

云雾山自然保护区环境因素对土壤水分空间分布的影响

胡相明¹, 赵艳云¹, 程积民², 万惠娥²

(1. 滨州学院城市与环境系 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室 山东滨州 256600;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

摘要:选取黄土高原云雾山自然保护区天然草地, 研究分析了地形因素、植被类型、降雨和封育措施对土壤水分的影响, 研究结果表明: 在 0 ~ 100 cm 土壤, 单点季节平均土壤含水量的空间变化主要受坡向、坡位、群落类型和封育措施的影响; 在深层土壤 100 ~ 300 cm, 相对海拔、坡位、坡向、群落类型和封育措施在控制土壤水分的再分布中具有重要作用。不同的环境因素对土壤水分空间分布影响的季节变化存在明显差异, 坡度、相对海拔、坡位与土壤湿度的关系依赖于前期降雨量, 土壤湿度和坡度、海拔、坡位和封育措施的相关性一般随前期降雨的增加而增大。群落类型对土壤湿度的影响与群落盖度和蒸腾速率有关, 在植被盖度差异较大的 5 月份和蒸腾速率差异较大的 7 月份影响显著。坡向对土壤湿度的影响依赖于太阳辐射的变化, 在太阳辐射较强烈的 7 月份差异显著。由于长期自然封育, 草地覆盖度不断增加, 其蓄水保水能力增强, 对土壤水分的调节能力得到提高, 从而能在一定程度上改善土壤水分条件。

关键词:天然草地; 土壤水分; 地形因素; 植被类型; 封育

文章编号: 1000-0933(2008)07-2964-08 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Impacts of environmental factors on spatial distribution of soil moisture of grassland in Yunwu Mountain

HU Xiang-Ming¹, ZHAO Yan-Yun¹, CHENG Ji-Min², WAN Hui-E²

1 Department of Urban and Environment, Key laboratory for Eco-environment Sciences Yellow River Delta of Shandong Province, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256600, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 2964 ~ 2971.

Abstract: This article analyzed the effect of topography attributes, vegetation type, rainfall and enclosing on the soil moisture in grassland of the Yunwu Mountain. Results showed that the environmental attributes play controlling roles in the spatial distribution of grassland soil moisture. However, the contribution of these environmental indices varies with soil depth. The dominant controls on spatial variability of the time-averaged soil moisture changed from aspect, hill-slope position, community types and enclosing in the soil depth of 0 — 100 cm to relative elevation, hill-slope position, aspect and

基金项目:国家重点基础研究发展计划 973 资助项目(2007CB106803); 国家科技支撑课题资助项目(2006BAD09B08); 国家自然科学基金重点资助项目(30230290); 国家林业局荒漠化检测专项资助项目; 滨州学院青年人才创新工程资助项目

收稿日期:2007-12-08; **修订日期:**2008-04-14

作者简介:胡相明(1981 ~), 男, 山东泰安人, 硕士, 主要从事植物修复与草地生态学研究. E-mail: xiangming0727@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Program of China (No. 2007CB106803); Supported by National Great Project of Scientific and Technical Supporting Programs Funded by Ministry of Science & Technology of China During the 11th Five-year Plan (No. 2006BAD09B08); Supported by Major Program of National Natural Science Foundation of China (No. 30230290); Special Fund in Desertation Supervision of National Forest State, China; Supported by Innovation Project for young person with ability in Bin Zhou university

Received date: 2007-12-08; **Accepted date:** 2008-04-14

Biography: HU Xiang-Ming, Master, mainly engaged in plant restoration and grassland ecology. E-mail: xiangming0727 @ 163. com

enclosing for deeper soil layer of 100—300 cm. The dynamic behavior of influences of different environmental indices on the layer-averaged soil moisture depends on several factors. In general, the correlation of soil moisture with slope gradient, elevation, slope position and enclosing showed a more significant increase following a greater amount of antecedent precipitation. It was observed that the influence of community types on soil moisture corresponds to the difference in community coverage and transpiration, with a stronger influence in May and July when have a greater difference in vegetation. The influence of aspect depends on solar irradiation, and is significant in July having intense solar irradiation. Being enclosed for a long time, the grassland coverage gradually increased, and water holding ability is boosted up, thus vegetation accommodation ability and redistribution ability for soil water are improved. Therefore, naturally enclosed grassland controls effectively soil water transport from air to vegetation and to soil, thus improves grassland hydrologic cycle.

Key Words: nature grassland; soil water; topographic attributes; vegetation type; enclosing

黄土丘陵区地貌类型的复杂多样,造成了土壤水分条件的千差万别,进而影响到植物的生长与分布。因此,了解该地区土壤水分的空间变异规律对该植被的恢复和重建具有重要指导意义。大量研究表明,土壤水分空间变异性受多种因素影响,其中地形作为关键影响因素在土壤水分空间变化中起着重要作用^[1~4];此外,植被类型的差异对截持降雨、阻滞径流以及减少土壤水分蒸发等水文过程具有重要影响^[5~10]。由于黄土丘陵区特殊的地理条件和气候特征,加上长期的掠夺式利用,原有自然植被破坏殆尽,以至于目前这方面的研究多集中于人工草地,而对天然草地研究较少。天然草地具有与环境相适应的群落类型、物种组成等,并按自然规律演替与发展,其土壤水分与环境的关系可能与人工植被有所不同。所以本文选取黄土丘陵区经过 20 多年自然封育形成的天然草地,从坡面尺度调查研究土壤水分,基于野外观察资料分析环境因子与土壤水分的定量关系,旨在探究土壤水分的空间分布规律,以期为该地区合理的植被建设提供理论依据和可借鉴的实例。

1 研究地点与方法

1.1 研究区域自然概况

试验地设于宁夏云雾山自然保护区,该区位于宁夏固原市东北部,东经 106°24′~106°28′,北纬 36°13′~36°19′,海拔高度 1 800~2 100 m,坡度 15~40°。南北长 11 km,东西长 4.5 km,总面积 6 000 hm²。该区位于黄土高原的中间地带,山体浑圆,山坡平缓,黄土层深厚,土壤类型为山地灰褐土和黑垆土。保护区属于中温带半干旱气候区,年平均气温 5℃;7 月份最热,气温在 22~25℃之间;1 月份最冷,平均最低气温 -14℃;≥0℃ 积温 2 370~2 882℃。年日照时数为 2 500 h,年平均无霜期 137 d。年均降水量 411.5 mm,季节分配不均,60%集中于 7~9 月份。该区自 1982 年开始封山禁牧,主要草本植物有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、厚穗冰草(*Aneurolepidium dasystachys*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Ajania sacrorum*)、星毛萎陵菜(*Potentilla acaulis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、直茎点地梅(*Androsace erecta*)等。

1.2 实验样地的选择与布置

在云雾山自然保护区,选择不同坡向(阴坡、阳坡)的典型地段,设置了 7 条沿坡底到山顶的样带,并在退化草地设置了一条对照样带,共计有 8 条样带。在每条样带上每隔 30 m 设一个 1 m×1 m 小样方,每条样带设置样方 6~11 个,共 57 个(表 1)。

1.3 土壤水分的测定及植被状况调查

在 2005 年 5~9 月份,每月中旬在每个样方用土钻取土,20 cm 为一层,深至 300 cm。带回实验室在 105℃ 下烘至恒重。

每个样方调查植物种的高度、盖度、密度、地上生物量,并计测周围的环境因子海拔、坡位、坡度、坡向等。

1.4 降雨量的测定

在实验区不同坡向设置 2 个降雨观测点(每个点 2~3 个量雨筒),记录每次降雨的雨量。

表 1 所设样带的一般特征

Table 1 The characteristic of samples

环境条件 Environmental factors	样带 1 Sample 1	样带 2 Sample 2	样带 3 Sample 3	样带 4 Sample 4	样带 5 Sample 5	样带 6 Sample 6	样带 7 Sample 7
坡度 Slope(°)	10 ~ 20	10 ~ 20	10 ~ 25	10 ~ 25	10 ~ 30	10 ~ 20	10 ~ 25
坡向 Aspect	Sunny slope	Half-sunny slope	Half-sunny slope	Half-sunny slope	Half-shady slope	Shady slope	Shady slope
海拔 Elevation(m)	1950 ~ 2000	1960 ~ 2020	1950 ~ 2010	1960 ~ 2000	1950 ~ 2020	1960 ~ 2010	1945 ~ 2010
植被类型 vegetation types	<i>Stipa bungeana</i>	<i>Stipa bungeana</i>	<i>Stipa bungeana</i> + <i>Thymus mongolicus</i>	<i>Stipa bungeana</i> + <i>Thymus mongolicus</i>	<i>Ajanía sacrorum</i> + <i>Stipa bungeana</i>	<i>Ajanía sacrorum</i> + <i>Stipa bungeana</i>	<i>Ajanía sacrorum</i> + <i>Stipa bungeana</i>
样带长度 Length of sample(m)	240	240	210	240	240	240	240
样点数 Number of plots	8	8	6	7	9	11	8

2 数据处理

把影响土壤水分空间分布的环境因子分为两类,一类为定量因子,如:海拔、坡度等;一类为定性因子,如:坡位、坡向、植被类型和封育措施等。用简单相关分析研究定量指标对土壤水分的影响,用方差分析(*T* 检验)研究定性指标对土壤水分的影响。同时将土壤水分划分为单点季节平均含水量和所有点的月平均含水量,前者指 5 ~ 9 月份每个样地土壤水分的平均值;后者指每月测定样地的 0 ~ 300cm 土壤含水量的平均值。

3 结果与分析

3.1 环境因素对单点季节平均含水量空间分布的影响

3.1.1 海拔和坡度与土壤水分关系的垂直变化

不同土层的含水率与相对海拔和坡度的关系如图 1 所示,从图中可以看出,土壤含水率与相对海拔呈负相关,且负相关系数随土层加深而增大,在 140 ~ 300 cm 土壤深度相关性达到显著性水平。这与 Qiu 等在黄土高原上的研究结果相反^[11],主要是由于本研究区经过长期自然封育,土壤物理性质明显较好,尤其是低海拔地区的表层土壤透水和保水能力较强、土壤孔隙度大、稳定入渗速率高(表 2),因而有较多的水分通过垂直入渗进入深层土壤。

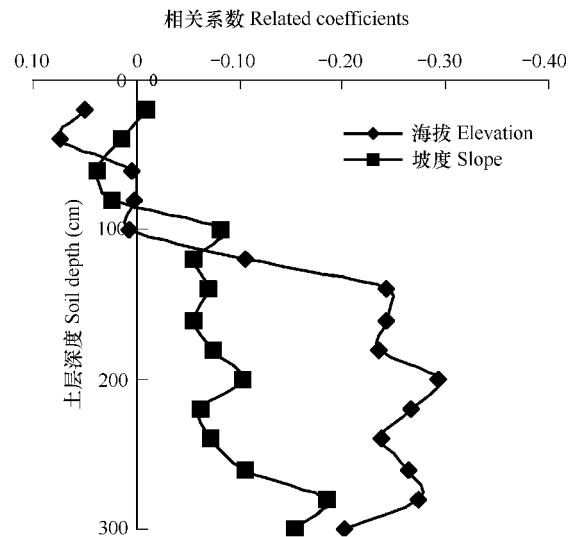


图 1 相对海拔和坡度与土壤剖面含水量的相关性
Fig. 1 The related coefficients between elevation, slope and soil moisture in different depth

表 2 不同海拔高度、坡位对土壤孔隙度和稳定入渗速率的影响

Table 2 The influence of elevation, slope position on soil porosity and soil steady water infiltration rate

海拔 Elevation(m)	坡位 Slope position	毛管孔隙度 Capillary porosity (0 ~ 80cm, %)	稳渗速率 Soil steady water infiltration rate (mm/min)
2030	上坡 Up-slope	60	0.47
1980	中坡 Mid-slope	67	5.00
1940	下坡 Down-slope	69	5.51

由图 1 可以看出,坡度与 100 ~ 300 cm 土壤含水量基本呈负相关,且相关性随着土层加深逐渐增大,并在土壤深层(260 ~ 300 cm)达到显著性水平,这与 Qiu 等的研究结果又有明显差异^[11],主要是因为本区域植被盖度较高,可以减少土壤表层水分的蒸腾,并对地表径流有一定的阻滞作用,因此在不同坡度条件下,表层土

壤水分相差不大;但是陡坡草地降雨入渗相对较弱,所以就出现了坡度对深层土壤水分影响较强地现象。

3.1.2 坡位和植被类型等定性指标对土壤水分垂直分布的影响

从图 2 可以看出,在不同土层,坡位对土壤水分的影响存在明显差异,即对土壤表层影响较小,对深层影响较大。在 0~120cm 土层,单因素方差分析的 F 值变化在 0.5~2.6 之间,影响不显著;在 140~300cm 土层, F 值变化在 4.4~9.6 之间,影响极显著。在同一土层,土壤水分从上坡到下坡呈逐渐增大趋势,即下坡>中坡>上坡(表 3),这与先前的研究结果相一致。

由表 4 可知,不同坡向的土壤水分存在明显的差异,其总体变化趋势为阴坡>半阴半阳坡>阳坡,其中阴坡的含水量要比阳坡的高出 3%~5%。一方面是由于阳坡太阳辐射较强,土壤水分蒸发强烈;另一方面是因为阳坡土壤坚实、孔隙度小,入渗速率慢(表 5)。然而在不同土层,坡向对土壤湿度的影响存在一定差异,在土壤剖面上的总体变化趋势为随土层加深而增大。这与 Qiu 等的研究结果存在明显差异^[11],这主要是长期的自然封育削弱了地表蒸发对表层土壤水的影响。

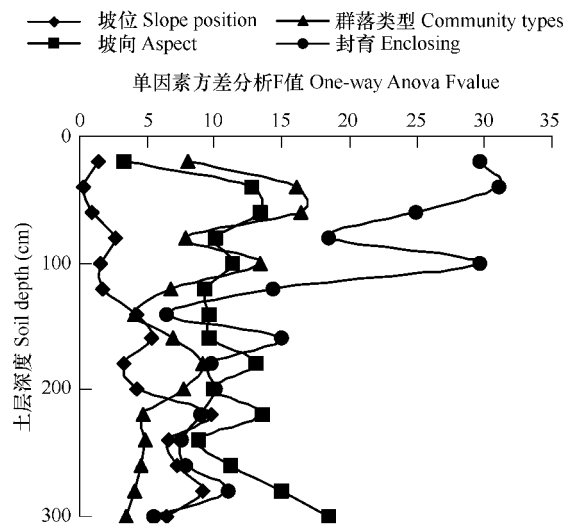


图 2 坡位、坡向、群落类型和封育对土壤剖面含水量的影响

Fig. 2 The effect of slope position, aspect, community stypes and enclosing on soil moisture in different depth

表 3 坡位对平均土壤含水量的影响

Table 3 The influence of slope position on average soil moisture

坡位 Slope position	上坡 Up-slope	中坡 Mid-slope	下坡 Down-slope
0~300cm	11.26±0.26	11.92±0.31	12.43±0.38
单点季节平均含水量 Season-average soil moisture in one plot			
0~20cm	16.24±0.66	15.87±0.70	17.47±0.68
20~40 cm	13.56±0.50	13.95±0.55	14.15±0.53
40~60 cm	13.53±0.48	14.18±0.49	14.41±0.53
60~80 cm	13.04±0.41	13.79±0.45	14.92±0.83
80~100 cm	12.34±0.33	12.91±0.42	13.35±0.49
100~120 cm	11.57±0.33	12.58±0.74	12.89±0.50
120~140 cm	11.08±0.31	11.68±0.30	13.20±0.84
140~160 cm	10.70±0.27	11.64±0.30	12.17±0.41
160~180 cm	10.27±0.29	11.01±0.32	11.39±0.34
180~200 cm	10.01±0.28	10.81±0.28	11.25±0.36
200~220 cm	9.36±0.19	10.61±0.28	10.92±0.34
220~240 cm	9.27±0.18	11.10±1.11	11.06±0.37
240~260 cm	9.31±0.22	9.65±0.29	10.82±0.36
260~280 cm	9.23±0.21	9.59±0.24	10.83±0.36
280~300 cm	9.18±0.23	9.39±0.24	10.54±0.36
所有点的月均土壤含水量 Month-average soil moisture in all plots			
5 月份 May	12.94±0.38	13.86±0.42	14.91±0.59
6 月份 June	10.19±0.52	10.38±0.41	11.46±0.39
7 月份 July	9.70±0.44	10.41±0.65	9.86±0.42
8 月份 August	9.10±0.30	9.14±0.67	9.95±0.45
9 月份 September	10.01±0.40	10.03±0.42	10.43±0.57

表 4 坡向对土壤含水量的影响

Table 4 The effect of aspect on soil moisture

坡向 Aspect	阳坡 Sunny slope	半阴半阳坡 Half-sunny slope	阴坡 Shady slope
0~300cm	9.62±0.36	11.88±0.22	12.95±0.38
单点季节平均含水量 Season-average soil moisture in one plot			
0~20cm	13.78±0.99	16.69±0.51	17.42±0.71
20~40 cm	9.64±0.32	14.48±0.40	14.15±0.52
40~60 cm	9.85±0.39	14.53±0.38	14.53±0.52
60~80 cm	9.71±0.45	14.30±0.42	14.69±0.71
80~100 cm	9.80±0.48	13.02±0.30	13.84±0.49
100~120 cm	9.47±0.50	12.46±0.40	13.37±0.57
120~140 cm	9.25±0.50	12.10±0.42	12.92±0.46
140~160 cm	9.51±0.48	11.46±0.23	12.59±0.44
160~180 cm	8.78±0.44	10.83±0.22	12.15±0.43
180~200 cm	9.56±0.77	10.40±0.19	12.15±0.43
200~220 cm	8.94±0.44	10.03±0.18	11.70±0.39
220~240 cm	8.95±0.40	9.85±0.18	13.12±1.76
240~260 cm	9.05±0.43	9.57±0.20	11.38±0.41
260~280 cm	9.02±0.41	9.47±0.17	11.47±0.44
280~300 cm	9.10±0.39	9.19±0.17	11.55±0.45
所有点的月均含水量 Month-average soil moisture in all plots			
5 月份	10.12±0.31	12.11±0.33	13.67±0.49
6 月份	10.22±0.89	10.49±0.30	11.43±1.09
7 月份	9.29±0.37	9.86±0.38	12.28±0.60
8 月份	9.22±0.87	9.11±0.29	10.73±0.67
9 月份	9.59±0.86	10.31±0.27	11.09±0.52

表 5 坡向对土壤容重、孔隙度和稳定入渗速率的影响

Table 5 The effect of aspect on soil bulk density, soil porosity and Soil steady water infiltration rate

坡向 Aspect	容重 Soil bulk density (0 ~ 80cm)	毛管孔隙度 Soil porosity (0 ~ 80cm, %)	稳渗速率 Soil steady water infiltration rate (mm/min)
阳坡 Sunny slope	1.10	46.20	5.55
半阴半阳 Half-sunny slope	1.14	46.57	3.73
阴坡 Shady slope	1.19	54.45	2.57

植被类型是影响土壤水分空间变异的重要因素,其对土壤水分的影响主要表现在:通过冠层截持影响降雨分配格局;通过遮蔽表层土壤影响蒸发速率;以及通过蒸腾作用从土壤中吸收水分。这些因素对土壤水分的影响程度与植被类型、植物密度以及季节变化有关。图 2 显示群落类型对土壤湿度具有显著影响,其影响程度随土壤深度增加而减弱。在 0 ~ 200 cm 土层,其影响程度达到极显著性水平,在 200 ~ 300cm 土层影响程度有所减小,但仍达到显著性水平。这是由于 0 ~ 200cm 是植物根系主要分布区,即主要的水分利用区。表 6 显示了不同群落类型下土壤平均含水率的差异,其大小顺序为本氏针茅 > 本氏针茅 + 百里香 > 铁杆蒿 + 本氏针茅。其中铁杆蒿 + 本氏针茅群落在 0 ~ 300 cm 土层的含水率比其他植被类型明显的低,这是因为该群落的根系比其他群落深,且耗水量大,同时铁杆蒿群落对表层土壤的改良较差,毛管孔隙度小,入渗速率低,进而土壤含水量较少(表 7)。在 0 ~ 140 cm 土层,本氏针茅群落的土壤湿度明显高于其他两种群落类型,这主要归因于该群落具有较大的覆盖度(表 10),可直接减少地表水分蒸发,同时大量残根可增加表层土壤空隙,促进土壤入渗能力。

表 6 不同群落类型之间土壤水分的差异

Table 6 The influence of community types on average soil moisture

项目 Item	本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i>	本氏针茅 + 百里香 <i>Stipa bungeana</i> + <i>Thymus mongolicus</i>	铁杆蒿 + 本氏针茅 <i>Ajania sacrorum</i> + <i>Stipa bungeana</i>
0 ~ 300cm	13.10 ± 0.26	11.55 ± 0.45	9.82 ± 0.19
单点季节平均含水量 Season-average soil moisture in one plot			
0 ~ 20cm	19.06 ± 0.62	14.59 ± 0.93	13.96 ± 0.60
20 ~ 40 cm	16.18 ± 0.49	13.11 ± 0.66	10.28 ± 0.27
40 ~ 60 cm	16.30 ± 0.46	12.98 ± 0.64	10.52 ± 0.28
60 ~ 80 cm	15.65 ± 0.45	14.41 ± 1.77	10.58 ± 0.28
80 ~ 100 cm	14.37 ± 0.33	11.66 ± 0.60	10.26 ± 0.28
100 ~ 120 cm	13.78 ± 0.56	11.24 ± 0.61	10.04 ± 0.28
120 ~ 140 cm	13.24 ± 0.56	11.16 ± 0.42	10.04 ± 0.37
140 ~ 160 cm	12.43 ± 0.28	11.06 ± 0.42	9.90 ± 0.30
160 ~ 180 cm	11.84 ± 0.27	10.73 ± 0.45	9.17 ± 0.25
180 ~ 200 cm	11.40 ± 0.29	10.79 ± 0.41	9.17 ± 0.23
200 ~ 220 cm	10.81 ± 0.24	10.69 ± 0.45	9.11 ± 0.23
220 ~ 240 cm	11.21 ± 0.78	10.29 ± 0.48	9.20 ± 0.27
240 ~ 260 cm	10.37 ± 0.27	9.98 ± 0.44	8.77 ± 0.22
260 ~ 280 cm	10.22 ± 0.25	10.10 ± 0.43	8.81 ± 0.21
280 ~ 300 cm	9.85 ± 0.25	9.96 ± 0.43	8.85 ± 0.23
所有点的月均含水量 Month-average soil moisture in all plots			
5 月份 May	14.70 ± 0.29	13.24 ± 0.71	10.66 ± 0.41
6 月份 June	10.72 ± 0.42	10.33 ± 0.49	9.53 ± 0.62
7 月份 July	11.32 ± 0.74	10.47 ± 0.73	9.52 ± 0.31
8 月份 August	9.74 ± 0.35	9.53 ± 0.69	9.29 ± 0.44
9 月份 September	10.67 ± 0.59	10.20 ± 0.58	10.05 ± 0.34
盖度 Coverage(%)	84.97 ± 1.45	81.31 ± 2.48	78.76 ± 1.81
生物量 Biomass(g/m ²)	503.30 ± 16.26	520.95 ± 36.99	526.51 ± 21.68

表 7 不同群落类型对土壤孔隙度和稳定入渗速率的影响

Table 7 The influence of community types on soil porosity and soil steady water infiltration rate

群落类型 Community types	毛管孔隙度 Soil porosity (0 ~ 80 cm 土层, %)	稳渗速率 Soil steady water infiltration rate (mm/min)
本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i>	69	5.65
铁杆蒿 + 本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i> + <i>Thymus mongolicus</i>	56	5.40
本氏针茅 + 百里香 <i>Ajania sacrorum</i> + <i>Stipa bungeana</i>	53	3.64

自然封育是退化植被恢复的重要措施之一, 长期自然封育不但能提高植被覆盖度, 也可在一定程度上改善草地生态系统的水分条件, 提高土壤含水量。从图 2 可以看出封育和未封育条件下土壤含水量存在较大差异, 其中封育条件下 0 ~ 120cm 土层的土壤含水量比未封育草地高出 3% ~ 5%, 在 140 ~ 300cm 土层高出 1% ~ 2% (表 8), 这主要是因为自然封育提高了草地覆盖度, 减少了地表水分蒸发, 阻止了地表径流, 增加了土壤水分入渗; 同时自然恢复措施也改变了土壤物理性质, 增加了毛管孔隙度和水分入渗速率 (表 9)。

3.2 环境因素对土壤水分空间变化影响的季节动态

3.2.1 海拔和坡度与对土壤水分空间分布影响的季节动态

大量研究表明, 海拔和土壤湿度的相关性与降雨强度有密切关系。下暴雨时两者相关系数减少, 但随后增加^[11]。这是因为暴雨使不同的海拔区域具有相同的土壤湿度, 然而随着测定时间的延长, 海拔对土壤湿度的影响逐渐增加^[5]。即相关系数的变化跟降雨量和测量时间的滞后期有关。本文研究表明, 2006-05-16 日和 2006-10-01 日 30mm 的降雨引起了 2006-05-19 日和 2006-10-03 日海拔和土壤水分相关系数的显著增加 (图 3), 此外 2006-07-19、2006-07-20 和 2006-07-21 的小雨也提高了 2006-07-23 日两者的相关系数, 但这种相关系数没有达到显著性水平。由于每月只测定一次土壤水分, 测量密度较少, 不能十分准确的描述海拔和土壤水分的关系。

图 3 显示, 坡度与土壤湿度的负相关性在降雨时增加 (例如 2006-07-19、2006-07-20 和 2006-07-21 的降雨使 2006-07-23 日的相关系数升高)。这可能是因为是在降雨过程中, 具有较陡坡度的位置产生了较多的地表径流, 土壤水分含量相对较低。另一个解释可能是陡坡的地方排水较快, 因此在降雨后保持了相对较低的含水量。Qiu 等和 Famiglietti 等发现了相同的规律^[5,11]。

3.2.2 坡位和植被类型等定性指标对土壤水分空间分布影响的季节动态

图 4 显示了坡位对土壤湿度影响的季节变化, 这与海拔跟土壤湿度的关系具有相似的规律。即降雨

表 8 封育措施对土壤水分的差异

Table 8 The influence of enclosing on average soil moisture

土壤深度 Soil depth (cm)	封育 Enclosing	未封育 Unenclosing
0 ~ 300cm	12.26 ± 0.20	9.93 ± 0.29
单点季节平均含水量 Season-average soil moisture in a plot		
0 ~ 20cm	17.47 ± 0.44	12.01 ± 0.62
20 ~ 40 cm	14.62 ± 0.34	10.30 ± 0.47
40 ~ 60 cm	14.67 ± 0.33	10.96 ± 0.45
60 ~ 80 cm	14.53 ± 0.39	10.83 ± 0.42
80 ~ 100 cm	13.43 ± 0.27	10.15 ± 0.34
100 ~ 120 cm	12.85 ± 0.36	9.87 ± 0.33
120 ~ 140 cm	12.31 ± 0.36	10.29 ± 0.53
140 ~ 160 cm	11.81 ± 0.22	9.91 ± 0.39
160 ~ 180 cm	11.13 ± 0.20	9.65 ± 0.49
180 ~ 200 cm	10.92 ± 0.21	9.44 ± 0.32
200 ~ 220 cm	10.46 ± 0.18	9.20 ± 0.31
220 ~ 240 cm	10.69 ± 0.46	9.04 ± 0.27
240 ~ 260 cm	10.09 ± 0.19	8.84 ± 0.29
260 ~ 280 cm	10.06 ± 0.18	8.66 ± 0.29
280 ~ 300 cm	9.83 ± 0.19	8.82 ± 0.33
所有点的月均含水量 Month-average soil moisture in all plots		
5 月份	14.61 ± 0.28	10.78 ± 0.47
6 月份	10.73 ± 0.31	9.71 ± 0.44
7 月份	12.02 ± 0.39	8.81 ± 0.43
8 月份	10.12 ± 0.37	8.23 ± 0.59
9 月份	10.91 ± 0.31	9.30 ± 0.33
覆盖度 Coverage (%)	85.07 ± 0.99	62.38 ± 2.29
生物量 Biomass (g/m ²)	544.64 ± 12.00	310.16 ± 21.01

表 9 封育措施对土壤孔隙度和稳定入渗速率的影响

Table 9 The influence of enclosing on soil porosity and soil steady water infiltration rate

管理措施 Managing measure	毛管孔隙度 Soil porosity (%)	稳渗速率 Soil steady water infiltration rate (mm/min)
封育 Enclosing	65	5.65
未封育 Unenclosing	42	2.97

较大时,坡位对土壤湿度的影响增加,如 2006-05-16 日和 2006-10-01 日 30mm 的降雨引起了 2006-05-19 日和 2006-10-03 日单因素方差分析 F 值的显著增加(图 4)。Famiglietti 等也发现了相似的结果^[5]。

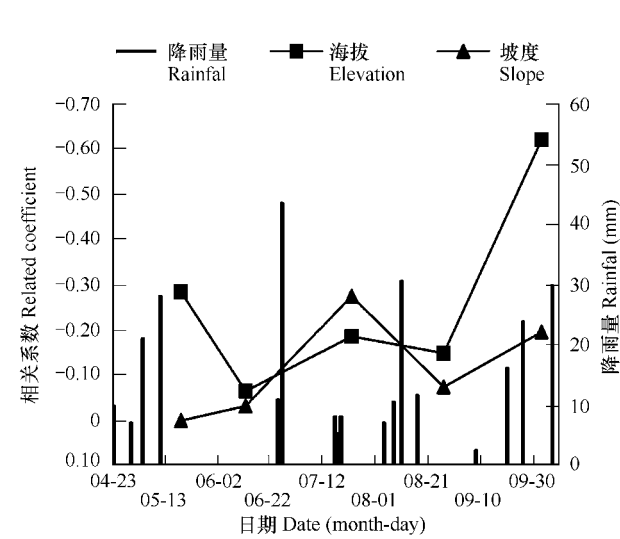


图 3 海拔、坡度对土壤水分影响的季节变化
Fig. 3 The seasonal variety of influence of elevation, slope on soil moisture

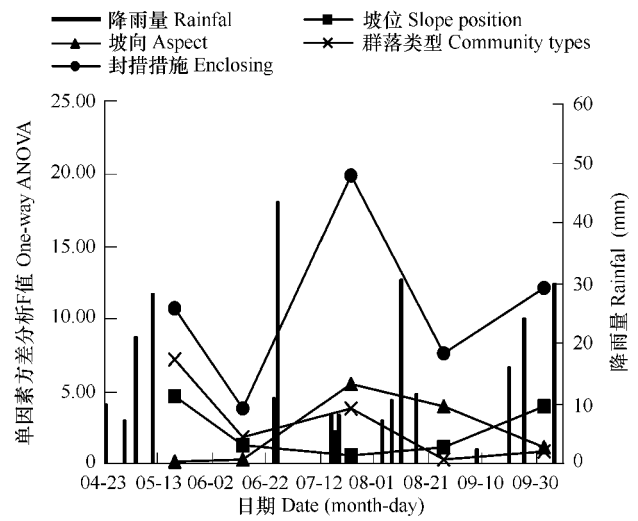


图 4 坡位、坡向、群落类型和封育对土壤水分影响的季节动态
Fig. 4 The seasonal-variety of influence of slope position, aspect, community types and enclosing on soil moisture

在中夏(7,8 月份),坡向对土壤湿度影响显著(图 4)。这是由于在夏天太阳辐射较强烈,不同坡向土壤水分的蒸发存在明显差异;同时,在 7、8 月份植物的生长速率最快,蒸腾速率较大,不同坡向上生长着的不同植被类型的影响差异就较大。

图 4 表明,群落类型对所有点的月均土壤含水量的影响在 5 月份和 7 月份达到显著性水平。在 5 月份,不同群落类型下土壤湿度差异较大(单因素方差分析 F 值最大),这与盖度的差异(表 10)具有较好的对应关系,在 5 月份,本氏针茅具有较大植被覆盖度,而其他两种植被覆盖度较小,这说明该时期土壤湿度的差异主要是由植被盖度造成的,进而形成了入渗速率、排水和蒸发等方面较大的差异。6 月份以后,随着植物生长,3 种群落的盖度没有了明显差异,然而 7 月中旬为植物快速生长期,蒸腾速率达到最大,由于不同植物的蒸腾速率差异较大,此时土壤湿度存在较明显差异, F 值出现了第 2 个峰值。在 8、9 月份,植物的生长速率降低,蒸腾速率下降,土壤湿度差异不明显。

表 10 不同群落类型的盖度

Table 10 The coverage of different community types

群落类型 Community types	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i>	84.56 ± 0.85	85.23 ± 1.31	85.91 ± 1.38	87.5 ± 1.29	93.93 ± 1.32
铁杆蒿 + 本氏针茅 <i>Stipa bungeana</i> + <i>Thymus mongolicus</i>	76.18 ± 1.21	83.75 ± 1.54	87.86 ± 1.35	80.71 ± 1.34	90.00 ± 1.43
本氏针茅 + 百里香 <i>Ajania sacrorum</i> + <i>Stipa bungeana</i>	65.80 ± 2.13	80.67 ± 1.62	83.33 ± 1.51	83.10 ± 1.35	82.50 ± 2.11

图 4 显示,在 5~9 月份,封育措施对土壤湿度都具有显著影响,其中 05-19、07-23 和 10-03 测定的结果差异最显著,是由于这 3 次土壤水分测定是在降雨后进行的。降雨时具较高盖度的封育草地能有效阻滞地表径流,增加降雨入渗,因此降雨后封育措施对土壤水分的影响增强。

4 结论

土壤水分作为影响植物生长的重要环境因子,其空间变化是降雨入渗、土壤水分再分布、蒸发散等水文过

程综合作用的结果。降雨、地形和植被类型是影响土壤水文过程的主要因素,其在控制单点季节平均含水量、所有点的月均含水量的空间变化中起着重要作用。环境因素控制含水量中的作用在不同土层存在明显差异,在 0~100 cm 土层,单点季节平均含水量的空间变化主要受坡向、坡位、群落类型和封育措施的影响;在深层土层 100~300cm,相对海拔、坡位、坡向、群落类型和封育措施在控制土壤水分的再分布具有重要作用。由于群落类型对土壤水分的影响,地形因素所起的作用有所减弱。不同的环境因素对土壤水分空间分布影响的季节变化存在明显差异。坡度、相对海拔和坡位与土壤含水量的关系依赖于前期降雨量。一般情况下,土壤湿度和坡度、海拔、坡位和封育措施的相关性随前期降雨的增加而增大。群落类型对土壤湿度的影响与群落盖度和蒸腾速率有关,在盖度差异较大的 5 月份和蒸腾速率差异较大的 7 月份影响显著。坡向对土壤湿度的影响依赖于太阳辐射的变化,在太阳辐射较强烈的 7 月份差异显著。由于长期自然封育,草地覆盖度不断增加,其蓄水保水能力增强,对土壤水分的调节能力也得到提高,从而能够在一定程度上改善土壤水分条件。

References:

- [1] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrologic Science Bulletin*, 1979, 24: 43—69.
- [2] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China. *Catena*, 2000, 39: 69—78.
- [3] Fu B J, Gulinck H. Land evaluation in area of severe erosion: the Loess Plateau of China. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1994, 5: 33—40.
- [4] Grayson R B, Moore I D, McMahon T A. Physically based hydrologic modeling 2. Is the concept realistic? *Water Resource Research*, 1992, 28: 2659—2666.
- [5] Reynolds S G. The gravimetric method of soil moisture determination III. An examination of factors influencing soil moisture variability. *Journal of Hydrology*, 1970, 11: 288—300.
- [6] Ng E, Miller P C. Soil moisture relations in the southern California chaparral. *Ecology*, 1980, 61: 98—107.
- [7] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture on a small agricultural watersheds. *Journal of Hydrology*, 1983, 62: 179—200.
- [8] Fu B J, Chen L D. Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44: 291—303.
- [9] Fu B J, H. Gulinck M. Z. Loess erosion in relation to land-use changes in the Ganspoel catchment, central Belgium. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1994, 5: 261—270.
- [10] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210: 259—281.
- [11] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49: 723—750.