

不同放牧条件内蒙古草原土壤冻融期水热动态

姚楠¹, 赵英^{1,2}, 张建国¹, 何海龙¹, 司炳成^{2,3}, 焦瑞¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK S7N5A8 Canada; 3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:内蒙古草原地处季节性冻土区,与放牧强度相关,土壤冻融过程对该地生态和水文过程有着显著影响,但相关研究相对欠缺。该文重点研究了内蒙古锡林郭勒草原3种放牧条件下UG79(1979年以来禁牧)、UG99(1999年以来禁牧)、HG(1979年以来持续放牧)季节性冻融期的土壤水热动态,以期准确理解放牧这一当地主要土地利用模式对土壤生态水文过程的影响。结果表明:与地上覆盖度相关,不同放牧条件下地表积雪厚度有明显差异,其中HG处理积雪厚度远小于其他处理,其土壤温度变化也最为剧烈。与不同处理土壤冻结速率相关,土壤冻结时HG、UG79和UG99的“聚墒区”分别为20—30 cm、10—20 cm和10—30 cm,其中UG99“聚墒区”分布范围最广,且集中在牧草根系发达区域,对来年牧草生长提供了更好的水分条件。换言之,由于冻后聚墒效应,土壤消融期水分含量在土壤表层高于冻融前,其中UG99处理最大,达到了 $0.19 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。该研究结果为内蒙古草原季节性冻土区控制放牧及合理的禁牧措施提供理论依据。

关键词:锡林郭勒草原; 放牧条件; 冻融; 水热状况

中图分类号: S152.7⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0132-07

Soil Water and Heat Dynamics During Freezing and Thawing Period Under Three Grazing Densities in Grassland of Inner Mongolia

YAO Nan¹, ZHAO Ying^{1,2}, ZHANG Jianguo¹, HE Hailong¹, SI Bingcheng^{2,3}, JIAO Rui¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Department of Soil Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK S7 N5 A8 Canada;

3. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Inner Mongolia grassland is located at seasonally frozen ground. The soil freezing and thawing processes, associated with grazing intensity, have a significant impact on ecological and hydrological process in this region. However, the relevant research is limited. This paper is mainly focusing on soil water and heat regime during seasonal freezing and thawing period in Xilingol grassland under three typical grazing treatments, i. e., UG79 (ungrazed site since 1979), UG99 (ungrazed site since 1999), and HG (heavily grazed site since 1979), thereby clarifying how different extent of grazing affects rates and intensities of soil freezing and thawing, and snowmelting water infiltration. The results showed that snow thickness varied from different grazing treatments, and was the function of surface coverage such as litter. For instance, the snow thickness under HG site was far less than that in the other two ungrazed sites. Accordingly, the soil temperature fluctuated more strongly in HG. The area of unfrozen water content extended into 20—30 cm, 10—20 cm and 10—30 cm in HG, UG79 and UG99 site, respectively, due to the water migration caused by soil frozen. This trend was the strongest in UG99 characterized by the zone of the largest root system which provides a better moisture condition to grass germination in the coming year. In other words, the soil moisture content after soil thawing is higher than before soil freezing due to the hydraulic lift of soil frozen. Consequently, among the three sites, the soil moisture content in UG99 site was the greatest, which reached to $0.19 \text{ m}^3/\text{m}^3$ after soil thawing. This result can provide the theoretical basis for reduction of grazing activity and reasonable grazing management in grassland of Inner Mongolia.

Keywords: Xilingol grassland; grazing intensities; soil freezing and thawing process; soil water and heat regime

冻土是指温度低于 0℃ 且含有冰的土壤^[1],其对外界温度的变化十分敏感^[2],伴随着温度变化土壤冻融交替现象频繁发生^[3]。土壤冻融过程可以改变土壤的水力特性和微生物活性^[4-8],影响地表、植被和大气之间的热量交换,甚至于区域气候特征。反之,气候变化也能引起土壤冻融过程的变化^[9-10]。由此可见,寒区冻土生态系统中的土壤水热变化规律可为研究气候变暖引起的生态系统水循环变化奠定基础^[11-12],与之相关的研究也得到了专家学者的重视。宗芹等^[13]在科尔沁沙地西部设置模拟试验观测场,通过观测不同地下水埋深对冻融土壤水分状况的影响,探究土壤冻融作用对水分物理性提升的作用。胡国杰等^[14]对青藏高原冻土区土壤冻融期间水热动态变化进行分析,拟合了未冻水含量和土壤温度的关系,揭示土壤冻融对水热耦合运移的影响,为高海拔冻土区土壤水热耦合模拟研究提供了理论依据;吴晓玲^[15]采用水量—能量平衡法研究了冻土活动层土壤水热变化和积雪变化的关系。目前,由于野外控制试验成本较高,有关土壤冻融过程的研究目前多是在实验室内培养小体积土壤开展,难以准确揭示冻土的冻融过程。另外,人类活动如放牧对土壤性质的影响,特别是在冻融情况下,与之相关的研究还很缺乏。

锡林郭勒草原地处我国北部边陲,处在典型草原、草甸草原和荒漠草原的生态交错区^[16],本研究站点位于典型草原区域。20 世纪 80 年代以来,由于不合理的管理与过度放牧,该区草原退化日趋严重,导致植被生产力大幅度降低,土壤物理性状恶化,水文循环系统发生改变^[17],严重影响了其载畜能力与植被生产力。本研究所在地为季节性冻土区,具有长期放牧强度对土壤性质影响的痕迹,这为本研究提供了一个理想的研究土壤冻融交替下人类活动对生态水文过程影响的区域。本研究以内蒙古草原季节性冻土区为研究对象,通过长期土壤水热、雪量及土壤冻结深度监测,分析不同放牧处理土壤水热动态变化特征,论证季节性冻土区积雪融水对土壤水分补给及其潜在生态环境效应的影响,为该区草原的合理利用和生产力的提高提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站(43°37'50"N,116°42'18"E,海拔约 1 270 m),属于中温带半干旱大陆性气候,干燥多风,年均风速 3.5~4 m/s,年均气温 0.7℃,1 月气温最低,平均 -20℃,7 月气温最高,平均 21℃,冬季平均气温为 -15.2℃^[18]。年

均降水量约 280 mm,大部分集中在夏季(6—8 月),年降雪量为 30~40 mm,主要集中在冬季(11 月至翌年 2 月)。潜在最大年蒸发量为 2 600 mm^[19],由于每年降雨量波动较大以及强烈的蒸发作用^[20],植被生长易受水分亏缺的胁迫。该区域土壤为淋溶黑钙土,从沉积在更新世玄武岩高原的风沙沉积物发育而来。植被是以多年生根状茎类羊草和丛生禾草大针茅为主,另外还分布有贝加尔针茅、克氏针茅、冷蒿、糙隐子草等^[21]。

1.2 研究方法

利用在草原站布设的 3 个不同放牧条件样区进行试验研究,所选样区地势较为平坦(有 1°~2° 小坡),草地状况基本一致(包括植物种类及土壤),无刈割情况。每个样区分别埋设用于野外长期持续监测土壤水热、积雪和冻土深度等参数的设备,监测时间为一个完整水文年(2014 年 5 月至 2015 年 5 月)。所设处理分别为 1979 年以来规划的禁牧(UG79),1999 年以来规划的禁牧(UG99)和持续放牧(HG)。规划前各试验处理草场情况相同。

1.2.1 土壤水热监测 土壤水分和温度动态采用 5TE 传感器进行测定,其精准、便捷、能耗少,适合野外定位监测,可灵敏准确地反映土壤水热变化动态^[22]。测定深度为 10,30,50,70,100 cm。将监测探头连接到 EM50 数据采集器上自动记录数据,测定间隔时间为 0.5 h。5TE 是通过电磁场原理测定周围介质的介电常数来确定含水量,而水的介电常数(81)要显著大于空气(1)土壤介质(3~5)和冰(3.2)的介电常数,因此冬季冻融过程中土壤介电常数变化主要表现为液态水含量(未冻水)的变化。

1.2.2 土壤冻结深度、雪深及雪融水量监测 土壤冻结深度利用一个防冻的带有刻度的橡皮管,放在 PVC 管中以保持竖直状态。橡皮管里面装纯净水,可以通过管的软硬来判断土壤冻结的深度。雪深采用标尺进行测定。同时,在每个处理内布设一个直径 19 cm、高 1 m 已知重量的圆柱形筒用来接收降雪,于降雪时逐日测量雪重,并转换为雪水体积,从而算出每日的雪融水量。

1.2.3 土壤贮水量计算 土壤贮水量是指一定土层厚度的土壤含水量,以水层深度(mm)表示。计算公式为:

$$S=10\times\theta\cdot D_B\cdot H \quad (1)$$

式中: S 为土壤贮水量(mm); θ 为土壤重量含水率(%); D_B 为土壤容重(g/cm³); H 为土层厚度(cm)。

1.2.4 数据分析及处理 采用 Excel 2003 进行数据运算及统计,采用 Origin 9.0 和 Surfer 11.0 进行数据分析及作图,数据插值方法为 Kriging。

2 结果与分析

2.1 不同放牧条件下冻融土壤温度变化

由图1可知,不同处理在各个土层深度的温度变化趋势大体相同,且土壤温度的年变化幅度随着土层深度的增加而减小。以UG79为例,土层深度为100 cm的年温差为 22.1°C ,而土层深度为10 cm的年温差达到了 36.3°C 。这主要是由于土壤热量传递的滞后性,导致土壤表层温度变化剧烈,更易受气温变化的影响。冬季(12月至次年2月),随土层深度的增加,土壤温度呈升高的趋势,以HG为例,100 cm深度处土壤温度月平均值比土壤表层可高达 10.5°C ;夏季(6—8月),随土层深度的增加,土壤温度呈降低的趋势,HG处理100 cm深度处土壤温度月平均值比土壤表层可低至 7.6°C 。

在整个土壤冻融期间(11月至次年5月),10 cm处HG,UG99和UG79处理土壤最高温与最低温差值分别为 30.8°C , 25.5°C 和 22.5°C ,50 cm处分别为 19.8°C , 14.6°C 和 13.9°C ,100 cm处分别为 12.9°C , 12.4°C , 11°C 。对比不同放牧条件下相同土层温度,HG处理土壤温度变化最为剧烈,UG79处理土壤温度变化最为平缓,而随着土层深度的增加,这种差异性逐渐缩小,10 cm处HG处理差值比UG79高 8.3°C ,100 cm处仅高 1.9°C 。在冻结期(11月至次年2月),浅层土壤(0—30 cm)UG79和UG99处理土壤温度明显高于HG处理,而在深层100 cm深度处三种放牧条件下土壤的温度变化趋势基本一致,放牧对深层土壤温度的影响有限。不同土层深度下,不同放牧条件下土壤最低温度及其出现的时间有一定差异。50 cm深度处,UG79和UG99处理土壤最低温度均出现在2月2日,温度分别为 -9.9°C , -9.7°C ;而HG处理土壤最低温度则出现在1月2日,温度为 -11.28°C 。这也进一步说明HG处理的土壤冻结现象较其他处理提前,且更为明显。

2.2 不同放牧条件下冻融土壤水分变化

从土壤液态水含量的变化过程(图2)可以看到,从11月中旬开始,不同处理土壤液态含水量迅速降低,即部分液态水冻结变成了固态水;3月中旬以后,不同处理土壤液态含水量显著增加,即固态水开始融化变成了液态水。在此期间,由于土壤温度一直保持在较低水平,土壤液态水含量变化十分微弱。这说明不同处理土壤均发生了冻融交替过程,呈现出液态水含量先减少,后稳定,再增加的趋势。从图2中可看出,在三种不同放牧条件下,浅层土壤的液态水含量变化最为剧烈且趋势基本相似。土壤未冻结前,由于

受夏季降水的影响,土壤液态水含量显著增加。土壤始冻和融化期间,土壤液态水含量波动幅度较大。

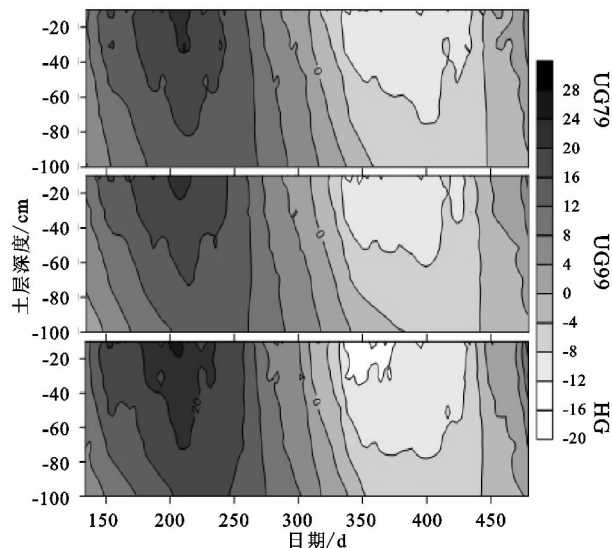


图1 2014年5月—2015年5月不同放牧条件下土壤温度动态变化

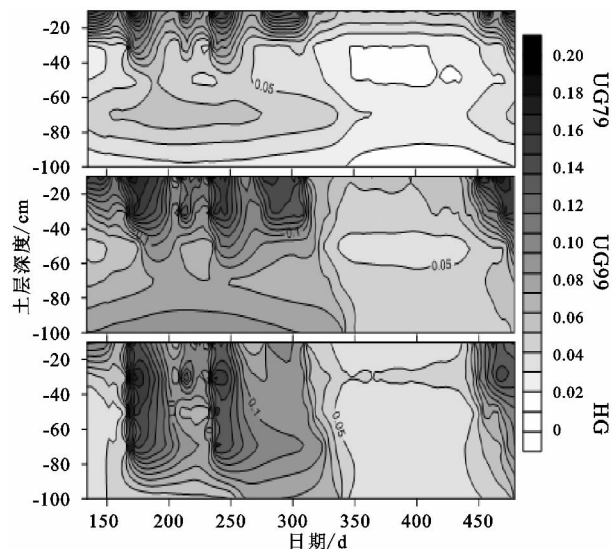
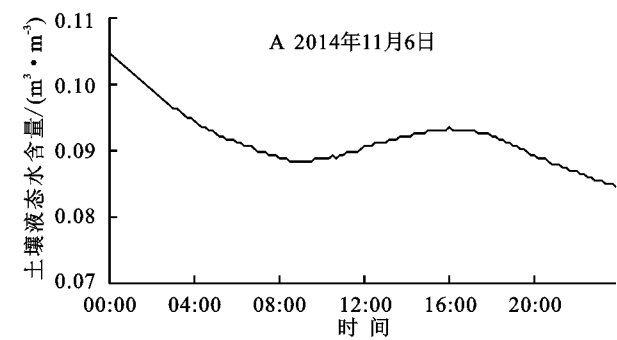


图2 2014年5月—2015年5月不同放牧条件下土壤液态水动态变化

土壤始冻期,地表温度在 0°C 附近波动,表层土壤冻融交替现象频繁发生。2014年11月5日—6日,10 cm处土壤温度降至 0°C 以下,此时HG处理土壤液态水含量降低32%,UG79和UG99分别降低30%,23%。图3A为11月6日UG99土壤表层(10 cm)液态含水量日变化,由图可清楚地看到始冻期土壤液态水含量明显降低。土壤冻结时期(12月至次年3月),冰层不断加厚,土壤水分主要以气相的形式迁移,在温度梯度的作用下,不断向上(冰层下界面附近)聚集,使土壤剖面水分分布发生变化,由此出现了“聚墒区”和“亏缺区”,不同处理在其出现的深度上有差异,HG,UG79和UG99的“聚墒区”分别为20—30 cm,10—20 cm和10—30 cm,“亏缺区”分别为40—100 cm,30—50 cm和40—60 cm。此时

期土壤表层(0—20 cm)液态水含量 $UG99 > UG79 > HG$,而在深层土壤(大于 30 cm),土壤液态水含量 $UG99 > HG > UG79$ 。HG 处理表层土壤(0—20 cm)液态水含量最低,UG99 处理的土壤液态水含量在各个深度均略高于其他处理。土壤消融期,受温度的影响,土壤开始解冻,表层土壤的液态水含量逐渐上升,UG99 液态含水量增加幅度均大于 UG79 和 HG 处理,其



最大值达到了 $0.19 \text{ m}^3/\text{m}^3$,UG79 和 HG 土壤液态含水量分别为 $0.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$,且 3 个处理土壤液态含水量均高于冻结前。由图 3B 看出,2015 年 4 月 10 日一天中,UG99 土壤表层液态含水量增加了 56%。水分的相变导致了土壤表层液态水含量增加,土壤剖面水势分布发生变化,土壤水分将在土水势梯度的作用下向土壤深层运移。

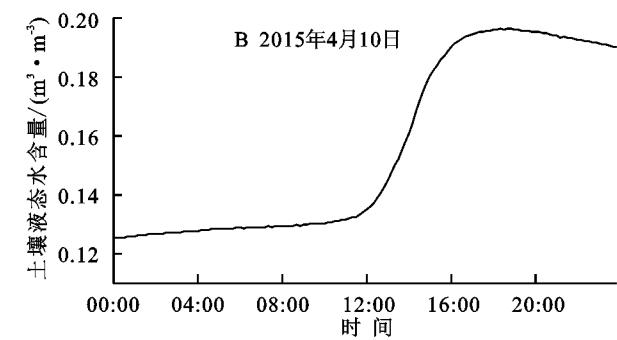
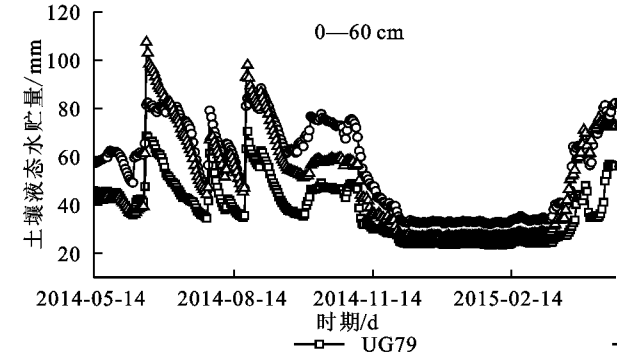


图 3 UG99 冻融期土壤表层(10 cm)液态水含量日变化

图 4 是不同放牧处理 0—120 cm 土壤贮水量动态变化。由图可知,各土层中 UG99 贮水量最高,0—60 cm 分别比 UG79 和 HG 处理高出 47%和 13%,60—120 cm 土层分别比 UG79 和 HG 处理高出 87%和 20%。0—60 cm 土层土壤贮水量变化较深层变化更为剧烈,尤其是 6—8 月,土壤贮水量呈现大幅度的



升降。而在 6—8 月 HG 处理深层(60—120 cm)土壤贮水量波动幅度较大。三个处理在土壤冻融时期(11 月至次年 5 月)的液态水贮量变化趋势相似,UG79 在 60—120 cm 土层土壤贮水量明显低于其他处理,在出现最大值的时间上,3 个处理 0—60 cm 土壤贮水量于 4 月下旬达到最大。

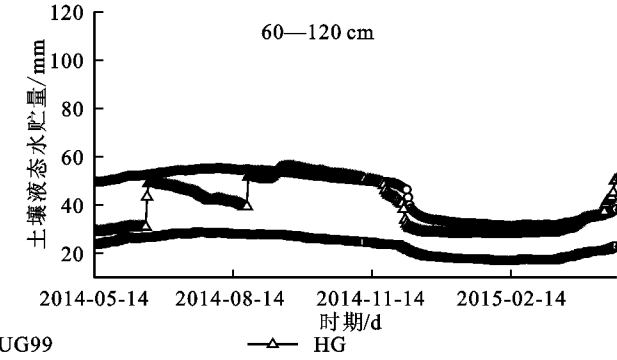


图 4 不同放牧处理 0—120 cm 土壤液态水贮量动态变化

2.3 不同放牧条件下积雪消融、土壤冻结深度变化过程

图 5 是不同放牧条件下土壤冻融变化过程及雪深、土壤含水量和土壤温度变化。从中可看出,受大气温度的影响,土壤冻结时,三种处理均从表层开始向下冻结;土壤消融时,随着大气温度回升及深层土壤的热传导作用,土壤表层和深层同时融化,整个区域呈现出自表层而下以及自深层而上的“双向”融化状态。不同处理间 HG 的冻结和融化速率最快。冻层上界面融化速度快于下层,这是由于土壤上层辐射热传输得到的热量比下层土壤热通量大所致。

对比不同处理积雪厚度,不同时期其积雪厚度有明显的差异。土壤始冻期,积雪厚度依次为 $UG99 > UG79 > HG$,HG 积雪厚度远小于其他两个处理,最高值仅有

28.3 mm,而 UG99 处理则达到了 78.3 mm。从图 1 可以看到,HG 处理土壤温度下降趋势最为明显,且波动幅度也大于其他两个处理。在此期间,三种处理积雪厚度不断增加,各处理土壤冻结速率逐渐变慢。土壤解冻期,由于 4 月 2 日降温,三种处理土壤都出现了不同程度的返冻现象,其中 HG 处理最为明显,而其他处理土壤温度几乎无变化,进一步表明 HG 处理土壤温度变化的不稳定性。此时,各处理积雪厚度依次为 $UG79 > UG99 > HG$,各处理土壤解冻时间也存在差异。HG 处理土壤于 4 月 30 日完全融化,而 UG79 和 UG99 处理土壤于 5 月 4 日才完全融化。消融期,由于土壤温度升高,土壤固态水变为液态水,导致土壤表层的含水量大幅度上升,土壤表层的水势大于深层,使得土壤水分向深层入渗,为春季植被生长提供了更为充足的水分。

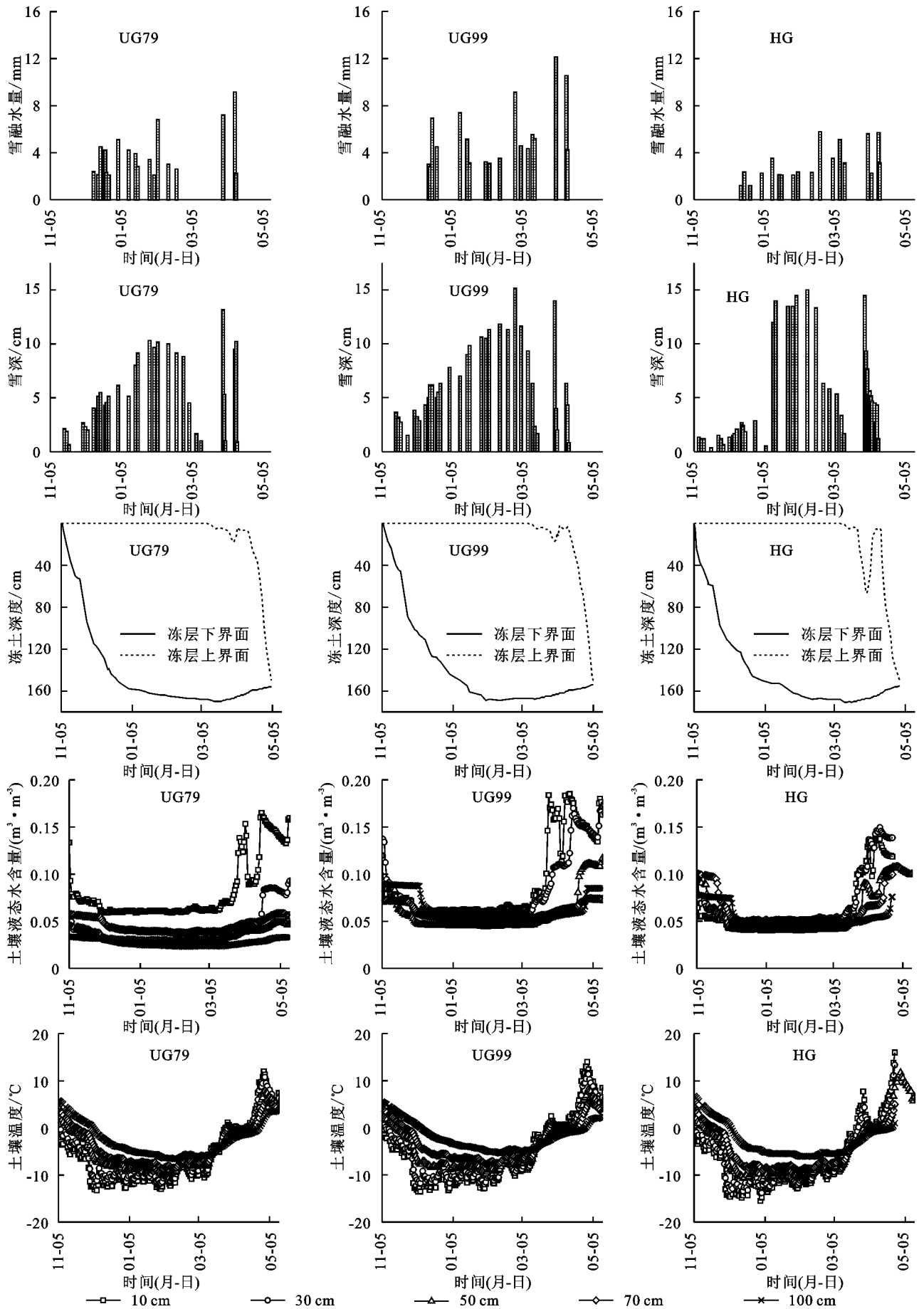


图5 不同放牧条件下土壤冻融过程

3 讨论

3.1 放牧程度对冻融期土壤水热状况的影响

不同的放牧条件使土壤植被覆盖度发生了变化。由于过度放牧,家畜对植被枝叶的过度采食,导致植被叶面积减少,地下根量减少,根系分布变浅,从而阻碍了植被的正常生长发育,植被覆盖程度低。有研究表明,植被对太阳辐射具有吸收和反射作用^[23],因而植被盖度对土壤温度有很大的影响。UG79 和 UG99 处理土壤表面的植被覆盖度较 HG 处理高,因此形成了土壤和大气热交换的阻碍层,既可以阻挡太阳的直接辐射,又可以减少热量向大气的散发,使温差明显缩小,具有一定的绝热效果。因此,其土壤温度变化趋于平缓,并且在低温时有“增温效应”^[24]。相反,HG 处理土壤退化较为严重,植被覆盖度低,易受外部环境因素的影响而变幅较大,因此其温度变化较为剧烈,土壤液态水含量也发生相应的变化。董智等^[25]研究表明,草场的退化以及植被覆盖度降低与近地表风速呈负相关关系。植被可以降低风速,从而减小大气湍流,使热量和水汽的水平和垂直交换作用减弱,因而使土壤温度趋于平缓。其次,HG 处理土壤液态含水量较其他两个处理低,而土壤组分中水的热容量最大,因此土壤热容量与 UG79 和 UG99 处理相比较低,从而引起土壤温度变化剧烈。

土壤始冻和融化期间,土壤液态水含量波动幅度较大,这主要是土壤水分的相变所致。土壤冻结期间,上层水分高于下层水分,这与土壤“冻后聚墒”效应有密切关系,即下层水分会在温度梯度的作用下向上运动,从而出现土壤水分“聚墒区”和“亏缺区”。其中,UG99“聚墒区”分布范围最广,且集中在牧草根系发达区域,对牧草根系层的储水保墒效果最为明显。在整个冻融期内,HG 处理表层土壤(0—20 cm)液态水含量低于其他处理,其原因主要为 HG 处理植被覆盖度低,对雪的截留作用较弱,导致融雪入渗量减少。其次,由于长期遭羊群踩踏,HG 处理土壤容重偏大,降雪融水难以入渗,表土因水分聚积变得湿润,而试验样地太阳有效辐射强度大,最终导致更多水分因蒸发而损失掉。UG79 处理深层土壤(大于 30 cm)液态含水量低于其他处理,其主要原因为 UG79 处理植被生长旺盛,强烈的蒸腾作用使深层的土壤水分被植被吸收利用,从而降低了深层液态水含量。UG99 在整个剖面上土壤液态含水量最高,最有利于土壤水分的保持。由此可见,控制放牧和合理的退牧还草措施能够起到蓄水保墒的作用,为植物生长提供良好的水分环境。

不同放牧处理 0—60 cm 土层土壤贮水量变化较深层变化更为剧烈,该层是牧草根系主要分布层,受牧草生长、人类活动和天气气候等因素影响较大,水

分移动较为活跃,干湿变化明显。尤其是 6—8 月,此时正值雨季,降水是本地区土壤水分的唯一来源^[26],是土壤水稳定与否的关键因素,频繁的降水以及强烈的土壤蒸散,土壤贮水量呈现大幅度的升降。而在 6—8 月 HG 处理深层(60—120 cm)土壤贮水量波动幅度较大,主要原因是过度放牧导致植被破坏严重,植物的根量减少,根系变短^[27],土壤结构变差,不利于水分的贮存与保持。不同放牧条件下冻融期土壤贮水量最大值均出现在 4 月下旬,即冻融后土壤贮水量高于冻融前初始土壤贮水量,“冻后聚墒”效应明显,有效减少了土壤水分渗漏,为春季土壤水分补给和植被生长创造了有利条件。

3.2 放牧程度对土壤冻融过程的影响

不同放牧条件下,土壤积雪厚度有明显的差异。本试验研究中,HG 处理积雪厚度远小于其他处理,始冻期积雪厚度最高值与 UG99 处理的差值高达 50.0 mm。其原因为过度放牧导致植被高度和盖度减小,而植被对降雪有一定的拦截作用。有研究表明,积雪量和积雪深度与植被盖度具有显著的正相关性^[28]。

雪被在草地生态系统的土壤冻融循环中有着重要的地位,它可以直接影响土壤水分、温度以及冻融状况^[29]。付强等^[30]研究表明积雪能减缓土壤冻结速度,影响土壤水分迁移过程。浅层土壤冻结对雪被的响应程度较强,深层土壤冻结对雪被的响应程度降低。本试验研究表明,不同放牧条件下植被覆盖情况导致了雪被厚度的不同,雪被可以有效隔绝气温的影响,加之积雪本身所具有的弱导热性和大热容量等特性,有效阻隔了冻土层热能的散失,从而延缓了外部大气条件对地温的影响,从而使冻融速度变慢。HG 处理土壤植被覆盖度低,雪被厚度小,因而冻结和融化速率最快。土壤冻结时,三种处理均从表层开始向下冻结,而消融时土壤表层和深层同时融化。这与刘小燕等^[31]在科尔沁草甸生态水文试验站的研究结果一致。郭占荣等^[32]认为冻土层形成的过程,也是表层土壤含水量增加的过程。本试验研究表明,冻结期冻土层向下发育过程中,土壤水汽在温度梯度的作用下向冻土层下界面凝结,使上层土壤水分增加,进入解冻期后,在土壤水势的作用下,土壤水分向下入渗。由于冻结期土壤水分损耗很小,加之土壤融化期融雪补给,有利于土壤水分的保持,为春季植被的生长发育提供了良好的条件。

4 结论

(1) 一定厚度的积雪可以有效隔绝气温的影响,从而降低土壤温度下降幅度。不同放牧条件下土壤积雪厚度有明显差异,HG 处理积雪厚度远小于其他处理,其土壤温度变化最剧烈,土壤冻结和融化速率最快。浅层土壤(0—30 cm)UG79 和 UG99 处理土

壤温度明显高于 HG 处理,而在深层 100 cm 深度处三种放牧条件下土壤的温度变化趋势基本一致,放牧对深层土壤温度的影响有限。

(2) 土壤冻结期, HG, UG79 和 UG99 的“聚墒区”分别为 20—30 cm, 10—20 cm 和 10—30 cm, UG99“聚墒区”分布范围最广,且集中在牧草根系发达区域,对牧草根系层的储水保墒效果最佳。土壤消融期,土壤液态含水量高于冻融前,表层土壤 UG99 液态含水量增加幅度大于 UG79 和 HG 处理,其最大值达到了 $0.19 \text{ m}^3/\text{m}^3$,“冻后聚墒”效应最为明显,为春季植被的生长发育提供了良好的水分环境。因此,控制放牧和合理的退牧还草措施可以有效保持较高的水分条件,以促进植被在春夏季节的生长,从而提高植被生产力,为草原生态环境的治理和改善奠定基础。

参考文献:

- [1] 黄元生,李鹏,严福章,等. 青藏直流输电线路冻土长期抗剪强度预测及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(3): 507-514.
- [2] 秦璐,吕光辉,何学敏,等. 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7259-7269.
- [3] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 46-51.
- [4] Shukla J, Mintz Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate[J]. Science, 1982, 215(4539): 1498-501.
- [5] Simmonds I, Lynch A H. The influence of pre-existing soil moisture content on Australian winter climate[J]. International Journal of Climatology, 1992, 12(1): 33-54.
- [6] 王展,张玉龙,虞娜,等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 83-88.
- [7] Willim P J, Smith M W. The Frozen Earth[M]. New York: Cambridge Univ Press, 1989.
- [8] Rouse W R. Microclimate of Arctic tree line 2. Soil microclimate of tundra and forest[J]. Water Resources Research, 1984, 20(1): 67-73.
- [9] 阳勇,陈仁升,叶柏生,等. 寒区典型下垫面冻土水热过程对比研究(II): 水热传输[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1555-1563.
- [10] 陈渤黎,罗斯琼,吕世华,等. 黄河源区若尔盖站冻融期土壤温、湿度的模拟与改进[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 337-345.
- [11] Zhang Y, Ohata T, Kadota T. Land-surface hydrological processes in the permafrost region of the eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2003, 283(1): 41-56.
- [12] Rouse W R. Progress in hydrological research in the Mackenzie GEWEX study[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(9): 1667-1685.
- [13] 宗芹,阿拉木萨,骆永明,等. 冻融条件下沙丘土壤水分物理性提升的试验研究[J]. 水土保持学报, 2013(1): 230-234.
- [14] 胡国杰,赵林,李韧,等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融期间水热运移特征分析①[J]. 土壤, 2014, 46(2): 355-360.
- [15] 吴晓玲,向小华,王船海,等. 季节冻土区融雪冻土水热耦合模型研究[C]. 中国水文科技新发展—2012 中国水文学术讨论会论文集, 2012: 12-16.
- [16] 张圣微,赵鸿彬,张发,等. 基于 MODIS NDVI 的锡林郭勒草原近 10 年的时空动态[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1416-1423.
- [17] 韩路,王海珍,于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 124-129.
- [18] 杨丽萍,王林和,秦艳,等. 锡林郭勒草原东南部近 60 年的气温变化特征: 以多伦县为例[J]. 中国草地学报, 2013, 35(4): 96-101.
- [19] 陈伟娜,闫慧敏,黄河清. 气候变化压力下锡林郭勒草原牧民生计与可持续能力[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 1075-1083.
- [20] 陈佐忠,汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [21] 张富华. 锡林郭勒草地多样性遥感识别与评价研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2014.
- [22] 郭会军,张建丰,王志林,等. 基于 LabVIEW 和 ARM 处理器的大型称重式蒸渗仪测控系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 134-141.
- [23] 刘佳,同小娟,张劲松,等. 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2118-2127.
- [24] 张亚琼,孙西欢,郭向红,等. 不同覆盖方式下蓄水坑土壤温度日变化特征研究[J]. 节水灌溉, 2013(1): 1-5.
- [25] 董智,李红丽,左合君,等. 锡林郭勒典型草原植被高度和盖度对风吹雪的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1106-1110.
- [26] 陈有君. 典型草原区土壤湿度的时序特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
- [27] 许志信,赵萌莉. 过度放牧对草原土壤侵蚀的影响[J]. 中国草地学报, 2001, 23(6): 59-63.
- [28] 王永明,韩国栋,赵萌莉,等. 不同放牧强度对典型草原雪的水文效应[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2007, 38(5): 530-536.
- [29] 伍星,刘慧峰,张令能,等. 雪被和土壤水分对典型半干旱草原土壤冻融过程中 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5484-5493.
- [30] 付强,蒋睿奇,王子龙,等. 不同积雪覆盖条件下冻融土壤水分运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 152-159.
- [31] 刘小燕,刘巧玲,刘廷玺,等. 科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态迁移规律[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 331-339.
- [32] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 298-302.