5 月份的土壤含水量有较大的升高,在春季荒草坡土壤水分状况最好,针叶林、经济林土壤水分条件较好,柠条灌丛土壤水分条件一般、刺槐纯林土壤水分条件最差。土壤水分随林分密度的变化规律较为明显,黄土区造林密度不宜过大或过小,以适应有限的土壤水分资源。由于坡向的不同造成土壤水分的差异规律是非常明显的,油松与刺槐纯林土壤水分阴坡明显好于阳坡。

(2) 不同部位土壤水分含量差异较大,形成剖面土壤水分总体上高下低的分布特征。油松、刺槐、梨树、柠条等呈先增加后减小再增加的倒“S”型;荒草坡为先增加而后减少的抛物线型。各样地表层(0 - 20 cm)土壤水分的变异程度最大,在 20 - 80 cm 土层土壤水分变异系数呈减小趋势,而在 80 - 190 cm 土层土壤水分变异系数基本保持不变。除油松林地 100 - 120 cm 土层为土壤水分速变层与稳定层的界限外,其他样地基本可以将 60 - 80 cm 土层作为土壤水分速变层和稳定层的分界限。不同植被类型剖面土壤水分的总体特征出现了一定程度的分异,油松林地表现出较大的变异性。

参考文献:

- [1] 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [2] 孙中峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 81-85.
- [3] 傅伯杰,王军,王克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响[J]. 中国科学基金, 1999(4): 225-227.
- [4] 张雷明,上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 59-63.
- [5] 李开元,韩仕峰,曹雄飞,等. 陕北黄土丘陵沟壑区旱地土壤水分动态[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 21-25.
- [6] 原焕英,许喜明. 黄土高原半干旱丘陵沟壑区人工林土壤水分动态研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 5-8.

(下转第 100 页)

原则,贯彻退耕还林政策,调整优化农业结构与布局,转变农业增长方式,因地制宜,合理、适度利用土地,提高土地利用率和产出率,实现土地利用生态、经济、社会效应的统一,以利于农业的可持续发展。

参考文献:

- [1] Costanza R D, Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] Daily G C, Soderqvist T, Aniyar S, et al. Ecology- The value of nature and the nature of value [J]. *Science*, 2000, 5478: 395-396.
- [3] 张津涛, 张建军, 郭小平. 晋西黄土残塬沟壑区沙棘生物量及水土保持效益的研究[J]. *北京林业大学学报*, 1993, 15(4): 118-124.
- [4] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱. 海南岛生态系统土壤保持空间分布特性及生态经济价值评估[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 552-558.
- [5] 肖寒, 欧阳志云. 森林生态系统服务功能及其生态价值评估初探[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 481-484.
- [6] 苏朝阳, 苗长虹. 开封市土地利用时空变化的生态系统服务价值评估[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(5): 116-119.
- [7] 莫源富, 周立新. TM 数据在土地利用动态监测中的应用[J]. *国土资源遥感*, 2000(2): 113-117.
- [8] 周乐群, 孙长安, 高改萍, 等. 长江三峡工程库区生态环境遥感动态监测[J]. *国土资源遥感*, 2005(1): 49-52.
- [9] 田贵全, 张明才. 山东省生态环境遥感监测[J]. *国土资源遥感*, 2006(4): 63-67.
- [10] 陈强, 陈正江, 张兴国, 等. 基于 RS/ GIS 的艾比湖沿岸绿洲生态系统服务功能价值及其演变[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(2): 79-82.
- [11] 李晶, 任志远. 基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统水土保持价值评价[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(12): 2796-2803.
- [12] 申海建, 郭荣中, 江艺明, 等. 基于 RS 和 GIS 的土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(11): 4781-4783.
- [13] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-195.
- [14] 段瑞娟, 郝晋珉, 张洁瑕. 北京区位土地利用与生态系统服务价值变化研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 21-28.
- [15] 万利, 陈佑启, 谭靖, 等. 土地利用变化对区域生态系统服务价值的影响[J]. *地域研究与开发*, 2009, 28(4): 95-99.
- [16] 田耀武, 王建东, 张世平. 郑州西南绕城高速公路不同时期生态系统服务价值研究[J]. *中南公路工程*, 2006, 31(3): 81-86.
- [17] Wu S, Li J, Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models[J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 2005, 10: 33-42.
- [18] 田耀武, 黄志霖, 曾立雄, 等. DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(4): 846-853.
- [19] Tang G A, Zhao M D, Li T W, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in loess plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 824-830.
- (上接第 96 页)
- [7] 路保昌, 薛智德, 朱清科, 等. 干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 62-65.
- [8] 王志强, 刘宝元, 海春兴, 等. 晋西北黄土丘陵区不同植被类型土壤水分分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(4): 53-58.
- [9] 王云强, 张兴昌. 黄土区小尺度坡面土壤含水率时空变异性研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 32-37.
- [10] 周海光, 刘广全, 焦醒, 等. 黄土高原水蚀风蚀复合区人工植被土壤水分状况[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 194-197.
- [11] 陈云明, 侯喜禄, 刘文兆. 黄土丘陵半干旱区不同类型植被水土保持生态效益研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(9): 57-61.
- [12] 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): 20-24.
- [13] 李世荣, 张卫强, 贺康宁. 黄土半干旱区不同密度刺槐林地的土壤水分动态[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(2): 28-32.
- [14] 王百田, 杨雪松. 黄土半干旱地区油松与侧柏林分适宜土壤含水量研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 80-83.
- [15] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(4): 6-9.