

DOI: 10.20103/j.stxb.202401070055

徐斌,何宝军,李宗杰,刘晓颖,刘梦晴,桂娟,张百娟,王东鹏.高寒山区生长季土壤水分时空变异特征及其影响因素.生态学报,2024,44(18):8397-8408.

Xu B, He B J, Li Z J, Liu X Y, Liu M Q, Gui J, Zhang B J, Wang D P. Characteristics of spatio-temporal variability of soil moisture during the growing season in the mountainous alpine area and its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8397-8408.

高寒山区生长季土壤水分时空变异特征及其影响因素

徐 斌¹,何宝军⁴,李宗杰^{1,*},刘晓颖¹,刘梦晴¹,桂 娟²,张百娟²,王东鹏³

1 兰州理工大学 能源与动力工程学院,兰州 730050

2 中国科学院西北生态环境资源研究院 高寒山区同位素生态水文与国家公园观测研究站/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,兰州 730000

3 西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070

4 中国地质调查局军民融合地质调查中心,成都 610036

摘要:土壤水分是高寒山区生态环境稳定与否的重要反馈。了解高寒山区土壤水分的时空变异特征有利于优化对水资源的管理,对进一步保护当地脆弱的生态环境具有重要意义。在 2023 年的 5—10 月对典型高寒山区(沙柳河流域)进行了土壤水分的连续定点观测,共设置 8 个不同样地,基于各样地间的主要差异,选择植被类型、坡向和海拔做为主要控制对象,探究不同植被类型、坡向和海拔高度对高寒山区土壤水分的时空变异特征的影响。研究发现:不同植被类型下的土壤水分差异较小,植被类型对土壤水分的时空变化特征影响较弱;坡向对土壤水分的影响明显,阴坡比阳坡土壤水分条件更优,波动变化更小;3500—3600 m 海拔区间内,阴坡在生长季中期的土壤水分低于阳坡,不同坡向的土壤水分在表层 0—20 cm 具有明显的差异;3600—3700 m 海拔区间内,阴坡在生长季后期的土壤水分低于阳坡,不同坡向的土壤水分在深度 0—40 cm 土层具有明显的差异;生长季内各海拔区间的土壤含水量从大到小依次为:3900—4000 m>3700—3800 m>3300—3400 m>3500—3600 m;生长季内各海拔区间土壤水分的变异系数从大到小依次为:3900—4000 m>3300—3400 m>3700—3800 m>3500—3600 m;海拔对 0—40 cm 土层土壤水分的影响程度较高,从大到小依次为:30—40 cm 土层>0—10 cm 土层>10—20 cm 土层>20—30 cm 土层,但 40—60 cm 土层的土壤水分对海拔的响应程度较弱。

关键词:土壤水分;时空变异特征;高寒山区;影响因素

Characteristics of spatio-temporal variability of soil moisture during the growing season in the mountainous alpine area and its influencing factors

XU Bin¹, HE Baojun⁴, LI Zongjie^{1,*}, LIU Xiaoying¹, LIU Mengqing¹, GUI Juan², ZHANG Baijuan², WANG Dongpeng³

1 College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2 Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Alpine region/ Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center/ Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

4 Civil-Military Integration Center of China Geological Survey, Chengdu 610036, China

Abstract: Soil moisture is an important feedback for the stability of the ecological environment in the mountainous alpine area. Understanding the characteristics of spatial and temporal variability of soil moisture in alpine mountains is helpful to

基金项目:甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0062);国家自然科学基金(42367010);国家自然科学基金区域发展联合基金重点项目(U22A20592);兰州理工大学红柳优秀人才支持计划

收稿日期:2024-01-07; 网络出版日期:2024-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lzjie314@163.com

optimize water resources management, and is of great significance to further protect the local fragile ecological environment. From May to October 2023, continuous fixed-point observation of soil moisture was conducted at 8 sites in the Shaliu River Basin, a typical mountainous alpine area. Based on the main differences among different sites, vegetation type, slope direction and altitude were selected as the main control objects to explore the effects of different vegetation types, slope direction and altitude on the spatio-temporal variation characteristics of soil moisture in the mountainous alpine area. The results indicated that there was minimal variation in soil water content among different vegetation types, and the influence of vegetation types on the temporal and spatial characteristics of soil water was limited; The influence of slope direction on soil moisture was obvious. The soil moisture condition of the shady slope was better than that of the sunny slope, and the fluctuation was smaller; In the altitude range of 3500—3600 m, the soil moisture on the shady slope during the mid-growing season was comparatively lower than that on the sunny slope, and there existed a significant variation in soil moisture among different slope directions within the surface layer (0—20 cm). In the altitude range of 3600—3700 m, during the late growing season, the soil moisture on the shady slope tended to be lower than that on the sunny slope, and there was a notable difference in soil moisture among various slope directions at depths ranging from 0 to 40 cm; During the growing season, the soil moisture content of each altitude interval followed this order from the highest to lowest: 3900—4000 m > 3700—3800 m > 3300—3400 m > 3500—3600 m, and the coefficient of variation of soil moisture of each altitude interval followed this order from the highest to lowest: 3900—4000 m > 3300—3400 m > 3700—3800 m > 3500—3600 m; The influence of altitude on soil moisture in the 0—40 cm soil layer was higher, and the order from the largest to the smallest was: 30—40 cm soil layer > 0—10 cm soil layer > 10—20 cm soil layer > 20—30 cm soil layer. However, the soil moisture in the 40—60 cm soil layer had a weak response to the altitude.

Key Words: soil moisture; spatial and temporal variability characteristics; mountainous alpine; influencing factors

土壤水分作为连接大气圈、水圈、生物圈的纽带,不仅是极其重要的气候和土地变量,也是水文循环和能量分配过程中的关键环节,并且对生态系统的可持续发展具有限制性作用^[1-3]。土壤水分对于地表水文循环过程至关重要,在产流、土壤蒸发和植物蒸腾等环节中发挥着不可或缺的作用^[4]。通过影响植被的种类、数量、空间分布和群落演替等,土壤水分最终影响生态系统的结构、功能、承载力以及稳定性^[5]。可见,土壤水分的健康与否是对生态环境质量优劣的重要反馈,研究土壤水分时空变异特征,对于了解水文循环、陆地与大气间的生物地球化学循环及其相互作用具有及其深远的意义^[6]。在气候变化背景下,高寒山区的生态水文过程正面临深刻且剧烈的变化,区域的生态安全、水资源安全和可持续发展受到了威胁,生态屏障功能受到严重影响^[7]。因此,加强高寒山区土壤水分的研究迫在眉睫。在此背景下,研究高寒山区土壤水分的时空变异特征,探究其变化的影响因素显得十分重要。

国内外的专家学者对土壤水分时空变异特征进行了大量的研究并且取得了许多的优秀成果。已有研究表明,土壤水分受气候、地形、植被类型等多种因素影响,土壤水分在时间和空间上具有较强的变异性^[8]。气候是土壤水分变化的主要影响因素,一方面降水是土壤水分主要补给来源,另一方面蒸散发是土壤水分消耗的主要形式。同时,土壤水分对气候也具有重要的驱动作用,土壤水分的变化会改变下垫面热容和反照率等参数,影响地表蒸散发、感热通量和潜热通量,最终对局地气候产生影响^[9-10]。地形对土壤水分的影响机理十分复杂,坡向、坡度、坡位等都会对土壤水分产生一定程度的影响^[11-12]。植被作为影响土壤水分最活跃的因素之一,研究发现:不同植被的耗水能力有所差异^[13],并且同一植被在不同时期的耗水能力也是不同的^[14]。此外,也有学者进行了横跨不同海拔的土壤温湿度的观测,探究了海拔对土壤水分的影响机制^[15]。基于已有的对土壤水分影响因素的相关研究,结合高寒山区特殊的地理环境条件,本文主要研究植被类型、坡向和海拔对土壤水分的影响。

目前,土壤水分数据的获取方法主要分为遥感观测和定点观测两种。土壤水分的遥感监测主要利用光学

遥感与微波遥感技术。定点测量主要依靠人工野外采样后实验室测量,或者利用土壤水分测量仪器以及无线传感网络进行测量等^[16]。遥感卫星观测覆盖面广、能够连续观测,但是探测深度和精度有限;定点观测精度高,时间分辨率高,但是空间代表性较弱^[6]。众多学者对高寒山区土壤水分进行了相关的研究,主要是依靠遥感手段获取土壤水分数据^[17]。由于高寒山区恶劣的自然环境导致野外观测困难重重,所以利用定点观测的研究较少,且主要集中于小尺度层面^[1,18]。本文的研究区域位于青藏高原的东北部,青海湖流域中的一个小流域:沙柳河流域。该区域具有典型的高寒山地特征,完全能够满足本实验的要求。已有研究表明,即使在小流域,在多重环境因子的共同作用下,土壤水分在时空上的分布也是不均匀的,土壤水分之间的关系极其复杂^[4]。所以本文选择精度更高的定点观测来获得土壤水分数据。

高寒山区对气候变化较为敏感,逐渐出现的生态环境问题始终提醒我们必须重视对该区域的研究。土壤水分作为反映生态系统健康性的一面镜子,在生态研究方面具有重要的指示意义。所以本文通过将土壤水分研究作为主要的切入点,探究高寒山区土壤水分时空变异特征,厘清土壤水分的变化规律及发展趋势,剖析气候因子、不同植被类型、坡向以及海拔高度对土壤水分的影响,以期为高寒山区的生态环境保护工作提供理论依据,为高寒山区生态系统修复提供科学指导。

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究选取沙柳河流域(37°10'55.92"—37°51'2.16"N,99°37'10.20"—100°17'9.96"E)作为研究区(图1)。沙柳河流域位于青藏高原东北缘,为典型的高寒山区,海拔3036—4694 m,流域面积为1679.2 km²^[19],多年平均气温为-0.5℃,季节性冻土广泛发育^[20]。沙柳河流域属于高原大陆性气候,气温年较差小且日较差大,光照充足,太阳辐射强烈,年降水量在300—600 mm,而年蒸发量却高达1500—1847.8 mm,降水具有明显的季节性,主要集中于夏季^[21]。区域内,随海拔升高,植被依次由高山草原向高寒灌丛、高寒草甸和高寒流石坡植被过渡,土壤则由栗钙土逐渐向高山草甸土和高山寒漠土过渡^[22]。

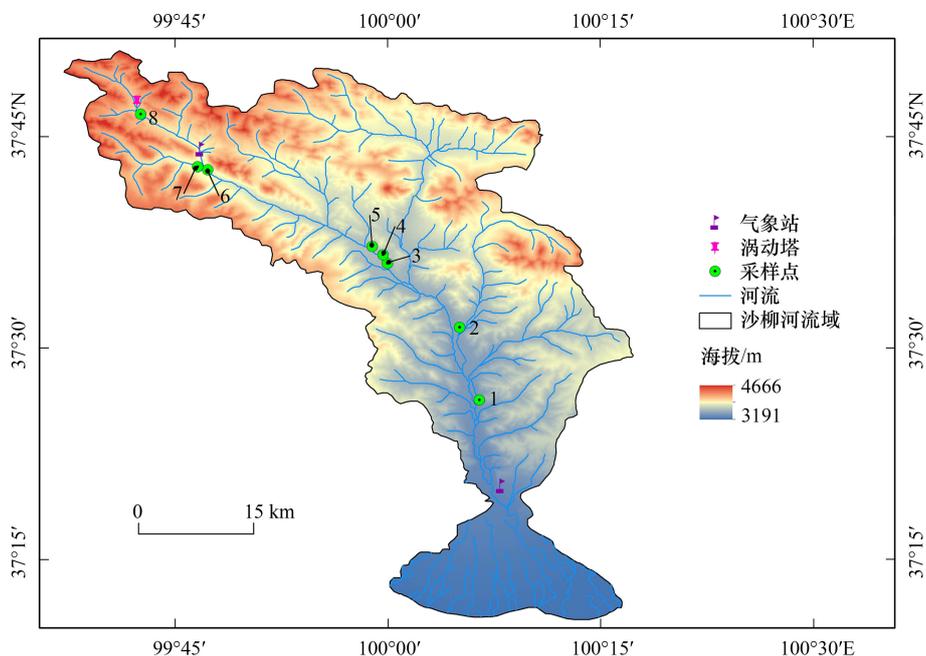


图1 研究区概况图

Fig.1 Overview map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本实验选择自然状态下的区域设置样地,且样地必须满足实验控制条件要求,即能够对比得到不同植被类型、不同坡向、不同海拔样地间的土壤水分差异。在设置不同坡向的样地时,由于研究区位于北回归线以北,故选择坡面朝北的为阴坡,朝南的为阳坡。同时,为避免坡位与坡度对实验结果的影响,均选择在下坡位且坡度较缓的位置设置样地,已有研究表明,研究区土壤水分来源主要是降水、冰雪融水和地下冰融水,地下水难以补给给表层土壤水^[23],因此样地受地下水的影响可以忽略。由于研究区是重要的放牧区,自然状态的土壤较少,因此也一定程度上限制了样地的大小和数量,最终,共设置了 8 块满足控制条件的样地,呈条带状或不规则片状。其中,共设置 4 个不同海拔梯度,分别为 3300—3400 m、3500—3600 m、3700—3800 m、3900—4000 m。1 号与 2 号样地位于 3300—3400 m 海拔梯度内,均为阳坡,分别为草地与灌丛样地。3、4、5 号样地位于 3500—3600 m 海拔梯度内,彼此间的距离较近。3 号 4 号样地为灌丛样地,5 号为草地样地。4 号 5 号样地为阳坡,3 号为阴坡。6 号 7 号样地位于 3700—3800 m 海拔梯度内,距离也较近,且均为草地,但分别为阳坡与阴坡。8 号样地位于 3900—4000 m 海拔梯度内,植被类型为高寒草甸,坡向为阳坡。样地设置过程中,利用 GPS 测量各样地经纬度与海拔,利用水平仪测量样地坡度,利用指南针确定坡向。最终确定这 8 个样地的位置如图 1 所示,基本信息如表 1 所示。各样地的总盖度均在 70% 左右,差距较小,因此暂不考虑盖度对土壤水分的影响。土壤对于土壤含水量也会产生一定的影响,但受野外复杂条件限制,难以将土壤变量加以控制,故对各样地钻土时选择质地均匀且砾石含量低的位置进行土壤水分的测量,以此减小土壤变量对实验结果的干扰。最终选择植被类型、坡向和海拔作为主要研究对象,探究研究区土壤水分的时空变异特征及其影响因素。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample plots

样地编号 Sample plot number	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	优势种 Dominant species	盖度 Coverage/%	株高 Height/cm	土壤类型 Soil type
1	3346.7	阳坡	高山嵩草	草本 85	—	山地栗钙土
2	3397.5	阳坡	金露梅	灌木 20、草本 60	36.1	山地栗钙土
3	3512.0	阴坡	金露梅	灌木 40、草本 25	37.6	山地栗钙土
4	3522.9	阳坡	金露梅	灌木 60、草本 20	48.5	山地栗钙土
5	3522.1	阳坡	高山嵩草	草本 70	—	山地栗钙土
6	3765.7	阳坡	高山嵩草	草本 70	—	高山草甸土
7	3783.5	阴坡	高山嵩草	草本 60	—	高山草甸土
8	3996.4	阳坡	高寒禾草	草本 80	—	高山草甸土

1.2.2 土壤含水量的观测

研究区土层较薄,草本与灌木植物根系分布均较浅,草地根系深度主要分布在 0—50 cm 土层,故将草地样地的观测深度设置为 60 cm。灌木矮小,根系深度较浅,同时考虑有效土壤厚度,故设置灌丛样地的观测深度为 80 cm。每次测量时,利用土钻在各样地内随机钻取 3 个土坑,但要求各土坑内的土壤质地均匀、砾石含量低且满足深度要求,否则重新选取。土钻每次取出 20 cm 厚度的圆柱状土壤,重复多次即可取出所有对应深度土层的土壤。对取出的土壤立刻用 TZS-PHW-4G 土壤水分仪测量该深度剖面的土壤体积含水量 (VWC),重复 3 次。然后,将 3 个土坑的数据剔除异常值后取平均值作为该土层的土壤含水量。最后,为减小对生态的破坏,将取出的圆柱状土壤按深度回填到土坑中。每次测量时重复上述步骤,在生长季内每个月测量 2 次。

1.2.3 气象数据的获取

依托祁连山同位素生态水文与国家公园观测研究站,获得了研究区内高海拔地区的气象数据。其中,自

动气象站位于 3700—3800 m 海拔梯度内,距离 6 号 7 号样地较近。涡动塔位于 3900—4000 m 海拔梯度内,距离 8 号样地较近。同时,刚察县气象站帮助我们获得了研究区 3300—3400 m 海拔梯度内的降水数据。

2 结果与分析

2.1 生长季降水特征

高寒山区土壤水分的来源复杂多变。有研究对土壤水分进行了溯源工作发现,降水和冰雪融水是高寒山区土壤水分的主要来源,且降水占了极大的比重^[23]。所以降水是影响土壤水分变化的决定性因素之一。研究降水的时空变化对研究土壤水分的时空变化必不可少。图 2 展示了涡动塔、自动气象站与刚察气象站分别记录的 5—10 月降水量情况。刚察气象站在 5—10 月观测到的总降水量最少,只有 369.6 mm,而涡动塔观测到的总降水量最大,高达 683.73 mm。观测到的降水主要集中于 6、7、8 月,而且在此期间内三个气象站之间的降水量差异明显,涡动塔的降水量明显高于自动气象站与刚察气象站,6、7 月的降水量更是高达 180 mm 以上,而在生长季的其他月份,这种差异并不明显。自动气象站与涡动塔在生长季内的月降水量的变化幅度较大,变异系数分别为 0.49 和 0.53,均为强变异。而刚察气象站的月降水量的变化幅度较小,变异系数为 0.24,属于弱变异^[24]。对比从上述不同海拔气象站的月降水量差异可知,降水量具有随海拔升高而增加的趋势,降水量在海拔尺度上具有明显的空间变异性,并且随着海拔的升高,降水的时间变异性也随之上升。

刚察县多年平均年降水量为 409.3 mm,而 2023 年的年降雨量为 402.8 mm,两项数据相差无几,故 2023 年为平水年。因此,本实验在 2023 年获取的土壤水分数据相较于丰水年和枯水年更能代表一般情况,对研究平水年土壤水分时空变异特征具有重要意义。

刚察县多年平均年降水量为 409.3 mm,而 2023 年的年降雨量为 402.8 mm,两项数据相差无几,故 2023 年为平水年。因此,本实验在 2023 年获取的土壤水分数据相较于丰水年和枯水年更能代表一般情况,对研究平水年土壤水分时空变异特征具有重要意义。

2.2 不同植被类型土壤水分时空变异特征

2.2.1 不同植被类型土壤水分的时间变化

灌木与草本是研究区主要的植被类型,所以通过观测这两种植被来比较不同植被类型对土壤水分的影响。灌木主要集中分布于海拔 3600 m 以下的地区,以斑块状生长分布于草原上,所以仅在 3300—3400 m 与 3500—3600 m 海拔区间内设置了两个灌木样地。1 号与 2 号样地虽然均位于 3300—3400 m 海拔梯度内,但两个样地间的距离较远,同时海拔差距明显,虽然两个样地间的土壤水分差异明显,但不能将土壤水分差异归因于植被类型的不同。因此,只有尽量减少除植被类型外的其他因素干扰,才能进一步讨论植被类型对土壤水分的影响。而 4 号与 5 号样地之间距离近,海拔差距小,土壤类型相同,更适合用来探究不同植被类型间土壤水分差异特征。

图 3 展示了 4 号与 5 号样地土壤水分随时间的变化。从图 3 可知,4 号与 5 号样地两者的变化趋势基本相同,大致表现为先增后减再增加的趋势,变异系数分别为 0.25 与 0.28,均属于中等变异。4、5 号样地在生长季内土壤水分的均值差异较小,分别为 18.12% 与 18.39%,灌丛的土壤水分略小于草地,两个样地的最大均值都出现在 8 月,分别为 25.9% 与 24.98%,并且最小均值也都出现在 10 月,分别为 10.08% 与 10.30%。生长季前期草地的土壤水分高于灌丛,而生长季后期(9 月之后)则是灌丛的土壤水分高于草地。

2.2.2 不同植被类型土壤水分的空间变化

土壤水分的空间变化可分为水平尺度与垂直尺度。水平尺度主要表现为不同位置观测点之间的比较;垂直尺度则主要研究一个观测点不同深度土层间的比较。本文对土壤水分空间变化的研究主要聚焦在垂直尺度上。

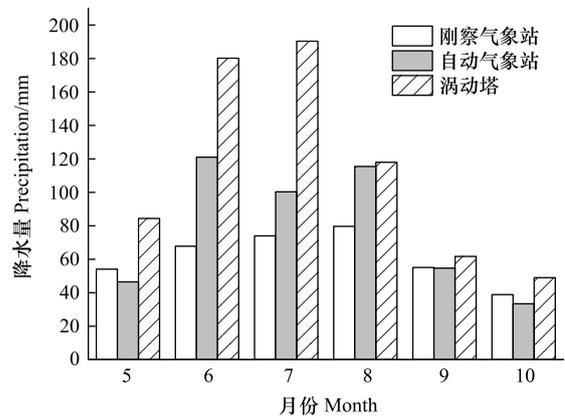


图 2 生长季内不同海拔气象站月降水量

Fig.2 Monthly precipitation at different altitude weather stations during the growing season

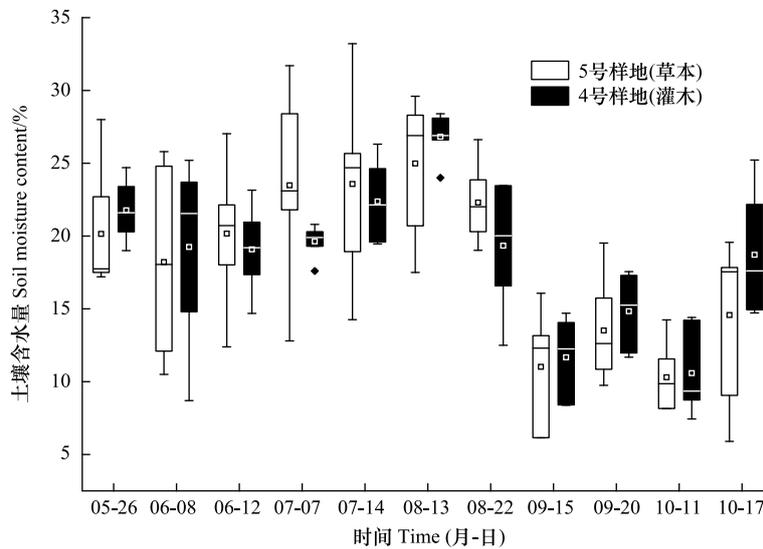


图3 不同植被类型土壤水分在生长季内的变化

Fig.3 Changes in soil moisture within the growing season for different vegetation types

如图4所示,灌木和草本样地土壤水分垂直变化基本呈现先增后减的趋势,土壤含水量最大值分别为19.83%、22.41%,分别位于深度30—40 cm与20—30 cm土层。在深度30—40 cm土层处,灌木和草本样地土壤含水量相对。深度30—40 cm以上,草本样地土壤含水量高于灌木样地;深度30—40 cm以下,草本样地土壤含水量却低于灌木样地。图5展示的是草本与灌木样地土壤水分的变异系数在垂直尺度上的变化,两者的变化趋势均为“W”型,并且不同植被类型之间的变异系数差异较小。草本样地在深度0—10 cm与50—60 cm处具有较大数值的变异系数,分别为0.31和0.33;灌木样地在这两个土层的变异系数也较大,分别为0.32和0.21。但是在深度50—60 cm处,草本样地的变异系数明显高于灌木样地。

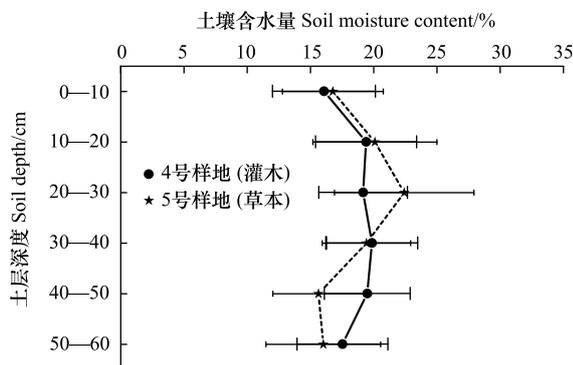


图4 不同植被类型土壤水分垂直变化

Fig.4 Vertical variation of soil moisture content in different vegetation types

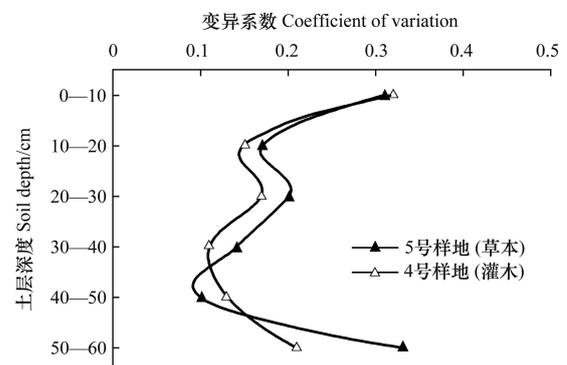


图5 不同植被类型土壤水分变异系数的垂直变化

Fig.5 Vertical variation of soil moisture's coefficient of variation in different vegetation types

2.3 不同坡向土壤水分时空变异特征

2.3.1 不同坡向土壤水分的时间变化

3、4号样地是位于3500—3600 m海拔区间不同坡向的样地,植被类型为灌木;6、7号样地是位于3700—3800 m海拔区间不同坡向的样地,均为草本植被。由上文2.2节可知,海拔3500 m以上植被类型对于土壤水分的影响较小,故海拔为3、4号样地与6、7号样地间的主要差异。由于,6、7号样地比3、4号海拔更高,冻土

发育时间较早,导致 10 月份只测了一次土壤水分数据。从图 6 可知,3、4 号样地在生长季内的土壤水分的变化趋势为先增后减再增加,并且生长季始末的土壤含水量基本相同。3 号样地的土壤水分最大均值(24.55%)出现在 8 月,最小均值(13.51%)出现在 9 月,在整个生长季的平均土壤含水量为 17.02%,变异系数为 0.24。而 4 号样地的土壤水分最大均值(25.94%)也出现在 8 月,最小均值(10.09%)却出现在 10 月,在整个生长季的平均土壤含水量为 16.99%,变异系数为 0.27。由图 7 可知,6、7 号样地的土壤水分的变化也呈现先增后减再增加的趋势。6 号样地土壤最小均值(17.15%)出现在 5 月,最大均值(31.34%)出现在 8 月,生长季内的土壤水分平均值为 25.24%,变异系数为 0.20。7 号样地土壤水分的最小均值(20.48%)也出现在 5 月,最大均值(34.47%)却出现在 10 月,生长季内平均土壤水分为 28.73%,变异系数为 0.14。

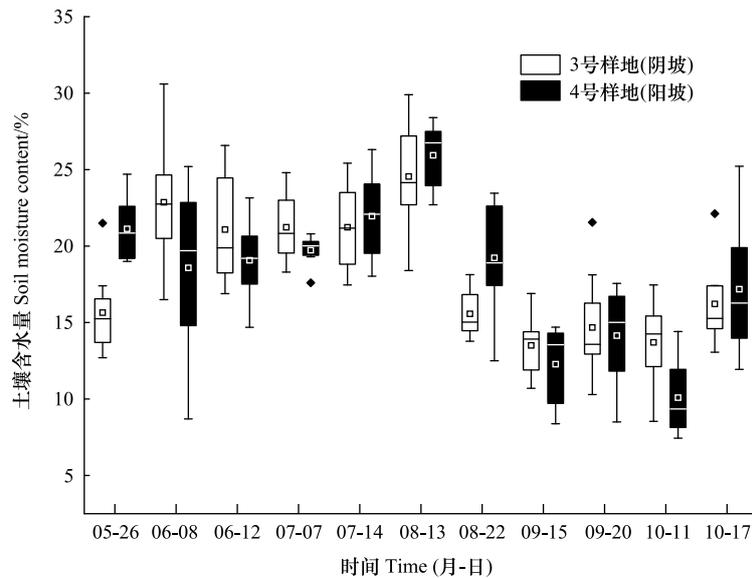


图 6 3 号和 4 号样地土壤水分在生长季内的变化

Fig.6 Variation of soil moisture in sample plots 3 and 4 within the growing season

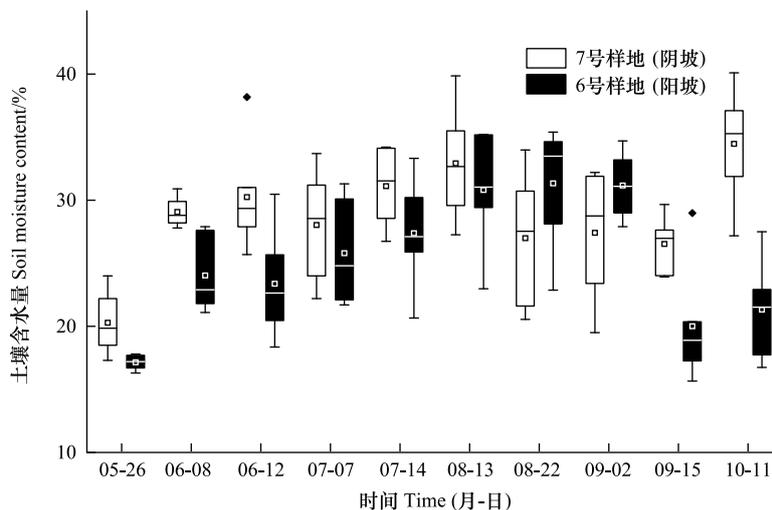


图 7 6 号和 7 号样地土壤水分在生长季内的变化

Fig.7 Variation of soil moisture in sample plots 6 and 7 within the growing season

可见,阴坡样地总体上的土壤水分要大于阳坡,并且变异系数要小于阳坡。但是从图 6 和图 7 可以发现,3500—3600 m 海拔区间,阴坡在生长季中期的土壤水分低于阳坡;而在 3600—3700 m 海拔区间,阴坡在生长季后期的土壤水分低于阳坡。

2.3.2 不同坡向土壤水分的空间变化

从图 8 可知,3 号样地的土壤水分随深度增加整体上表现为波动递减的变化,但是 4 号样地的变化趋势则是先增后减。3 号样地土壤水分最大值(20.63%)位于深度 10—20 cm 土层,最小值(15.73%)位于深度 70—80 cm 土层;4 号样地土壤水分最大值(19.83%)位于深度 30—40 cm 土层,最小值(16.03%)位于深度 0—10 m 土层。在表层 0—20 cm,4 号样地的土壤含水量明显低于 3 号样地,但在深度 30—50 cm 范围内,却是 4 号样地的土壤含水量更高,而在深度 50—70 cm 范围内,两者的土壤含水量十分接近。从图 9 可以看出,4 号样地的变异系数在垂直尺度上的变化波动较大,而 3 号样地的变异系数变化比较稳定。两条曲线的变化趋势均为波动递减,深度 0—10 cm 与 50—60 cm 的土层内 4 号样地的变异系数大于 3 号样地,但是在其他深度的土层内 4 号样地的变异系数更小。

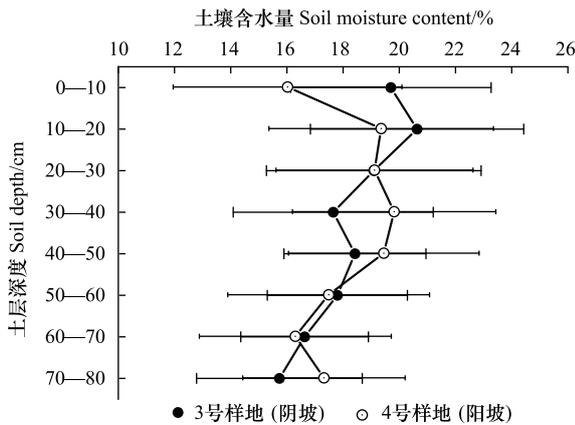


图 8 3 号与 4 号样地土壤水分垂直变化

Fig.8 Vertical variation of soil moisture in sample plots 3 and 4

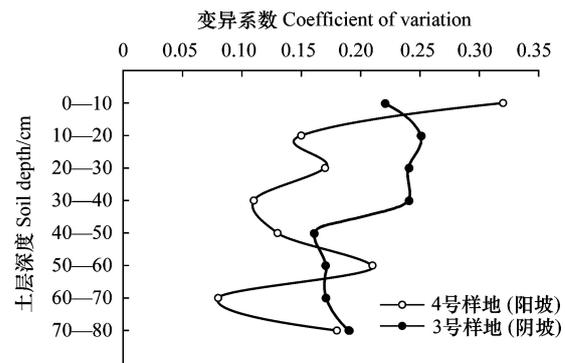


图 9 3 和 4 号样地土壤水分变异系数的垂直变化

Fig.9 Vertical variation of soil moisture's coefficient of variation in sample plots 3 and 4

如图 10 所示,6 号样地在深度 30—40 cm 土层的土壤水分最大,为 27.88%,最小值在 50—60 cm 土层,为 20.96%。7 号样地表层 0—10 cm 的土壤含水量最大,为 31.52%,深度 40—50 cm 土层含水量最小,为 26.57%。7 号样地在深度 30—50 cm 土层的含水量与 6 号样地接近,而在其他深度的土层含水量均明显大于 6 号样地,特别在深度 50—60 cm 的差距最大。在 0—40 cm 范围,两个样地的土壤水分垂直变化趋势类似,均表现为先减后增,而在 40—60 cm 土层两条曲线的变化趋势差异明显。在图 11 中,变异系数的两条曲线随深度的增加呈现先减后增再减少的变化趋势。6 号样地变异系数最大值(0.25)位于表层 0—10 cm,最小值(0.11)出现在深度 50—60 cm 土层。7 号样地变异系数最大值(0.22)位于深度 40—50 cm 土层,最小值(0.13)位于 10—20 cm 土层 6 号样地的变异系数在深度 0—40 cm 范围内大于 7 号样地,而在 40—60 cm 范围内小于 7 号样地。

阴阳坡的垂直尺度的差异主要表现在土壤表层,说明坡向主要影响表层土壤水分,并且这种影响与海拔有关;3500—3600 m 海拔区间,阴坡土壤表层 0—20 cm 的含水量大于阳坡,并且表层 0—10 cm 的土壤水分变异系数小于阳坡;3700—3800 m 海拔区间,具有以上的相同结论,并且影响深度为 0—40 cm。

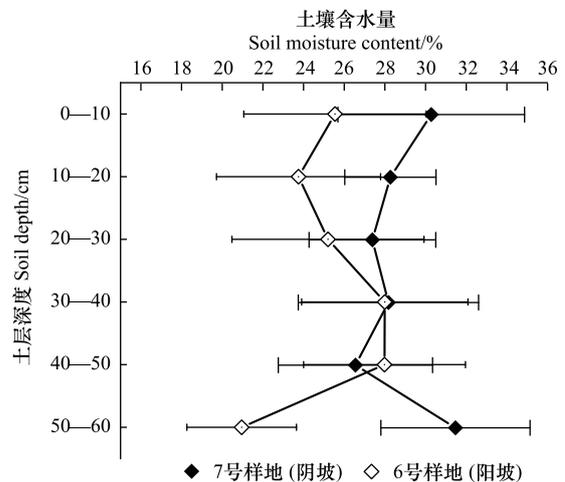


图 10 6 号与 7 号样地土壤水分垂直变化

Fig.10 Vertical variation of soil moisture in sample plots 6 and 7

2.4 不同海拔土壤水分时空变异特征

2.4.1 不同海拔土壤水分的时间变化

由上文 2.2 节和 2.3 节可知,植被类型与坡向在一定程度上会导致土壤水分的差异。为进一步剖析海拔对土壤水分的影响,选择 1、5、6、8 号样地,分别代表 3300—3400 m、3500—3600 m、3700—3800 m 和 3900—4000 m 海拔区间内的阳坡草地。生长季后期天气寒冷,冻土发育,增加了野外观测的难度,导致部分数据缺失。

图 12 为 1、5、6、8 号样地在生长季内土壤水分的变化情况。由此可知,生长季内各海拔区间土壤含水量均值从大到小依次为:3900—4000 m (33.87%) > 3700—3800 m (25.24%) > 3300—3400 m (19.46%) > 3500—3600 m (18.39%);生长季内各海拔区间土壤水分的变异系数从小到大依次为 3900—4000 m (0.07) > 3300—3400 m (0.12) > 3700—3800 m (0.20) > 3500—3600 m (0.29)。1、5、6、8 号样地土壤水分的最大值均出现在 8 月,分别为 23.19%、24.98%、31.34%、37.25%。

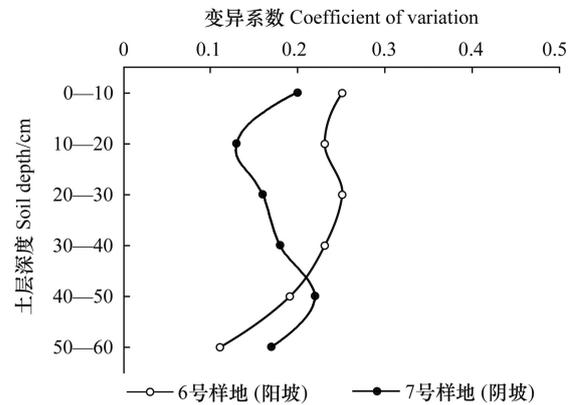


图 11 6 和 7 号样地土壤水分变异系数的垂直变化

Fig.11 Vertical variation of soil moisture's coefficient of variation in sample plots 6 and 7

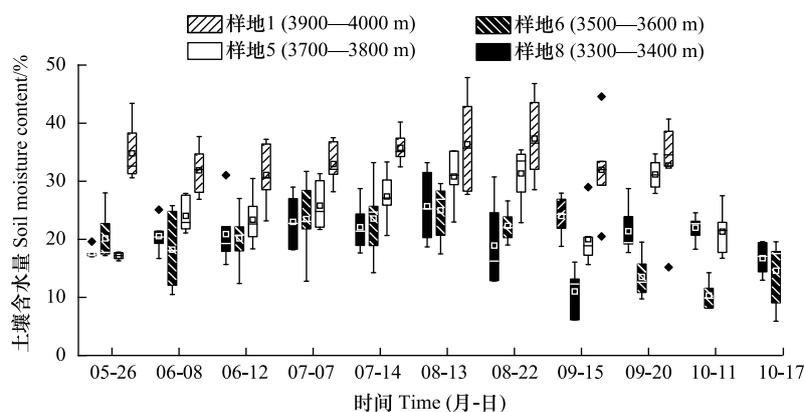


图 12 不同海拔阳坡草地土壤水分的时间变化

Fig.12 Temporal variation of soil moisture in grassland on sunny slopes at different elevations

2.4.2 不同土层土壤水分与海拔的关系

选择流域内所有的 8 个样地,将各个样地不同土层土壤水分的均值分别与海拔进行回归分析。利用 SPSS 软件的曲线评估功能,以不同土层土壤水分作为因变量,海拔作为自变量,选择拟合优度最高的回归模型。结果如表 2 所示,0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 和 30—40 cm 土层的最优模型均为线性, R^2 均不小于 0.80,同时 P 值均小于 0.01,说明这四个土层的土壤水分对海拔的响应程度较高并且对应的模型是有意义的。40—50 cm 与 50—60 cm 土层拟合优度最高的回归模型为二次模型,但这两个模型的 R^2 均小于 0.70,且 P 值大于 0.05,说明 40—50 cm 与 50—60 cm 土层对海拔变化的响应程度并不高,这两个模型的统计意义并不显著。

总的来说,在研究区的海拔范围内,深度 0—40 cm 土层的土壤水分与海拔呈正相关,土壤水分随海拔的上升而增加。海拔对表层 40 cm 土壤水分的影响程度从大到小排列为:30—40 cm > 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm。但是海拔对于土层深度超过 40 cm 处的土壤水分影响较弱。

表 2 不同土层土壤水分与海拔的拟合结果

Table 2 Results of fitting soil moisture to elevation for different soil horizons

土层/cm Soil layer	函数表达式 Function expression	模型种类 Model type	R^2	P
0—10	$VWC = 0.029A - 83.173$	线性	0.836	0.001
10—20	$VWC = 0.031A - 87.747$	线性	0.831	0.002
20—30	$VWC = 0.024A - 61.404$	线性	0.800	0.003
30—40	$VWC = 0.021A - 52.866$	线性	0.874	0.001
40—50	$VWC = (3.201E-5)A^2 - 0.217A + 386.808$	二次	0.520	0.159
50—60	$VWC = (6.164E-5)A^2 - 0.432A + 776.617$	二次	0.668	0.063

式中 WVC 为土壤体积含水量, A 为海拔

3 讨论

3.1 土壤水分在生长季内的变化及其对降水的响应

研究区内不同海拔的地区降雨量具有明显差异,并且这种差异主要集中于夏季。主要原因是高原夏季风的影响在时空上并不均匀^[25];在夏季风影响较弱的时期,降水量的差异并不大,然而夏季风强盛的时期,约为6—8月,夏季风为整个流域带来了大量的水汽,暖湿气流受地形的抬升作用遇冷最终形成降水,导致了流域内干湿季分明。海拔越高的地区气温越低,地形更加陡峭,对夏季风的抬升作用越明显,因此降雨量也越大。

降水是高寒山区土壤水分的最主要的补给来源,但土壤水分不同时期对降雨的响应程度不同。5—6月降水较少,但是土壤含水量较高,土壤水分对降水的响应程度较低。这是因为5—6月为消融初期,虽然降雨量较少,但得益于冰雪融水的补给,土壤含水量较高。6—8月是降水最多的时期,并且土壤水分也较大,说明在这一时期土壤水分对降雨的响应程度高。9—10月土壤水分为生长季内最低值。虽然9—10月的降水量与5—6月接近,但是9—10月为冻融期,土壤水分缺少了冰雪融水的补给,同时雨季结束后降水明显减少,但太阳辐射强度仍然保持在一个较高的水平,蒸散发较强,最终导致了土壤水分最低值出现在9—10月。

在高寒山区,降水具有明显的时空变化,干湿季分明,降水与海拔高度正相关。降水是高寒山区土壤水分的最主要补给,但土壤水分补给来源的多样性弱化了其对降水的响应。

3.2 植被类型对土壤水分时空变异特征的影响

灌丛主要生长在在流域内3300—3600 m海拔范围内,呈斑块状,是典型的灌木侵占草原的现象^[8]。在整个生长季内,草地的土壤含水量大于灌丛。因为草本植物耐寒耐旱性更强,更能适宜当地恶劣的环境,不需要过度消耗土壤水分^[26]。但在生长季始末灌丛的土壤含水量更高。在实地观测过程中发现,生长季前期草本植物比灌木更早开始返青,根系活动更强,因此耗水量更大。生长季末期气温降低,灌丛为适宜寒冷条件,生长活动放缓,耗水量减少,而草本植物的耐寒性更高,在此期间生长活动依旧活跃,从而导致耗水量更大。

对比4、5号样地,发现灌木在0—60 cm深度的土壤水分并不是都小于草本植物。在0—40 cm深度内,灌木的土壤含水量更小。这是因为灌木的根系更发达,生物量更大,需要消耗更多土壤水以维持正常的生长活动,导致在0—40 cm土层的土壤水分较低。而40—60 cm深度内,灌木的土壤含水量更大。主要原因在于灌木根系更深更发达,根系的生长显著改变了土壤结构,尤其是宏观孔隙度,从而导致土壤含水量分布高度均匀^[27]。灌木根系深度大,降水入渗深度大,使得40—60 cm深度的土壤得到更多降水补给,而草本植物根系较浅,40—60 cm土层孔隙度小,降水难以入渗补给,导致大量水分滞留在0—40 cm土层。

总的来说,植被类型对土壤含水量差异的影响较小,对土壤水分垂直变化差异的影响也较小,变异系数及其变化趋势相似度较高,说明植被类型对土壤水分的时空变化影响较弱。

3.3 坡向对土壤水分时空变异特征的影响

对比不同坡向土壤水分可以发现,阴坡的土壤水分总体上要大于阳坡,并且阴坡土壤表层的变异系数小于阳坡,可见阴坡受到外界环境的影响更小。因为坡向不同,土壤受到太阳辐射强度和光照时间不同。阳坡

受到更长时间的光照和更强的太阳辐射,加剧了土壤水分的蒸发,促进了植物的蒸腾,最终导致土壤水分低于阴坡。

在时间尺度上,3500—3600 m 海拔区间,阴坡在生长季中期的土壤水分低于阳坡;而在 3600—3700 m 海拔区间,阴坡在生长季后期的土壤水分低于阳坡。8 月后西风急流南移,导致西风增强^[28]。阳坡的坡面朝南,为迎风坡,而阴坡坡面朝北,为背风坡。当发生降水时,阳坡作为迎风坡更容易获得更多的降水补给。生长季中期为强消融期^[29],冰雪融水的再分配过程对阴阳坡的土壤水分差异也可能产生了一定的影响。同时,生长季后期太阳辐射时长减少,强度减弱,由此产生的阴阳坡土壤水分差异变小。

阴阳坡的垂直尺度的差异主要集中于土壤表层,说明坡向主要影响表层土壤水分,并且这种影响与海拔有关:在 3500—3600 m 海拔区间,阴坡土壤表层 0—20 cm 的含水量大于阳坡,并且表层 0—10 cm 的土壤水分变异系数小于阳坡;而在 3700—3800 m 海拔区间,具有以上的相同结论,并且影响深度为 0—40 cm。

3.4 海拔对土壤水分时空变异特征的影响

由本文的 2.4.1 可知,3900—4000 m 海拔区间内土壤含水量大并且在生长季内变化较稳定。3500—3600 m 海拔区间内土壤含水量小并且在生长季内变化幅度较大。由此可以看出海拔对于土壤水分的含量以及变化幅度都有一定的影响。海拔主要通过影响多种环境因子间接影响土壤水分的时空变化影响。首先,海拔影响气象因子,主要包括降水,温度和光照等^[30]。其次,海拔通过影响水热条件间接影响植物群落种类及其分布^[31]。再次,海拔与土壤水分渗透性成正比,高海拔土壤水分的表面径流和壤中流可能对低海拔土壤水分提供一定的补给^[32]。另外由本文的 2.4.2 可知,在研究区的海拔范围内,表层土壤水分与海拔高度呈正相关。这是因为高海拔地区有更多的降水补给土壤水分,并且在消融期时,高海拔地区土壤来自冰雪融水的补给更多,同时气温低土壤蒸发弱,植被生物量少耗水也少。表层土壤水分(特别是 0—40 cm)与海拔的关系更显著,这主要是因为海拔对多种环境因子的影响下,间接影响表层土壤水分,并且在这些影响中气候因子占了很大的比重,所以这种影响容易受到土壤深度的限制,难以影响更深层的土壤。

不同海拔土壤水分的垂直变化不同。这是因为海拔不同,不同土层土壤水分的补给来源的占比不同。冰雪融水在高海拔地区土壤水分中的占比相对较高,而在低海拔地区土壤水分中的占比相对较低。其次,冰雪融水在各土层中的比例随深度增加而增加,并且该比例也随消融强度动态变化^[23]。由于上述原因最终导致不同海拔土壤水分的垂直变化规律十分复杂。

4 结论

(1) 灌丛与草地的土壤水分差异较小,并且不同土层土壤水分的变异系数和变化趋势相似度高,说明植被类型对土壤水分的时空变化影响较弱。但由于本实验只有一组对照,存在一定的偶然性。

(2) 阴坡土壤水分总体上大于阳坡,并且在生长季内的变异系数要小于阳坡。但是,在 3500—3600 m 海拔区间,阴坡在生长季中期的土壤水分低于阳坡;在 3600—3700 m 海拔区间,阴坡在生长季后期的土壤水分低于阳坡。其次,阴阳坡的土壤水分垂直差异主要出现在土壤表层,说明坡向主要影响表层土壤水分,并且这种影响与海拔有关:3500—3600 m 海拔区间,阴坡土壤表层 0—20 cm 的含水量大于阳坡,并且表层 0—10 cm 的土壤水分变异系数小于阳坡;3700—3800 m 海拔区间,也具有以上的结论,并且影响深度为 0—40 cm。

(3) 海拔对于土壤含水量及其变异系数都有一定的影响。生长季内各海拔区间土壤含水量均值从大到小依次为:3900—4000 m>3700—3800 m>3300—3400 m>3500—3600 m;生长季内各海拔区间土壤水分的变异系数从大到小依次为 3900—4000 m>3300—3400 m>3700—3800 m>3500—3600 m。0—40 cm 土层的土壤水分与海拔高度为正相关关系,并且土壤水分与海拔的最优模型均为线性回归模型。海拔对 0—40 cm 土层的土壤水分影响程度从大到小排列为:30—40 cm>0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm。

参考文献(References):

- [1] Zhang Z W, Yin H Y, Chang J J, Xue J. Spatial variability of surface soil water content and its influencing factors on shady and sunny slopes of an

- alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 34: e02035.
- [2] Qin Y H, Wu T H, Wu X D, Li R, Xie C W, Qiao Y P, Hu G J, Zhu X F, Wang W H, Shang W. Assessment of reanalysis soil moisture products in the permafrost regions of the central of the Qinghai-Tibet Plateau. *Hydrological Processes*, 2017, 31(26): 4647-4659.
- [3] Jiang K, Pan Z H, Pan F F, Wang J L, Han G L, Song Y, Zhang Z Y, Huang N, Ma S Q, Chen X. Influence patterns of soil moisture change on surface-air temperature difference under different climatic background. *The Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153607.
- [4] Cheema M J M, Bastiaanssen W G M, Rutten M M. Validation of surface soil moisture from AMSR-E using auxiliary spatial data in the transboundary Indus Basin. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(1/2): 137-149.
- [5] Guo Z S. Soil water carrying capacity for vegetation. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(14): 3801-3811.
- [6] Zhu X C, Shao M G, Liang Y, Tian Z Y, Wang X, Qu L L. Mesoscale spatial variability of soil-water content in an alpine meadow on the northern Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, 2019, 33(19): 2523-2534.
- [7] 李宗省, 张百娟, 冯起, 桂娟, 张百婷. 我国西部高寒山区同位素生态水文研究进展. *地球科学*, 2023, 48(3): 1156-1178.
- [8] Cheng R R, Chen Q W, Zhang J G, Shi W Y, Li G Q, Du S. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: a multi-year study in the Loess Hilly Region in China. *Ecohydrology*, 2020, 13(3): e2196.
- [9] Meng F H, Luo M, Sa C L, Wang M L, Bao Y H. Quantitative assessment of the effects of climate, vegetation, soil and groundwater on soil moisture spatiotemporal variability in the Mongolian Plateau. *The Science of the Total Environment*, 2022, 809: 152198.
- [10] Zhou J, Wen J, Liu R, Wang X, Xie Y. Late spring soil moisture variation over the Tibetan Plateau and its influences on the plateau summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(12): 4597-4609.
- [11] Corrao M V, Link T E, Heinse R, Eitel J U H. Modeling of terracette-hillslope soil moisture as a function of aspect, slope and vegetation in a semi-arid environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(10): 1560-1572.
- [12] Shan Y L, Xie J C, Lei N. Spatial distribution characteristics of soil moisture in different slopes on Loess Gully Region. *Agronomy Journal*, 2023, 115(2): 997-1005.
- [13] Shen M S, Zhang J J, Zhang S H, Zhang H B, Sun R X, Zhang Y Z. Seasonal variations in the influence of vegetation cover on soil water on the loess hillslope. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(9): 2148-2160.
- [14] Guo T, Hou Q, Wu Y, Zhang L. Spatial and temporal evolution of vegetation water consumption in arid and semi-arid areas against the background of returning farmland to forestland. *Sustainability*, 2022, 14(22): 59.
- [15] Osenga E C, Amott J C, Endsley K A, Katzenberger J W. Bioclimatic and soil moisture monitoring across elevation in a mountain watershed: opportunities for research and resource management. *Water Resources Research*, 2019, 55(3): 2493-2503.
- [16] 高红侠. 典型高寒山区八宝河流域土壤水分的时空变异性与降尺度研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [17] Zhang L H, He C S, Zhang M M, Zhu Y. Evaluation of the SMOS and SMAP soil moisture products under different vegetation types against two sparse in situ networks over arid mountainous watersheds, Northwest China. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(4): 703-718.
- [18] Zhu X, He Z B, Du J, Chen L F, Lin P F, Tian Q Y. Soil moisture temporal stability and spatio-temporal variability about a typical subalpine ecosystem in northwestern China. *Hydrological Processes*, 2020, 34(11): 2401-2417.
- [19] 杨羽帆, 曹生奎, 冯起, 曹广超, 刘英, 雷义珍. 青海湖沙柳河流域浅层地下水氢氧稳定同位素分布特征. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 45-53.
- [20] 李成秀, 李小雁, 杨太保, 李岳坦. 青海湖流域沙柳河草甸群落结构与数量特征. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 1028-1035.
- [21] 成淑艳, 曹生奎, 曹广超, 韩建平, 汉光昭, 吴方涛. 基于高分辨率遥感影像的青海湖沙柳河流域土地覆盖监督分类方法对比. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 261-268, 353.
- [22] 侯瑶芳, 曹生奎, 曹广超, 王志刚, 王有财, 康利刚. 青海湖沙柳河流域土壤水氢氧稳定同位素组成与土壤贮水量关系. *中国沙漠*, 2022, 42(6): 153-164.
- [23] Gui J, Li Z X, Du F, Xue J, Zhang B J, Wang D P, Ruan J L. Source of soil water in cold regions based on stable isotope tracers. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 45: e02518.
- [24] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 吕焯, 付小军. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系. *生态学报*, 2012, 32(4): 198-206.
- [25] Li Z J, Li Z X, Song L L, Ma J Z. Characteristic and factors of stable isotope in precipitation in the source region of the Yangtze River. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: 107825.
- [26] Xue J, Li Z X, Feng Q, Gui J, Zhang B J. Spatiotemporal variations of water conservation and its influencing factors in ecological barrier region, Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 42: 101164.
- [27] Zhang J, Li Y, Yang T, Liu D, Liu X, Jiang N. Spatiotemporal variation of moisture in rooted-soil. *Catena*, 2021, 200: 105144.
- [28] Jiang X W, Cai F Y, Li Z N, Wang Z Y, Zhang T T. The westerly winds control the zonal migration of rainy season over the Tibetan Plateau. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 363.
- [29] Gui J, Li Z X, Zhang B J, Xue J, Du F, Si L P. Particularity of hydrological processes under heavy ablation based on environmental isotopes in transition zones between endorheic and exorheic basins. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118198.
- [30] Gao M, Chen X, Li G X, Wang J R, Dong J Z. Impacts of elevational variability of climate and frozen ground on streamflow in a glacierized catchment in Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129312.
- [31] Song L L, Tian Q, Li G, Li Z X, Liu M Q, Xu B. Response of soil properties to C, N, and P stoichiometry of plants in Qilian Mountains, China. *Ecological Indicators*, 2023, 150: 110245.
- [32] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 张希来, 孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 100-107.