

祁连山东段土壤水分时空分布特征 及其与环境因子的关系

田风霞^{1,2}, 赵传燕³, 王 瑶³

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境与气候变化研究院, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州大学干旱与草地农业生态教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 基于时域反射仪(TDR)观测的土壤水分数据,探讨了祁连山东段旱泉沟流域 2009 年土壤水分的时空分布特征,并利用典范对应分析(CCA)方法分析了海拔、坡度、坡向、坡位、地貌类型、土地利用类型、土壤孔隙度等 7 个环境因子与土壤水分时空分布的相关关系。研究结果表明:在整个观测期间,灌草地和林灌地的土壤含水量最高,灌木地、林地次之,然后依次为退耕还草地、农地、退耕还林地和荒草地;海拔、坡向、土壤孔隙度和土地利用类型是影响土壤水分季节动态分布的主要因子,且不同月份土壤水分含量的主要影响因子各不相同,7 月份与坡向相关性最大,8、9 月份土壤水分含量与土地利用类型相关性最大,10 月份与海拔相关性最大;研究区内 23 个样点 0~10 cm 土层含水量的总体变异系数(CV)最大,10~20 cm 土层含水量的总体 CV 最小,且样点 1 和 9 以及样点 14~17 的土壤剖面含水量的 CV 较大;土壤孔隙度对土壤水分垂直分布的影响最为显著,坡位、坡向与海拔的影响次之,而地貌类型、坡度和土地利用类型的影响较小。

关键词: 典范对应分析(CCA); 土壤水分; 环境因子; 旱泉沟流域

中图分类号: Q142.3; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)06-0023-07

土壤水分是气候、植被、地形、土壤及人类活动等因素的综合反映,是土壤—植物—大气连续体的一个关键因子,是土壤系统养分循环和流动的载体,它不但直接影响土壤特性和植物生长,而且间接影响植被分布,并在一定程度上影响局部地区微气候的变化^[1]。祁连山区地处干旱气候带,生态环境脆弱,人类活动对该区域土壤水分的负面影响进一步降低了其有限的环境承载能力,直接威胁着该区域经济的可持续发展。因此,研究祁连山区土壤水分的时空分布特征,有利于该区水资源的合理利用及生态环境的恢复和重建。

土壤水分的时空变化受降雨^[2,3]、地形^[4~6]、植被^[7,8]、土壤^[9,10]和土地利用方式^[11,12]等因素的影响,其季节动态变化影响土壤—植物两者对水分的供需关系,其剖面动态变化影响水分的运动状况和植物对土壤水分的利用^[13]。国内很多学者就有关土壤水分的时空变异特征和空间模拟进行了大量的研究,取得的研究成果主要集中在我国的黄土高原地区^[3,14~17],有关祁连山区土壤水分时空变化的研究相对较少^[18~22],而针对土壤水分与环境因子综合分析的研究则更为缺乏。为了预测土壤水分的高分辨率时空变化规律,本研究区选择位于祁连山东

段的旱泉沟流域,以流域内土壤水分的观测数据为基础,采用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)方法分析并确定影响土壤水分时空变化的主要因素,以便为将来建立祁连山区中尺度的土壤水分空间分布模型提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山东段的旱泉沟流域,行政隶属于甘肃省天祝藏族自治县朵什乡,地理位置介于东经 102°58'04"~103°01'04",北纬 37°14'40"~37°20'13",东西宽 4.7 km,南北长 10.2 km,流域总面积为 22.32 km²,如图 1 所示。

旱泉沟流域属大陆性高原季风气候。年均气温 1.2℃,生长期 120~170 d。年均降水量 400 mm,且年内分配不均,降水主要集中在 6~9 月;年均蒸发量 1 600 mm,蒸发量在 4~8 月比较大。地势南高北低,海拔在 2 420~3 306 m 之间,地域狭长,形成以中山地貌为主,兼有黄土丘陵的地貌组合。上游分布有高山草甸、灌丛和青海云杉林,中游主要分布青海云杉林,下游主要分布的是荒山和农田。土壤类型主要有山地灰褐土、山地淋溶灰褐土、亚高山灌丛

收稿日期:2010-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(40671067,30770387);国家创新研究群体科学基金(40721061)

作者简介:田风霞(1982—),女,山东济宁人,在读博士研究生,主要从事生态环境模拟及 GIS 应用。E-mail: fxt0130@163.com。

* 通讯作者:赵传燕,教授,博士生导师,主要从事生态水文学与环境模拟。E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn。

草甸土和山地栗钙土。

1.2 数据来源

在对研究区全面踏查的基础上,根据不同的地形状况和土地利用类型,在流域内共选取了 23 个典型采样点(见图 1)。调查时间集中在 2009 年 6 月,采用手持 GPS 测定每个样点的地理位置、海拔与坡向,坡度仪测定坡度,环刀法分土层(0~10、10~20、20~40、40~60 cm 和 60~80 cm)测定土壤容重和土壤孔隙度,并记录每个样点的坡位、地貌类型和土地利用类型等(见表 1)。

土壤含水量用时域反射仪(Time Domain Reflectometry,简称 TDR)进行分土层测定,共分 5 个层次:0~10、10~20、20~40、40~60 cm 和 60~80 cm。从 2009 年 7 月 1 日到 10 月 31 日,在每月的 1 日与 15 日前后分别测定 1 次,每层测定 3 次,取其平均数作为该层土壤的体积含水量。

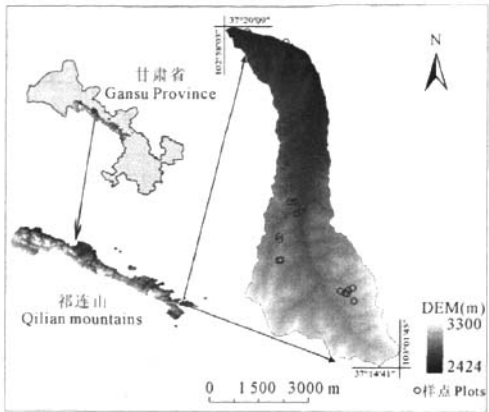


图 1 旱泉沟流域的相对位置、DEM 及采样点分布
Fig.1 Location and DEM of Hanquangou watershed and the distribution of sampling plots

表 1 样点的地形因子、土壤因子及土地利用类型

Table 1 Topography, soil physical properties and land-use types of plots in the Hanquangou watershed

样点编号 Plot No.	海拔(m) Altitude	坡向(°) Aspect	坡度(°) Slope	坡位 Position	地貌类型 Landform	土地利用 Land-use	土壤孔隙度(%) Soil porosity
1	2731	340	23	中坡 Mesoslope	坡地 Slope	林地 Woodland	27.58
2	2769	345	15	下坡 Downslope	坡地 Slope	林地 Woodland	28.79
3	2807	155	15	中坡 Mesoslope	梯田 Terrace	灌草地 Shrub-grassland	20.07
4	2853	105	33	上坡 Upslope	坡地 Slope	灌木地 Shrubland	15.66
5	2834	230	18	上坡 Upslope	坡地 Slope	灌草地 Shrub-grassland	19.43
6	2757	0	0	下坡 Downslope	梯田 Terrace	农地 Cropland	23.38
7	2929	230	17	下坡 Downslope	山顶 Hilltop	灌木地 Shrubland	31.64
8	2955	208	12	中坡 Mesoslope	山顶 Hilltop	灌木地 Shrubland	33.36
9	2996	223	20	上坡 Upslope	山顶 Hilltop	灌木地 Shrubland	27.52
10	2932	225	11	下坡 Downslope	山顶 Hilltop	灌草地 Shrub-grassland	29.47
11	2959	330	20	下坡 Downslope	山顶 Hilltop	林灌地 Wood-shrubland	32.16
12	2900	235	14	下坡 Downslope	山顶 Hilltop	林灌地 Wood-shrubland	38.59
13	2862	100	35	中坡 Mesoslope	坡地 Slope	灌木地 Shrubland	27.97
14	2854	100	28	下坡 Downslope	坡地 Slope	林灌地 Wood-shrubland	20.22
15	2940	305	16	中坡 Mesoslope	山顶 Hilltop	林地 Woodland	45.42
16	2953	310	29	上坡 Upslope	山顶 Hilltop	灌木地 Shrubland	47.35
17	2516	118	34	下坡 Downslope	坡地 Slope	荒草地 Natural grassland	11.38
18	2552	195	26	下坡 Downslope	坡地 Slope	退耕还草地 Grassland retrieved from cropland	13.34
19	2550	0	25	下坡 Downslope	坡地 Slope	退耕还草地 Grassland retrieved from cropland	25.25
20	2551	355	25	中坡 Mesoslope	坡地 Slope	灌木地 Shrubland	28.40
21	2576	0	21	上坡 Upslope	坡地 Slope	灌木地 Shrubland	22.23
22	2483	50	0	下坡 Downslope	梯田 Terrace	农地 Cropland	17.47
23	2463	50	15	中坡 Mesoslope	梯田 Terrace	退耕还林地 Woodland retrieved from cropland	13.37

1.3 计算方法及数据处理

1.3.1 统计方法 假设采样点*i*第*j*层第*k*次测定的土壤体积含水量表示为 $V_{i,j,k}$,其中 N_m 表示测定层次; N_n 表示测定次数。则各采样点观测期间的平均土壤含水量(%)为:

$$V_i = \frac{1}{N_m N_n} \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{N_n} V_{i,j,k}$$

各采样点各层次平均土壤含水量(%)为:

$$V_{i,j} = \frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} V_{i,j,k}$$

1.3.2 CCA方法 典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),是基于对应分析发展而来的一种排序方法,将对应分析与多元回归分析相结合,每一步计算均与环境因子进行回归,又称多元直接梯度分析^[23]。CCA在分析植物群落时空分异类型与环境因子的关系方面独树一帜,是目前国际上最新的一种排序方法^[24]。本研究采用Canoco for windows 4.5软件,对所选取的23个采样点的土壤含水量数据和环境因子数据进行排序分析。

CCA需要2个 $P \times N$ 维的数据矩阵,本文中一个是土壤水分数据矩阵,另一个是环境因子数据矩阵。在环境因子数据矩阵中, N 为环境因子的数量,这里有海拔、坡度、坡向、坡位、地貌类型、土地利用类型和土壤孔隙度等共7个, P 为样点数(23个)。对于环境因子中的定性数据,CCA排序要求对其进行编码处理。坡向原始记录以朝北为起点(即 0° 或 360°),顺时针旋转的角度表示。本文采用数值1至8依次表示 $0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 90^\circ$ 、 $90^\circ \sim 135^\circ$ 、 $135^\circ \sim 180^\circ$ 、 $180^\circ \sim 225^\circ$ 、 $225^\circ \sim 270^\circ$ 、 $270^\circ \sim 315^\circ$ 、 $315^\circ \sim 360^\circ$ 的坡向。坡位分3类,1表示下坡位,2表示中坡位,3表示上坡位。地貌类型分3类,1表示坡地,2表示山顶,3表示梯田。土地利用类型分8类,1表示灌木地,2表示林地,3表示灌草地,4表示林灌地,5表示荒草地,6表示退耕还草地,7表示退耕还林地,8表示农地。海拔、坡度和土壤孔隙度分别以实测值表示。

为了分析土壤水分的时空变化特征,因而本研究中的土壤水分数据矩阵有两个,即季节动态数据矩阵与剖面动态数据矩阵,且这两个土壤水分数据矩阵都是 $P \times N$ 维的。其中 P 为采样点数(23个),剖面动态数据矩阵的 N 为5,分别代表5个土壤剖面(0~10、10~20、20~40、40~60 cm和60~80 cm)的平均含水量,季节动态数据矩阵的 N 为8,分别代表观测期间每次观测的土壤含水量。

2 结果与分析

2.1 土壤水分季节动态变化及其与降雨量的关系

图2显示了不同土地利用类型下土壤水分的季节变化及其与降雨量的关系。其中,土壤含水量为每次观测的同种土地利用类型样点的平均值;降雨量代表整个流域内前后间隔时间段的降雨量(其中7月1日代表6月份的总降雨量)。

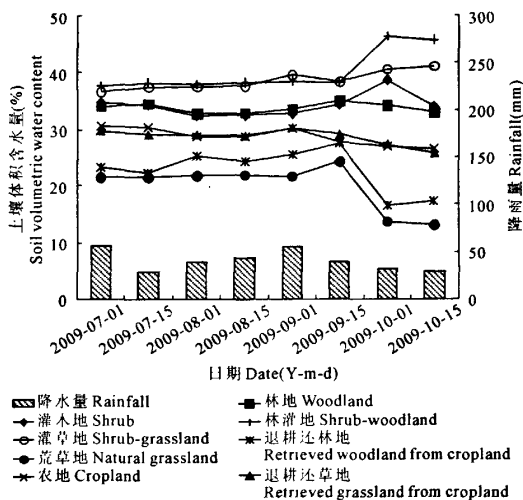


图2 不同土地利用类型下土壤水分的时间变化及其与降雨量的关系

Fig.2 Temporal variation of soil moisture and its relationship with rainfall under different land-use types

在祁连山区,降水几乎是该区土壤水分的唯一来源,而蒸散是土壤水分损失的主要形式。因此,土壤水分的季节性变化受该地区降水的强烈影响,同时也与气温、植物类型及其生长阶段有密切的关系。从图2可以看出,在观测期间,灌草地和林灌地的土壤含水量最高,灌木地、林地次之,然后依次为退耕还草地、农地、退耕还林地和荒草地;对同一土地利用类型而言,7~9月份的土壤含水量变化不大,10月份的土壤含水量波动较大,其中,林灌地、灌草地和灌木地10月份的土壤含水量明显升高,而退耕还林地、荒草地和农地的含水量明显降低,这主要因为林灌地、灌草地、灌木地所处的海拔较高,土壤表层的气温较低,土壤的蒸、散发量小,退耕还林地和荒草地所处海拔低,气温相对较高,降雨量的减少致使水的供给不足,而农地8月底9月初庄稼收割后,缺少了作物覆盖致使土壤的蒸发量很大。此外,虽然8月份的降雨量最大(图2),但每个土地利用类型的土壤水分含量却较低。这主要因为该时期土壤表层

的气温高,作物生长处于旺季,作物的蒸腾量和土壤的蒸发量都较大。

2.2 土壤水分季节动态与环境因子分析

土壤水分季节动态数据与环境因子数据的排序结果见图 3。图中箭头代表各个环境因子,箭头所处象限,代表环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头连线的长度表示样点分布与该环境因子关系的大小,连线越长,相关性越大,反之越小,箭头连线与排序轴的夹角代表环境因子与排序轴相关性的 大小,箭头所指的方向表示该环境因子的变化趋势。分析时,可以作出某一物种(或样点)与该环境因子连线的垂线,垂线与环境因子连线的相交点离箭头越近,表示该物种(或该样点)与该类环境因子的正相关性越大,处于另一端则表示与该类环境因子具有的负相关性越大。

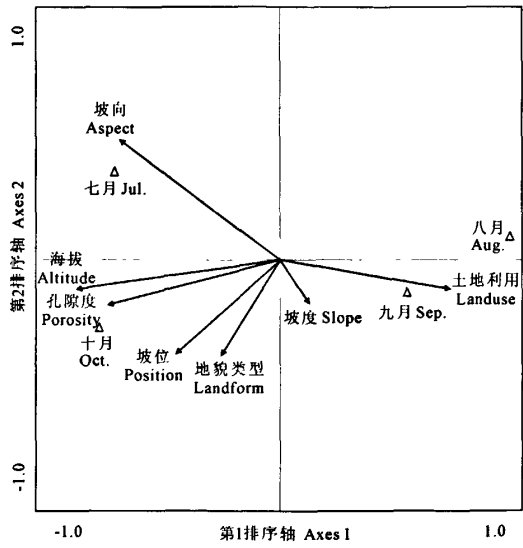


图 3 土壤水分季节分布的 CCA 二维排序图
Fig.3 CCA two-dimensional ordination diagram of the seasonal distribution of soil moisture

图 3 中前两个排序轴的特征值分别是 0.0043 和 0.0047(前 4 个排序轴的总特征值为 0.013),土壤水分与环境因子间的相关系数分别为 0.878 和 0.469。第 1 排序轴解释了 33.2% 的土壤水分变化和 86.3% 的土壤水分与环境因子之间的关系,第 2 排序轴进一步揭示了 3.4% 的土壤水分变化和 8.9% 的土壤水分与环境因子之间的关系。说明这 2 个排序轴反映了土壤水分与环境因子之间相互关系的大部分信息。

海拔与第 1 排序轴的相关性最大,相关系数为 -0.7352,其次为土壤孔隙度、土地利用和坡向,相

关系数分别为 -0.6223、0.6161 和 -0.5775,坡位和地貌类型为不显著的负相关(相关系数分别为 -0.3733和 -0.2126),坡度为不明显的正相关(相关系数为 0.1026),见表 2。与第 2 排序轴的相关系数较大的为坡向,相关系数为 0.2248,说明第 2 排序轴基本反映了土壤水分随坡向的变化趋势。从图 3 也可以看出,海拔、坡向、土壤孔隙度和土地利用的箭头连线较长,且海拔、土壤孔隙度和土地利用与第一轴的夹角较小,表明土壤水分的季节动态分布特征与这几个环境因子相关性较大;海拔和土壤孔隙度处在第 3 象限与第 1 轴呈明显负相关。在图 3 中,从 7~10 月份土壤含水量分布点作与环境因子连线的垂线,发现:7 月份土壤水分含量与坡向正相关性最大,8、9 月份与土地利用类型正相关性最大,10 月份土壤水分含量与海拔正相关性最大。这表明影响不同月份土壤含水量变化的主要因子不尽相同。

表 2 环境因子与排序轴间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between the environmental factors and the axes

环境因子 Environmental factors	排序轴 1 Axes 1	排序轴 2 Axes 2
海拔 Altitude	-0.7352	-0.0548
坡向 Aspect	-0.5775	0.2248
坡度 Slope	0.1026	-0.0825
坡位 Slope position	-0.3733	-0.1757
地貌类型 Landform types	-0.2126	-0.1797
土地利用 Land-use types	0.6161	-0.0554
土壤孔隙度 Soil porosity	-0.6223	-0.0844

2.3 土壤水分垂直分布特征

本研究计算了 23 个采样点 5 个土壤剖面(0~10、10~20、20~40、40~60 cm 和 60~80 cm)含水量的平均值和变异系数,如表 3 所示。变异系数采用公式为: $CV = s/\bar{x}$,其中 CV 为变异系数,s 为标准差, $\bar{x}$ 为平均值。

经分析知,23 个采样点 0~10 cm 土层含水量的总体变异系数(CV)最大,这显示不同土地利用类型土壤表层的保水效益空间差异很大。就单个样点而言,样点 1 和 9 以及样点 14~17 的土壤剖面含水量的变异系数(CV)比较大,这几个样点分别地处林地、灌木地和草地,这与王国梁等^[9]的研究结果相一致,他们的研究发现,灌木、草地和林地土壤含水率的变异系数明显高于农田。其中,样点 14 和 17 的变异系数较大的原因是,两个样点所处地的坡度较大,水分下渗能力弱,造成上层土壤相对较湿、底层

土壤相对较干;而样点 1 和 15 位于青海云杉林内,样点 16 处于青海云杉和桦树混交林内,植物根系相对较深,较强的蒸腾造成底层土壤相对较干,同时,植物盖度较大且地表均有荒草和枯落物覆盖,表层物理蒸发相对较弱,造成表层土壤水分含量相对较

高。样点 11 的土壤剖面含水量的变异系数最小,这主要是由于该点处于高海拔、林灌地阴坡的坡下位,降雨量大、气温低,蒸散量小,致使土壤剖面含水量变化不大。

表 3 样点各土层的含水量(%)及其变异系数

Table 3 Water content(%) in different soil layers and the coefficients of variation of each plot

样点编号 Plot No.	0 ~ 10 (cm)	10 ~ 20 (cm)	20 ~ 40 (cm)	40 ~ 60 (cm)	60 ~ 80 (cm)	平均值 $\bar{x}$ Mean value (%)	变异系数 CV Coefficient of variation
1	33.36	23.50	25.66	23.33	30.90	27.35	0.17
2	28.65	27.19	29.03	28.25	31.54	28.93	0.06
3	25.87	30.08	32.37	34.79	32.82	31.19	0.11
4	20.73	23.00	23.61	20.42	20.90	21.73	0.07
5	27.72	31.42	30.41	28.23	29.37	29.43	0.05
6	33.40	32.53	32.60	29.07	32.78	32.08	0.05
7	47.25	38.76	35.17	38.58	38.87	39.73	0.11
8	52.87	41.11	42.13	42.73	44.23	44.61	0.11
9	53.03	37.99	39.37	31.48	31.65	38.70	0.23
10	66.9	51.42	53.00	54.30	55.30	56.18	0.11
11	43.22	44.63	45.09	43.39	*	44.08	0.02
12	60.54	51.4	55.54	49.60	46.82	52.78	0.10
13	28.00	28.71	30.52	27.51	29.35	28.82	0.04
14	30.16	27.56	22.54	22.45	28.47	26.24	0.13
15	34.17	39.46	48.76	*	*	40.80	0.18
16	49.75	36.49	49.98	*	*	45.41	0.17
17	19.42	24.35	17.70	17.45	19.44	19.67	0.14
18	18.56	24.62	23.76	21.92	23.15	22.40	0.11
19	32.17	30.24	34.55	35.05	33.69	33.14	0.06
20	35.29	34.89	37.17	32.60	32.84	34.56	0.05
21	27.90	29.73	28.04	29.06	28.92	28.73	0.03
22	23.24	25.48	21.13	24.28	27.00	24.23	0.09
23	20.94	25.09	22.47	19.24	22.43	22.03	0.10
总体平均值 $\bar{x}$ Total mean value (%)	35.35	33.03	33.94	31.13	32.02		
总体变异系数 CV Total coefficient of variation	0.39	0.25	0.32	0.32	0.28		

注: * 代表样点处的土层厚度未达到该深度。
Note: * represents the soil doesn't reach that depth of each plot

2.4 土壤水分垂直分布与环境因子分析

图 4 显示了不同剖面土壤水分垂直分布特征及其与环境因子的关系。土壤孔隙度、海拔、坡向和坡位的箭头连线较长,表明土壤水分的垂直分布特征与这几个环境因子相关性较大;坡位处在第 1 象限与第 1 轴呈明显正相关;土壤孔隙度与第 1 轴的夹角最小,表明该因子与第 1 轴的相关性最大。与第 2 排序轴的相关系数较大的为坡位,相关系数为 0.2662,说明第 2 排序轴基本反映了土壤水分随坡

位的变化趋势,其中坡位的影响通过海拔的变化来实现。从 5 个土壤剖面含水量的分布点作与环境因子连线的垂线,发现:土壤孔隙度对 0 ~ 40 cm 土层含水量分布的影响最为显著,海拔、坡位与坡向的影响次之,对 40 ~ 80 cm 土层含水量的垂直分布而言,所有环境因子均对其影响较小。此外,0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土壤剖面含水量的分布点主要聚集在土壤孔隙度梯度变化附近,其中土壤孔隙度的影响通过土地利用类型的改变来实现,这可能

是图 4 中土壤水分的垂直分布特征与土地利用类型相关性比较小的原因。

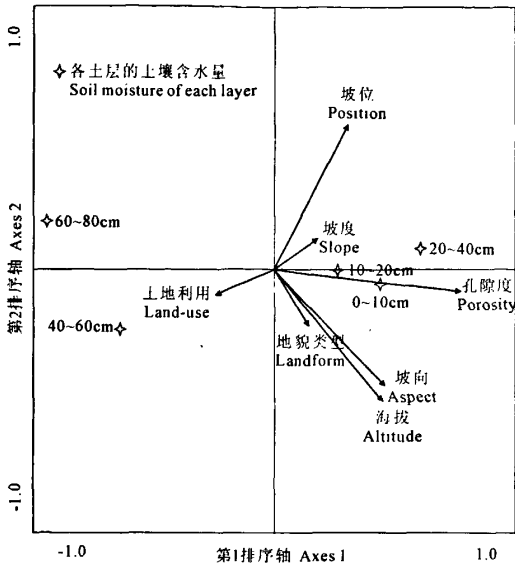


图 4 土壤水分垂直分布的 CCA 二维排序图

Fig.4 CCA two-dimensional ordination diagram of vertical distribution of soil moisture

3 结论与讨论

在流域尺度上,不同土地利用类型的土壤含水量差异很大,灌草地和林灌地的土壤含水量最高,灌木地、林地次之,然后依次为退耕还草地、农地、退耕还林地和荒草地,这可能是水土保持植被配置措施中选择乔木与灌木、灌木与草地相结合的原因之一。土壤水分季节动态特征与环境因子的排序结果表明,海拔、土壤孔隙度、坡向和土地利用是影响土壤水分季节动态分布的主要因子。其中,海拔通过影响降雨量进一步影响土壤含水量的大小,而降雨量对土壤含水量的影响已成共识,降雨量越大,土壤含水量越高,反之越低。不同土地利用类型的土壤孔隙度不尽相同,林地、灌木地和林灌地的土壤孔隙度较大,而土壤孔隙度越大其持水能力越强,即土壤含水量越高;阳坡的太阳辐射较大,表层土壤物理蒸发较强,造成表层土壤相对较干。相反,阴坡太阳辐射较少,表层土壤物理蒸发较弱,表层土壤相对较湿。CCA 排序结果还表明,不同月份土壤水分含量的主要影响因子不尽相同,7 月份土壤水分含量与坡向正相关性最大,8、9 月份土壤水分含量与土地利用类型的正相关性最大,10 月份土壤水分含量与海拔的正相关性最大。这就为将来建立祁连山区中尺度

的土壤水分空间分布模型提供了理论依据。

23 个采样点 0~10 cm 土层含水量的总体变异系数(CV)最大,这显示不同土地利用类型土壤表层保水效益的空间差异很大。就单个样点而言,其所处的坡位、坡向、坡度、海拔、地貌类型等地形因子都影响着其含水量的高低。土壤水分垂直分布与环境因子的 CCA 二维排序图表明,土壤孔隙度对土壤水分垂直分布的影响最为显著,坡位、坡向与海拔的影响次之,而地貌类型、坡度和土地利用类型的影响较小。加之,不同土地利用类型的土壤孔隙度差异很大,这表明土地利用类型通过改变土壤孔隙度,间接影响着土壤水分的垂直分布。

本研究通过 CCA 分析,不仅客观地获得了影响土壤水分垂直分布的主要因子,而且获得了不同月份土壤水分变化的主要影响因子,但由于测量仪器的购买问题,本研究的试验开始于 2009 年的 7 月,未能观测并获得 5~6 月份的土壤水分数据,下一步的工作就是继续观测 2010 年 5~10 月的土壤水分变化,进而获得研究区整个生长季内不同月份土壤含水量变化的主要影响因子,更好地为将来建立祁连山区中尺度的土壤水分空间分布模型服务。

参考文献:

- [1] 柳领君,张 宏.高寒草甸土壤水分空间分布及其影响因子研究进展[J].草业与畜牧,2008,(2):1—4,17.
- [2] Yoo C, Valdes J B, North G R. Evaluation of the impact of rainfall on soil moisture variability[J]. Advances in Water Resources, 1998,21(5):375—384.
- [3] Crave A, Gascuel - odoux C. The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content[J]. Hydrological Processes, 1997,11(2):203—210.
- [4] Nyberg L. Spatial variability of soil water content in the covered catchment at Gardsjon, Sweden[J]. Hydrological Processes, 1996,10(1):89—103.
- [5] Anderson M G, Kneale P E. Topography and hillslope soil water relationships in a catchment of low relief[J]. Journal of Hydrology, 1980,47(1—2):115—128.
- [6] Cerda A. The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope[J]. Hydrological Processes, 1998,12(4):661—671.
- [7] Reid L. The influence of slope orientation upon the soil moisture regime, and its hydrogeomorphological significance[J]. Journal of Hydrology, 1973,19(4):309—321.
- [8] Kalma J D, Bates B C, Woods R A. Predicting catchment - scale moisture status with limited field measurements[J]. Hydrological Processes, 1995,9(3—4):445—467.
- [9] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31—35.
- [10] 张北麻,徐学选,刘文兆,等.黄土丘陵沟壑区不同降水年型下

- 土壤水分动态[J].应用生态学报,2008,19(6):1234—1240.
- [11] 连 纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J].生态学报,2006,26(3):647—654.
- [12] 郑纪勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53—56.
- [13] 孙 建,刘 苗,李立军,等.不同植被类型矿区复垦土壤水分变化特征[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):201—207.
- [14] 王 军,傅伯杰.黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J].地理学报,2000,55(1):84—91.
- [15] 赵传燕,冯兆东,南忠仁.黄土高原西部土壤水分时空变化模拟研究—以安家坡流域为例[J].冰川冻土,2007,29(5):785—793.
- [16] 王 俊,刘文兆,胡 梦.黄土丘陵区小流域土壤水分时空变异[J].应用生态学报,2008,19(6):1242—1247.
- [17] 邱 扬,傅伯杰,王 军,等.黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因素[J].应用生态学报,2001,12(5):715—720.
- [18] 牛 云,张宏斌,刘贤德,等.祁连山主要植被下土壤水的时空动态变化特征[J].山地学报,2002,20(6):723—726.
- [19] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟,等.祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究[J].应用生态学报,2004,15(7):1148—1152.
- [20] 闫文德,王金叶,王彦辉,等.祁连山排露沟流域土壤水分时空分布[J].西北林学院学报,2006,21(3):21—25.
- [21] 张学龙,车克钧,王金叶,等.祁连山寺大隆林区土壤水分动态研究[J].西北林学院学报,1998,13(1):1—9.
- [22] 黄德青,张耀生,赵新全,等.祁连山北坡主要草地类型的土壤水分动态研究[J].草业科学,2005,22(8):6—11.
- [23] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986,67(5):1167—1179.
- [24] 张金屯.植被数量生态学方法[M].北京:中国科学技术出版社,1995:157.

Spatial and temporal variations of soil moisture and its relationship with environmental factors in the east section of the Qilian Mountains

TIAN Feng-xia^{1,2}, ZHAO Chuan-yan³, WANG Yao³

(1. MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. MOE Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the method of Canonical Correspondence Analysis (CCA), this study discussed the spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the Hanquangou watershed of the Qilian Mountains and analyzed its relationship with the environmental factors (e.g., altitude, slope, aspect, slope position, landform types, land-use types and soil porosity). The results indicated that: (1) The soil moisture of shrub-grassland and shrub-woodland was the highest during the study period, and then followed by shrub, woodland, grassland retrieved from cropland, cropland, woodland retrieved from cropland, and natural grassland; (2) Altitude, slope, soil porosity and land-use types are the main factors that affected seasonal dynamics of soil moisture, and the main impacting factors in each month were also different. For example, the factors were mainly associated with the aspect in July, with land-use types in August and September and with altitude in October; (3) The total coefficient of variation (CV) of soil water in 0 ~ 10 cm of 23 plots was the maximum, while the CV of 10 ~ 20 cm was the minimum; (4) The effects of soil porosity on the vertical distribution of soil moisture were the most significant, and then followed by slope position, aspect and altitude. This study provides a theoretical basis for the future establishment of mesoscale simulation of the spatial distribution of soil moisture in the Qilian Mountains.

Keywords: Canonical Correspondence Analysis (CCA); soil moisture; environmental factors; Hanquangou watershed