

祁连山南麓高寒禾草-矮嵩草草甸 土壤水源涵养功能的特征

李红琴¹, 王卓权¹, 张法伟^{2,3,4}, 仪律北⁵, 郭小伟³,
李以康³, 林丽³, 曹广民³, 李英年^{2,3}, 周华坤^{3,4}

(1. 洛阳师范学院 生命科学学院, 河南 洛阳 471934; 2. 中国科学院 三江源国家公园研究院, 西宁 810001;

3. 中国科学院 西北高原生物研究所高原生物适应与进化重点实验室 西宁 810001; 4. 中国科学院

西北高原生物研究所青海省寒区恢复生态学重点实验室 西宁 810001; 5. 青海省林业和草原局林业碳汇服务中心, 西宁 810008)

摘 要: 青藏高原被誉为“中华水塔”, 高寒草甸是主要植被类型但其水源涵养功能有待准确量化。以祁连山南麓高寒禾草-矮嵩草草甸为研究对象, 通过分析 2014—2018 年的植被生长季(6—9 月)土壤体积含水量的长期观测数据, 探讨了土壤有效水源涵养量(土壤现实持水量与最小持水量之差)和水文调节功能(有效水源涵养量的时间变化速率)的变化特征及其环境调控机制。结果表明: 高寒草甸 0—100 cm 年均土壤有效水源涵养量为 (44.3 ± 8.7) mm(平均值±标准差, 下同), 呈现出双峰型的季节趋势, 最高峰和次高峰分别为 6 月下旬的 (57.8 ± 14.4) mm 和 9 月中旬的 (59.2 ± 15.7) mm。浅层(0—20 cm)、中层(20—60 cm)和深层(60—100 cm)土壤有效水源涵养量占比分别为 53.1%, 34.9% 和 12.0%, 土壤有效含水源涵养量随土层深度增加表现为对数衰减($R^2 = 0.82, p < 0.001$)。增强回归树的结果表明土壤有效水源涵养量的季节变化主要受控于土壤温度, 尤其是 5 cm 土壤温度, 二者呈现出显著负相关。不同深度的年均土壤有效水源涵养量和土壤黏粒比例显著负相关($R^2 = 0.99, p = 0.004$)。根系区(0—40 cm)年均土壤吸湿速率和脱湿速率分别为 (0.21 ± 0.02) mm/h 和 (0.22 ± 0.02) mm/h, t 检验的结果表明除了 0—5 cm 之外, 根系区土壤脱湿速率显著大于吸湿速率。分析表明土壤温度是土壤吸湿和脱湿速率的显著环境驱动因子。因此, 土壤温度是高寒禾草-矮嵩草草甸土壤有效水源涵养量和水文调节功能的主要影响因素, 维持土壤的低温是高寒草甸水源涵养功能保育和提升的重要基础。

关键词: 禾草-矮嵩草草甸; 土壤有效水源涵养量; 土壤吸湿速率; 土壤脱湿速率; 增强回归树

中图分类号: S812

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)03-0135-07

Soil Water Conservation Function of an Alpine Graminoid-Kobresia Meadow on the Southern Slope of the Qilian Mountains

LI Hongqin¹, WANG Zhuoquan¹, ZHANG Fawei^{2,3,4}, YI Lyubei⁵, GUO Xiaowei³,
LI Yikang³, LIN Li³, CAO Guangmin³, LI Yingnian^{2,3}, ZHOU Huakun^{3,4}

(1. College of Life Sciences, Luoyang Normal University, Luoyang, Henan 471934, China;

2. Institute of Sanjiangyuan National Park, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

3. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology,

Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 4. Qinghai Provincial Key Laboratory of Restoration

Ecology in Cold Region, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008,

China; 5. Forestry Carbon Sequestration Service Center, Qinghai Forestry and Grassland Bureau, Xining 810008, China)

Abstract: The Qinghai-Tibetan Plateau is well-known as ‘water towers for China’, and alpine meadow is one of the most important vegetation types while its water conservation capacity remains unclear. The continuous volumetric soil water content data of an alpine graminoid-Kobresia meadow were analyzed to quantify the

收稿日期: 2021-04-23

修回日期: 2021-05-22

资助项目: 国家自然科学基金(41730752); 中国科学院—青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-07); 国家重点研发计划(2017YFA0604802); 青海省重点实验室发展专项(2021-ZJ-Y01)

第一作者: 李红琴(1981—), 女, 河南义马人, 博士, 副教授, 主要从事高寒草地碳水过程的研究。E-mail: lihongqin_00@126.com

通信作者: 张法伟(1981—), 男, 河南义马人, 博士, 副研究员, 主要从事高寒草地生态水文学的研究。E-mail: fwzhang@nwipb.cas.cn

effective soil water storage (the difference of measured soil water storage and minimal soil water storage) and soil hydrological regulation function (the temporal rate of effective soil water storage) and their environmental controls during the growing season (mid-June through end-September) on the southern foot of the Qilian Mountains from 2014 to 2018. The results showed that the annual total (0—100 cm) effective soil water storage averaged (44.3 ± 8.7) mm (Mean \pm S. D., the same below) and exhibited a bimodal season pattern, with the first peak of (57.8 ± 14.4) mm at the end of June and the second peak of (59.2 ± 15.7) mm in the middle of September; the shallow layer (0—20 cm), mid-layer (20—60 cm) and deep layer (60—100 cm) accounted for 53.1%, 34.9% and 12.0% of total effective soil water storage, respectively; effective soil water storage was negatively related to soil depth logarithmically ($R^2 = 0.82$, $p < 0.001$). The boosted regression trees showed that the seasonal variations of effective soil water storage were mainly regulated by soil temperatures, especially by 5 cm soil temperature, where they negatively correlated. The annual soil water storage along soil depths was closely related to the ratio of soil clay ($R^2 = 0.99$, $p = 0.004$). The average annual soil moisture absorption rate and dehumidification rate of the root zone (0—40 cm) were (0.21 ± 0.02) mm/h and (0.22 ± 0.02) mm/h, respectively. The t-test showed that, except 0—5 cm soil layer, the soil dehumidification rate was significantly greater than the moisture absorption rate in the root zone. Correlation analysis revealed that soil temperatures more than soil moistures drove the season variations of soil moisture absorption and dehumidification rate. Therefore, soil temperature was the main factor influencing the effective soil water conservation and hydrological regulation function of alpine graminoid-*Kobresia* meadows. These findings suggested that maintaining low soil temperatures would be an important basis for persevering and improving the water retention function of alpine meadows.

Keywords: Graminoid-*Kobresia* meadow; effective soil water storage; soil moisture absorption rate; soil dehumidification rate; boosted regression trees

青藏高原被誉为“中华水塔”,是我国“三屏两带”生态安全战略格局的重要组成部分。高寒草甸约占高原面积的 25%,是其水源涵养功能发挥的重要基质^[1-2]。高寒草甸水源涵养功能主要集中在土壤水源涵养能力,是降水输入和蒸散发及渗漏支出等水量平衡要素的综合体现^[3-4]。深入研究高寒草甸土壤水源涵养功能,不仅有助于理解高寒系统的生态水文过程,而且对区域水资源评估和生态文明建设具有重要实际意义^[5]。

土壤水源涵养功能受控于气候、植被、土壤属性等因素,体现在土壤水分的时空动态变化上^[6]。土壤水源涵养功能的量值可用有效土壤水分含量表示,即土壤田间含水量与凋萎含水量之差^[7],是土壤水分承载力的最大负荷^[8],作为生态系统“绿水”的重要组成部分,影响着生产、生活、生态等“三生”功能的供给和权衡^[5]。土壤水文调节功能,是有效土壤水分含量在时间尺度上的变化特征^[6],偏重于表述水源涵养功能的变化过程^[5]。高寒草甸土壤水源涵养功能和土壤质地^[4]、土壤有机碳^[9-10]、植物根系^[11]及草毡层^[3]密切相关,而且受草地退化状态^[12-13]、植被覆盖^[14]乃至群落物种组成^[15]的显著影响。高寒系统植被生长季的土壤水源涵养功能主要受内部土壤属性(土壤理化属性)和外部因

素(气候、植被、土壤水热)共同影响^[4]。其中,土壤属性和植被特征是影响土壤水源涵养和水文调节功能的最重要因素,并且土壤属性和植被特征也相互影响,形成了复杂的耦合过程^[9-10]。目前大部分研究多集中在土壤水源涵养功能的量值变化特征及其对草地退化^[3, 9]和恢复措施^[16]的响应上,但研究结果的时间分辨率较低,多为年季尺度,且对高寒草甸土壤水文调节功能的研究甚少。

为了量化土壤水源涵养功能的变化特征,本文以祁连山南麓高寒禾草-矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸为对象,利用 2014—2018 年生长季(6—9 月)连续监测的土壤体积含水量数据,研究有效土壤含水量及其速率的年内特征和环境驱动机制,明晰土壤水源涵养的变化规律,从量值的范围 and 变化角度综合评估土壤水源涵养功能,为高寒草甸生态系统水源涵养服务功能的形成机制和科学评估提供理论依据和数据基础。

1 材料与方法

1.1 研究点概况

试验点在青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站(简称海北站, $37^{\circ}37'N$, $101^{\circ}19'E$, 海

拔 3 200 m)的综合观测场内。海北站地处青藏高原东北隅,为典型的高原大陆性气候,年均气温和降水分别为-1.7℃和 580 mm,雨热同季。植被类型为高寒禾草-矮嵩草草甸,优势种为矮嵩草、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)、麻花艽(*Gentiana straminea*)和甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)等。年植被地上净初级生产力与 0—40 cm 地下根系生物量分别为 8

月底的 401.7 g/m²、9 月底的 3 238.8 g/m²,其中 90%的根系生物量集中在 0—20 cm 土层中^[17]。土壤类型为高山草甸土,发育相对年轻,粗骨性强。浅层(0—20 cm)土壤的砂粒、粉粒和黏粒的比例分别为 44.45%, 49.30%和 6.25%。平均浅层土壤容重和有机质含量分别为 0.95 g/cm³, 9.30%,田间持水量和凋萎含水量分别约为 79.0, 53.5 mm(表 1)^[3,18]。

表 1 研究点根系集中区土壤分层的理化性状

土层 深度/cm	土壤机械组成			土壤有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	阳离子交换量/ mmol	土壤 pH
	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%				
0—10	38.89±1.76	57.54±1.96	3.54±0.21	151.89±11.69	0.74±0.05	607.85	7.35
10—20	55.55±3.27	38.64±3.83	5.79±0.57	72.37±10.66	1.06±0.06	502.12	7.35
20—30	60.01±0.39	32.92±0.69	7.05±0.31	59.68±10.00	1.04±0.03	502.27	7.36
30—40	61.06±0.23	30.8±0.23	8.12±0.03	42.01±1.24	1.08±0.02	419.23	8.00

1.2 土壤水分数据

1.2.1 土壤有效水源涵养量 土壤体积含水量(SWC)和土壤温度(T_s)由同轴阻抗介质反射仪(Hydra probe II, Stevens, 美国)同步测定,观测设备安装于 2014 年 5 月。观测的土层深度依次为 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 cm,观测频率为 30 min,测量数据记录在数据采集器 CR800(Campbell, 美国)中。同时,本研究也假设观测层次的土壤水分分别代表 0—5, 5—10, 10—15, 15—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 60—80, 80—100 cm 的土壤水分的平均值,土壤总储水量(Soil water storage, SWS)为土壤体积含水量与对应土壤层次的积分(式 1)^[3,18]。

$$SWS_e = \int_0^i (SWS_i - SWS_{min,i}) = \int_0^i (SWC_i - SWC_{min,i}) \times D_i$$
(1)

式中: SWS_e , SWS_i 和 $SWS_{min,i}$ 分别为土壤总有效水源涵养量、第 i 层土壤储水量和第 i 层土壤最小储水量(mm); SWC_i 和 $SWC_{min,i}$ 分别为观测的第 i 层土壤体积含水量和第 i 层土壤最小体积含水量; D_i 为第 i 层土层深度(mm)。

依据高寒草甸植物根系和土壤分层特性,将 0—20, 20—60, 60—100 cm 划分为浅层土壤、中层土壤和深层土壤。由于高寒草甸 0—100 cm 土层中存在季节冻土,仪器无法观测土壤固态水分,本研究以土壤温度大于 0℃为阈值判别土壤是否存在固态水分以筛选有效土壤水分数据。资料分析表明该时段集中在 6 月中旬至 9 月底,因此,本文所采用数据集的时间段为 6 月 15 日至 9 月 30 日(即序列日 166(167)—273(274))^[19]。由于土壤凋萎含水量常为室内测定且可能高估土壤有效水含量,本文定义土壤有效水源涵养量(Effective soil water storage, SWS_e)为土壤总储水量(SWS)与研究时段内土壤最小储水量

(SWS_{min})之差。其中,0—5, 5—10, 10—15, 15—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 60—80, 80—100 cm 的 SWS_{min} 分别为 2016 年 8 月中旬的 5.2, 9.9, 5.2, 14.2, 24.2, 30.9, 31.3, 26.6, 62.1, 21.4 mm,该时段对应着近几十年来最强厄尔尼诺事件所引发的极端高温天气^[20]。0—40 cm 的 SWS_{min} 为 89.6 mm,略高于基于压力膜法在 1 500 kPa 时测定的土壤凋萎含水量(85.7 mm)^[3],这表明本文研究方法可信度较高。本文利用 2014 年 8 月至 2018 年 9 月的数据进行分析。

1.2.2 土壤水文调节功能 为了降低土壤厚度的加权影响,本文定义土壤的水文调节能力为第 i 层土壤含水量(SWC)随时间的自然变化斜率($\Delta SWC_i / \Delta h$),时间步长为观测频率(0.5 h)。当斜率为正时,表示土壤吸湿(吸水)速率,反之则为脱湿(供水)速率,类似于土壤水分特征曲线的吸湿曲线和脱湿曲线的斜率,即土壤的比水容量。为了降低降水等异常天气的影响,按照 4.5 倍标准差的数据质控方法剔除异常值。

1.2.3 环境和生物因子 本文主要环境因子来自于西南处水平距离 80 m 的涡度相关系统的同步观测数据,主要包括:系统蒸散发(ET)、空气温度(T_a)、2.2 m 处风速(W_s)、水汽饱和亏(VPD)、降水(Rain)、太阳短波辐射(R_s)、净辐射(R_n)。土壤温度(T_s)则为土壤含水量的同步观测值,经初步相关分析之后,选择浅层 5 cm,中层 30 cm,深层 100 cm 的土壤温度(T_{s-5} , T_{s-30} , T_{s-100})进行后续分析。植被因子数据来源于以涡度相关系统为中心的 MODIS 增强植被指数 EVI(MOD13Q1)产品,空间分辨率为 250 m×250 m,时间分辨率为 16 d(线性内插至 8 d),样本数为 61。同时,逐月尺度上,生物因子增加了收获法获取的地上生物量和 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 的地下生物量,分别利用 50 cm×50 cm 的样方

框和内径 7 cm 的根钻进行 10 个和 25 个重复取样所得,样本数为 18。

1.3 统计分析

利用增强回归树模型(Boosted regression trees, BRT)分析主要环境因子(ET, T_a , W_s , VPD, Rain, R_s , R_n , T_s-5 , T_s-30 , T_s-100 和 EVI)对土壤有效水源涵养量的相对影响强度, BRT 是基于分类回归树算法的机器学习语言,对模型中自变量的非正态概率分布及共线性具有较大的容忍度,并可以识别自变量与因变量的非线性关系^[21],在生态学和水文学的相关研究中得到广泛应用^[22]。模型中主要参数抽样比例(Bag.fraction),学习速率(Learning.rate),树的复杂度(Tree.complexity)分别为 0.5, 0.001, 5, 并进行 10 次交叉验证。利用 R 软件中的 Dismo^[23] 实现增强回归树模型。为了降低异常天气的影响,按照序列日将不同年份的土壤有效水源涵养量进行平均,以获取不同层次土壤有效水源涵养量的一般季节变化特征。针对土壤水文调节功能,利用 t 检验分析土壤吸湿速率和脱湿速率的差异水平,同时,基于一般线性模型探讨土壤水分含量和土壤温度对其的影响程度。统计分析均在 R 4.0.3 中完成。

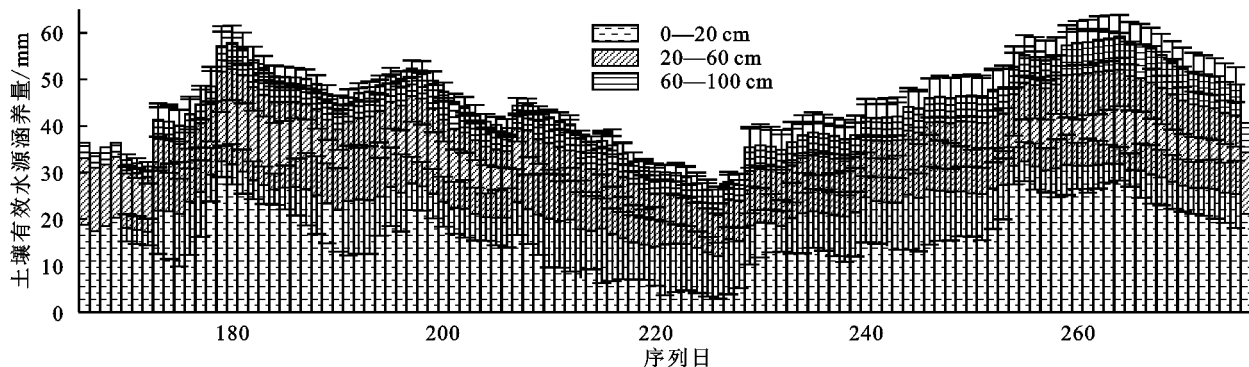


图1 高寒草甸浅层土壤有效水源涵养量的平均季节变化特征

2.2 土壤有效水源涵养量的环境调控因子

8 d 时间尺度上,浅层、中层、深层和全层 SWS_e 的增强回归树模型的平均总方差和剩余残差分别为 72.18, 22.20 ($R^2 = 0.69$), 55.76, 17.72 ($R^2 = 0.68$), 12.31, 5.32 ($R^2 = 0.57$) 及 335.40, 104.76 ($R^2 = 0.69$), 表明模型对数据样本具有较高的解释力。表层(T_s-5)、深层土壤温度(T_s-100),尤其是 T_s-5 ,对土壤有效水源涵养量的相对影响最大(大于 15%,图 2)。相关分析表明, T_s-5 和不同层次的土壤有效水源涵养量均呈现出显著的负相关关系(图 3)。逐月尺度上,逐步回归的结果表明,增强植被指数(EVI)是浅层 SWS_e 的唯一显著影响因素,二者表现为负线性相关($R^2 = 0.29$, $p = 0.013$),和全层 SWS_e 存在一定的负相关性($R^2 = 0.19$, $p = 0.072$)。主要环境因子与中层和深层的 SWS_e 无显著相关关系($p > 0.14$)。相

2 结果与分析

2.1 土壤有效水源涵养量的季节变化

土壤有效水源涵养量呈现出明显的双峰型季节变化特征(图 1)。年均 0—100 cm 土壤有效含水量(SWS_e)为 (44.3 ± 8.7) mm (平均值 \pm 标准差,下同),其中两个高峰分别为 6 月下旬的 (57.8 ± 14.4) mm 和 9 月中旬的 (59.2 ± 15.7) mm。其中,年均浅层、中层和深层的 SWS_e 分别为 (25.3 ± 5.2) , (15.4 ± 3.1) , (5.3 ± 1.0) mm, 约占全部 SWS_e 的 53.1%, 34.9% 和 12.0%。各层 SWS_e 的变异系数分别为 20.5%, 20.1% 和 18.9%, 暗示深层土壤有效水源涵养能力相对稳定。 SWS_e (y) 随土层深度(x) 增加呈现出对数衰减的规律($y = 7.25 - 1.04 \ln(x - 4.84)$, $R^2 = 0.82$, $p < 0.001$)。逐步回归的结果表明 SWS_e 的变化主要受控于 15—20 cm 的 SWS_e ($R^2 = 0.98$, $p < 0.001$)。在 8 d、月和年时间尺度上,表层、中层和深层 SWS_e 存在显著的相关性($R^2 > 0.44$, $p < 0.001$),尤其是表层与中层($R^2 > 0.84$)、中层和深层($R^2 > 0.90$)。

关分析表明不同土层的 SWS_e 与土壤物理结构和土壤有机质含量显著相关($p < 0.02$, $N = 4$),尤其是土壤中的黏粒比例,极显著负线性相关与 SWS_e ($R^2 = 0.99$, $p = 0.004$)。年际尺度上, SWS_e 与环境因子无显著相关($p > 0.16$)。

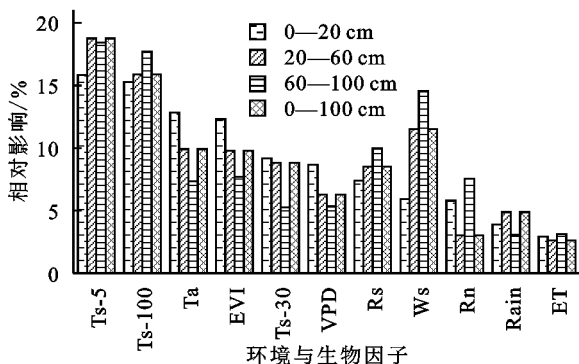


图2 环境和生物因子对浅层土壤有效水源涵养量的相对影响

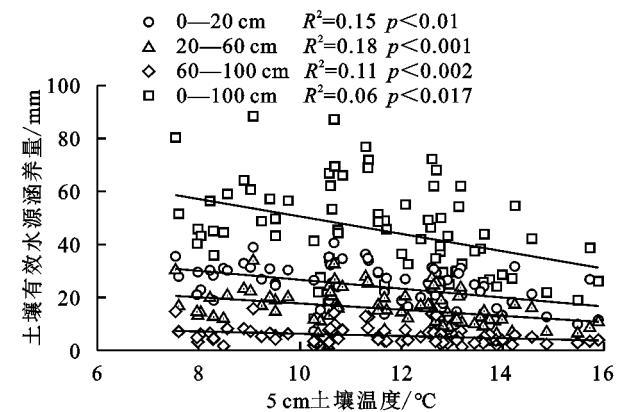


图 3 土壤有效水源涵养量与 5 cm 土壤温度的关系

2.3 土壤吸湿速率和脱湿速率

根系集中区的 5,10,15,20,30,40 cm 土壤的吸湿速率和脱湿速率如图 4 所示,两样本 t 检验的结果表明除了 5 cm 土壤的吸湿速率和脱湿速率无显著差别($p=0.88$)外,其余相同土层的脱湿速率显著高于吸湿速率($p<0.05$)。因此,根系区(0—40 cm)年均土壤吸湿速率和脱湿速率分别平均为 (0.21 ± 0.02) mm/h, (0.22 ± 0.02) mm/h,脱湿速率较吸湿速率显著高 4.8%。

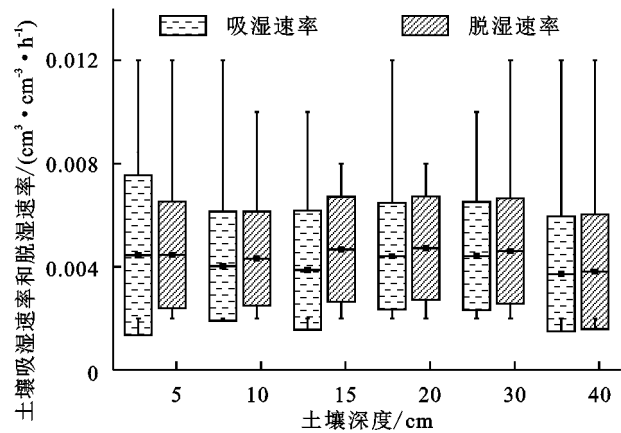


图 4 根系区不同土壤层次土壤吸湿和脱湿速率

2.4 土壤吸湿速率和脱湿速率的影响因素

土壤吸湿速率和脱湿速率与土壤温度、土壤水分、土层深度、月份和年份的一般线性模型表明(表 2),土壤吸湿速率和脱湿速率没有显著的年际波动($p>0.12$),但有明显的季节($p<0.03$)和深度($p<0.001$)变化。Turkey 多重比较的结果表明 5,30,20 cm 的土壤吸湿速率显著最大,10,15,40 cm 依次降低。20,15,30 cm 的土壤脱湿速率显著最大,5,10,40 cm 依次显著减少。而月份的多重比较结果表明 8 月、9 月吸湿速率显著最大,6 月最小,7 月居中。而脱湿速率在 7 月最大,其余月份无显著差异。

根系区土壤吸湿速率(AR)受到土壤温度(T_s)和土壤水分(SWC)的显著影响($p<0.05$,表 2,图 5),二者的单独解释力度均较小($R^2<0.10$),但二者联合起来可解释土壤吸湿速率变异的 23%($AR=0.12+0.14SWC+$

$0.0046T_s$, $p<0.001$)。土壤脱湿速率(DR)和土壤温度显著正相关,但和土壤水分关系较弱($p=0.27$)。不同深度的根系区土壤吸湿速率和脱湿速率与土壤理化性状没有显著相关关系($p>0.44$, $N=4$)。

表 2 根系区土壤吸湿速率和脱湿速率一般线性模型分析

参数	因素	自由度	离差平方和	均方	p 值
土壤吸湿速率	土壤温度	1	6.81E-07	28.8600	0.001
	土壤水分	1	5.66E-07	23.9686	0.001
	土层深度	5	1.44E-06	12.1909	0.001
	月份	3	3.46E-07	4.8866	0.003
	年份	4	1.53E-07	1.6244	0.170
	残差	93	2.20E-06		
土壤脱湿速率	土壤温度	1	1.26E-11	4.6169	0.030
	土壤水分	1	5.39E-12	1.9709	0.160
	土层深度	5	1.85E-10	13.5111	0.001
	月份	3	2.54E-11	3.0942	0.030
	年份	4	2.04E-11	1.8616	0.120
	残差	93	2.55E-10		

3 讨论

3.1 土壤有效水源涵养量

土壤有效水源涵养量呈现出双峰型季节趋势,最高峰和次高峰分别出现在 9 月中旬和 6 月下旬。这是降水输入项和蒸散发及渗漏等输出项季节趋势的综合表现^[5-6,24]。研究区降水和蒸散发均表现出单峰型季节趋势,最高值出现在 7 月至 8 月,是土壤有效水源涵养量的低谷时段,两个高峰出现时间均为降水较多而蒸散发较低的月份^[4,25]。尽管季节趋势与李士美等基于人工观测的短期数据结果一致^[7],但数值大小仅为其结果(0—40 cm 为 108.0 mm)的 46%,主要原因是凋萎含水量参考标准不同。李士美等采用的 0—40 cm 凋萎含水量为负压计法测定的 40.3 mm^[26],而基于压力膜和本研究测定的结果分别约为 85.7 mm^[3]和 89.6 mm。0—100 cm 土壤有效水源涵养量的变异主要受控于 15—20 cm 土壤有效持水量,与早期的结果一致^[7],可能由于土壤有效水源涵养量的变异系数随土层深度增加而降低所致。因为研究区生长季的蒸散发几乎等于同期降水^[25],因此高寒草甸生长季土壤保持的“绿水”主要用于自身蒸散发的消耗。

土壤有效水源涵养量负相关于土壤温度,这与甘肃南祁连山地区的高寒草甸根系区土壤水分累计损失量与土壤温度显著正相关的结论一致^[10],表明高寒草甸土壤水分运移的温度效应十分重要^[27-28],这主要由于高寒地区土壤温度调节着土壤水分的形态及植物的生长^[29]。一方面,土壤温度改变了水的表

面张力、粘滞性和密度等物理性质^[28],导致温度变化过程中的土壤水势及土壤含水率的存在极显著的温度效应^[30]。高寒草甸土壤温度越高,水气传输阻抗越低^[27],土壤水分蒸发散失越快,系统有效水源涵养量下降越多。另一方面,由于研究区土壤水分较高,土壤温度是植物细根生长的主要调控因素^[15],植物细根则是土壤水分经由植物蒸腾散失的主要通道,且高寒草甸植被蒸腾约占生长季系统蒸散发的92%^[25],从而也会导致了土壤温度负相关与土壤有

效水源涵养量。高寒草甸植被退化导致土壤温度升高^[31],因此提高退化系统的植被覆盖,土壤温度也随之下降,有利于土壤水源涵养功能的保持^[16]。但值得注意的是,植物根系对土壤水分的调节功能和根径大小密切相关,主要依靠植物的细根($< 2\text{ mm}$)部分^[15],所以尽管极度退化的高寒草甸“黑土滩”的植被覆盖有所增加,但由于多为阔叶型粗根杂类草^[13],其可能会增加了土壤水分的大孔径优先流,因此其水分涵养功能有待进一步研究。

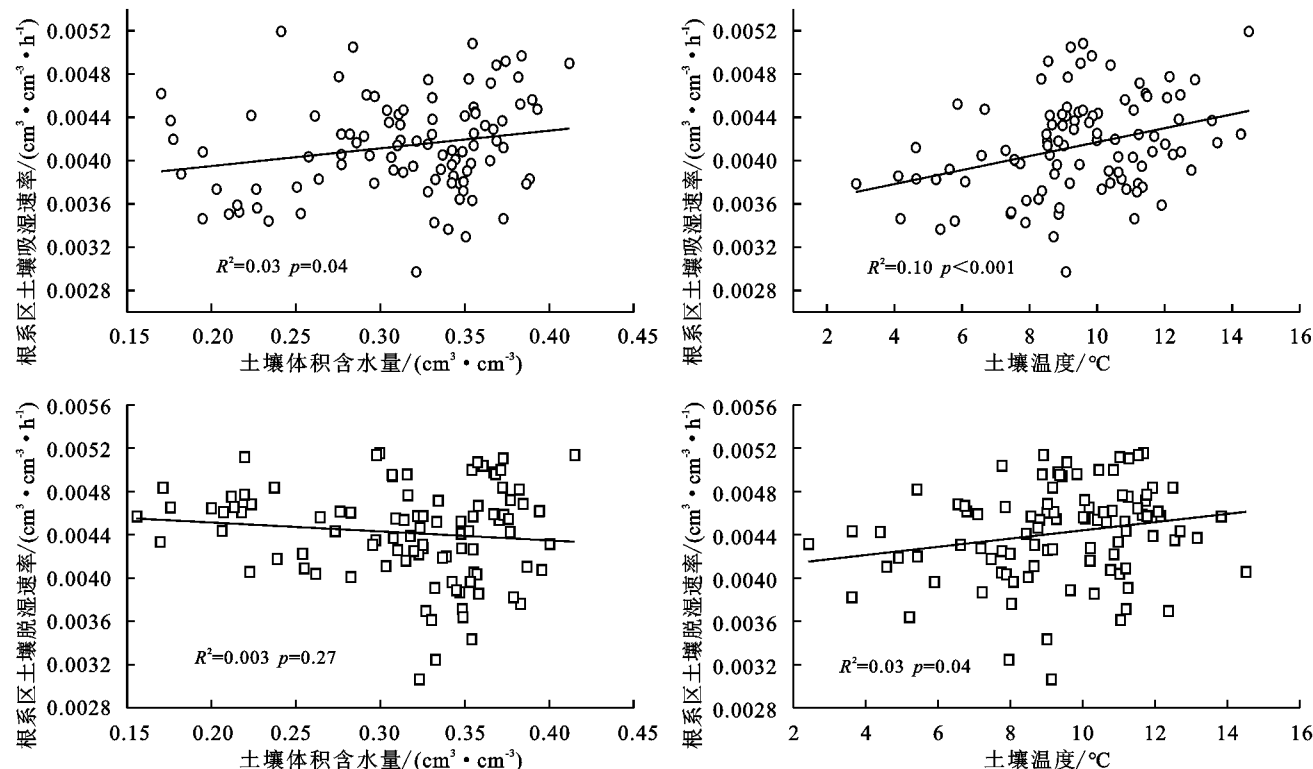


图5 根系区土壤吸湿速率和脱湿速率与土壤含水量和土壤温度的关系

3.2 土壤水文调节功能

土壤水文调节功能主要取决于土壤的比水容量^[26],而后者是土壤重要的水力性质之一,和土壤结构、有机质含量及容重的密切相关^[9]。高寒草甸根系区土壤脱湿速率略显著大于吸湿速率,这可能由于高寒草甸土壤脱湿曲线和吸湿曲线虽然相对一致,但前者相对变化速率较大所致^[26]。同时,研究区高寒草甸植被生长季日均蒸散发约 2.9 mm ^[25],0—40 cm 土壤从田间持水量($0.39\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)由蒸散发损失到凋萎含水量($0.21\text{ cm}^3/\text{cm}^3$)需要 24.8 d,如果按照脱湿速率估算的根系区日均失水量则为 42.2 mm ,则需要 1.6 d 即可达到凋萎含水量,远小于蒸散发的天数。同理,生长季日均降水为 3.1 mm ^[25],从凋萎含水量恢复到田间持水量需要 23.3 d,按照吸湿速率估计的根系区日均吸水量为 40.3 mm ,则需要 1.8 d 即可,也远小于降水补给天数。因此,土壤脱湿速率和吸湿速率远大于蒸散损失

速率和降水补充速率,暗示高寒草甸生态系统具有较强的水文调节功能。另外,本研究发现不同层次的土壤吸湿速率和脱湿速率与土壤理化性状没有显著关系,表明高寒草甸土壤基质势对土壤比水容量影响较小,根系区土壤水文调节功能垂向分布均匀,水源涵养功能明显^[7]。其主要原因是生长季根系区土壤水势一般在 $-500 \sim -300\text{ kPa}$ 左右,而土壤水分特征曲线表明土壤含水量在该区间变化相对平稳,主要受控于吸附作用^[3, 26]。

高寒草甸水文调节功能主要受土壤温度影响,与土壤的水分关系微弱。这可能由于生长季中,土壤水势处在一个高压水头范围内,导致土壤水的保持作用主要来源于土壤物理和根系静电吸附作用^[26]。随着土壤温度升高,水的表面张力下降,比水容量增大^[30],吸湿速率和脱湿速率都有所增加。土壤层次和月份对高寒草甸水文调节功能具有一定的影响,0—30 cm 土壤吸湿和脱湿速率相对较高,同时在植被生长的旺盛期

(7—8月)吸湿速率和脱湿速率也相对较小,表明植物根系的生长对土壤水文调节功能具有一定的影响^[11]。植物根系在土壤深层相对较少且变化微弱,导致土壤总孔隙度及毛管孔隙度的相对稳定^[4],致使30—40 cm土壤吸湿和脱湿速率均相对较小。

4 结论

基于祁连山南麓高寒禾草——矮嵩草草甸5年植被生长季的土壤含水量的研究表明,年均0—100 cm土壤有效含水量为 (44.3 ± 8.7) mm,呈现出双峰的季节变化趋势,主高峰和次高峰分别出现在9月中旬和6月下旬。土壤有效水源涵养量的季节变异和空间变异分别主要受控于表层土壤温度和土壤黏粒含量。根系区(0—40 cm)年均土壤吸湿速率和脱湿速率分别平均为 (0.21 ± 0.02) mm/h和 (0.22 ± 0.02) mm/h,两者具有一定的季节变化趋势,均在7月相对较大。土壤吸湿速率和脱湿速率与表层土壤温度显著相关,但与土壤理化性状关系较弱。因此,保持表层土壤的低温性有利于发挥高寒草甸生态系统土壤水源涵养及水文调节功能。

参考文献:

- [1] 贺金生,刘志鹏,姚拓,等.青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术[J].科技导报,2020,38(17):66-80.
- [2] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
- [3] Dai L, Yuan Y, Guo X, et al. Soil water retention in alpine meadows under different degradation stages on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2020,590:125397.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125397.
- [4] Pan T, Hou S, Wu S, et al. Variation of soil hydraulic properties with alpine grassland degradation in the eastern Tibetan Plateau[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2017,21:2249-2261.
- [5] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.
- [6] 胡健,吕一河,张琨,等.祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异[J].生态学报,2016,36(11):3338-3349.
- [7] 李士美,谢高地.草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性[J].中国草地学报,2015,37(2):88-93.
- [8] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [9] Yang F, Zhang G, Yang J, et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:3086-3093.
- [10] Cheng H Y, Wang G X, Hu H C, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the head-water region of the Yellow River, China[J]. Environmental Geology, 2008,54:1755-1762.
- [11] 李凯,高艳红, Fei Chen,等.植被根系对青藏高原中部土壤水热过程影响的模拟[J].高原气象,2015,34(3):642-652.
- [12] 徐翠,张林波,杜加强,等.三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响[J].生态学报,2013,33(8):2388-2399.
- [13] Li J, Zhang F, Lin L, et al. Response of the plant community and soil water status to alpine Kobresia meadow degradation gradients on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Ecological Research, 2015,30(4):589-596.
- [14] Wang G, Liu G, Li C. Effects of changes in alpine grassland vegetation cover on hillslope hydrological processes in a permafrost watershed[J]. Journal of Hydrology, 2012,444:22-33.
- [15] Montagnoli A, Di Iorio A, Terzaghi M, et al. Influence of soil temperature and water content on fine-root seasonal growth of European beech natural forest in Southern Alps, Italy[J]. European Journal of Forest Research, 2014,133(5):957-968.
- [16] 李红琴,乔小龙,张懿铿,等.封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):195-200.
- [17] Li H, Zhang F, Li Y, et al. Thirty-year variations of above-ground net primary production and precipitation-use efficiency of an alpine meadow in the north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Grass and Forage Science, 2015,71(2):208-218.
- [18] Zhang F, Li H, Li Y, et al. Strong seasonal connectivity between shallow groundwater and soil frost in a humid alpine meadow, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2019,574:926-935.
- [19] 乔冈,徐友宁,陈华清,等.青藏高原高寒草甸土壤水分运移机制[J].地质通报,2018,37(12):2131-2137.
- [20] Li H, Zhang F, Wang W, et al. The strongest El Niño event stimulated ecosystem respiration, not evapotranspiration, over a humid alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Ecological Indicators, 2018,91:562-569.
- [21] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. Journal of Animal Ecology, 2008,77:802-813.
- [22] Zhang F, Cao G. Resilience of energy and CO₂ exchange to a summer heatwave in an alpine humid grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2017,26(1):385-394.

小,而 n 值出现随污染浓度呈对数增加的特点。柴油、原油污染之后,土壤的饱和含水量、田间持水量以及凋萎含水量均出现下降,总的有效水含量与未污染土壤相比降低。由于柴油、原油这些石油烃类物质,在低浓度下主要附着在土壤颗粒物的表面,而在高浓度下不仅附着在颗粒表面,还有部分会进入土壤的孔隙;同时离心法测定土壤水分特征曲线还存在变容重、变孔隙的问题,导致严重污染的土壤中的石油烃在离心过程中会部分排出,表现出含水量的表观变化而非实际水分的变化,由此导致了土壤表观有效水含量随污染浓度变化的 U 字形变化特征。石油烃污染土壤之后,由于其浓度的大小直接影响石油烃与土壤颗粒作用的机制,从而对土壤的持水性产生影响,但目前这方面的研究相对薄弱,有待进一步的深入。

参考文献:

- [1] 张晓阳.陕北石油污染对土壤理化性质和酶活性的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [2] 张晓阳,李凯荣,张麟君.陕北石油污染对土壤理化性质的影响[J].水土保持研究,2013,20(3):32-38.
- [3] 李小利,刘国彬,许明祥.陕北油田土壤和地表水石油污染特征[J].水土保持研究,2009,16(5):145-148.
- [4] 李小利,刘国彬,薛莲,等.土壤石油污染对植物苗期生长和土壤呼吸的影响[J].水土保持学报,2007,21(3):95-98.
- [5] Cui B, Zhang X, Han G, et al. Antioxidant defense response and growth reaction of *Amorpha fruticosa* seedlings in petroleum-contaminated soil[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2016,227(4):1-10.
- [6] 程金香,马俊杰,王伯铎,等.石油开发工程生态环境影响分析与评价[J].环境科学与技术,2004,27(6):64-65,78.
- [7] 邓绍云,徐学义,邱清华.我国石油污染土壤修复研究现状与展望[J].北方园艺,2012(14):184-190.
- [8] 魏样,蔡苗,朱坤,等.石油污染对土壤水分特征的影响[J].地球环境学报,2018,9(3):266-272.
- [9] 李梅,郑西来,童玲,等.石油污染对土壤渗透性的影响研究[J].中山大学学报:自然科学版,2008,48(2):119-123.
- [10] 魏样,王益权,何俐蓉.石油污染对土壤水理性质的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(S1):98-101.
- [11] Wei Y, Wang Y, Han J, et al. Analysis of water retention characteristics of oil-polluted earthy materials with different textures based on van Genuchten model[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19(1):373-380.
- [12] Ahmadi M, Ebadi T, Maknoon R. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of sand-kaolinite mixtures[J]. *Engineering Geology*, 2021, 283; doi. org/10. 1016/j. enggeo.2021.106021.
- [13] 李小飞,李一菲,钱天伟.柴油污染对土壤水分特征曲线的影响研究[J].节水灌溉,2015(6):22-25.
- [14] Schaap M G, Van Genuchten M T. A modified mualem; van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006,5(1):27-34.
- [15] 冉艳玲,王益权,张润霞,等.保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):101-107.
- [16] 吕殿青,邵明安,王全九.土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J].水利学报,2003,3(3):110-114.
- [17] 邵明安,吕殿青,付晓莉,等.土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系. I. 填装土壤[J]. 土壤学报,2007,44(6):1003-1009.

(上接第 141 页)

- [23] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of animal ecology*, 2008, 77:802-813.
- [24] Wang G X, Li Y S, Hu H C, et al. Synergistic effect of vegetation and air temperature changes on soil water content in alpine frost meadow soil in the permafrost region of Qinghai-Tibet[J]. *Hydrological Processes*, 2008,22:3310-3320.
- [25] Zhang F, Li H, Wang W, et al. Net radiation rather than moisture supply governs the seasonal variations of evapotranspiration over an alpine meadow on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecohydrology*, 2018,11(2):e1925.
- [26] 曹广民,李英年,鲍新奎.高寒地区寒冻锥形土的特水特性[J].土壤,1998,30(1):27-30.
- [27] 张法伟,王军邦,林丽,等.高寒草甸非生长季土壤表层水汽传输阻抗的变化特征和水热驱动[J].中国农业气象,2017,38(2):96-103.
- [28] 闵安成,张一平,朱铭哉,等.田间土壤的水势温度效应[J].土壤学报,1995,32(2):235-240.
- [29] 牛赞,刘贤德,王立,等.祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其土壤水热特征分析[J].生态环境学报,2014,23(3):385-391.
- [30] 高红贝,邵明安.温度对土壤水分运动基本参数的影响[J].水科学进展,2011,22(4):40-50.
- [31] 张法伟,郭竹筠,李以康,等.青海湖芨芨草干草原植被退化对土壤温湿特征的影响[J].干旱区研究,2013,30(2):219-225.