

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

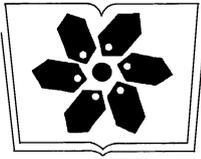
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期 2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等	(7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等	(7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等	(7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等	(7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等	(7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等	(7302)
基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等	(7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华	(7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星	(7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等	(7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉	(7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等	(7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利	(7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等	(7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等	(7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等	(7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成	(7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等	(7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等	(7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚	(7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等	(7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现	(7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等	(7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等	(7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等	(7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等	(7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等	(7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等	(7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等	(7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等	(7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等	(7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅	(7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等	(7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等	(7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等	(7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等	(7595)
专论与综述		
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智	(7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等	(7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201202290273

常娟, 王根绪, 高永恒, 王一博. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7289-7301.

Chang J, Wang G X, Gao Y H, Wang Y B. Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7289-7301.

青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响

常 娟¹, 王根绪^{2,*}, 高永恒², 王一博¹

(1. 兰州大学资源与环境学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 有无积雪覆盖下浅层土壤水热过程是青藏高原多年冻土区水能循环中的一个重要不确定因素。为了研究积雪覆盖对高寒沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响, 在青藏高原多年冻土区选择了典型的有无积雪覆盖的沼泽、草甸建立观测场, 观测浅层土壤的温度和水分状况。通过分别研究积雪对高寒沼泽、草甸浅层土壤温度和水分的影响, 结果表明: 高寒沼泽、草甸在有积雪覆盖下浅层土壤开始冻结和消融的时间都有所滞后, 且冻结持续时间相应有所增加。由于积雪覆盖, 浅层土壤温度变化速率略有减小而水分变化速率略有增加, 积雪起到了抑制土壤温度变化速率和促进土壤水分变化速率的作用。积雪覆盖对秋季冻结过程和夏季融化过程浅层土壤的温度和水分的影响明显大于冬季冻结降温过程和春季升温过程, 且对融化过程的影响较冻结过程明显。通过对比分析有无雪盖沼泽和草甸土壤, 说明积雪的覆盖对沼泽土壤温度的影响要大于草甸土壤, 对土壤水分融升过程的影响大于冻降过程, 且对沼泽浅层土壤的影响大于草甸浅层土壤。

关键词: 青藏高原; 多年冻土; 积雪; 沼泽; 草甸; 浅层土壤; 水热过程

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau

CHANG Juan¹, WANG Genxu^{2,*}, GAO Yongheng², WANG Yibo¹

1 College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China

2 Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China

Abstract: The average altitude of Tibetan Plateau is over 4000 m above sea level with vast areas of permafrost. The interaction between permafrost and the atmosphere is realized by the dynamic water-heat process within the active layer. The snowy condition on the earth surface directly impacts on the variations of the thickness of the active layer and the annual mean soil temperature in the permafrost area. Thus, the shallow soil water-heat process with or without snow cover is a very important uncertain factor in the water and energy circulation processes of the permafrost areas in Tibetan Plateau. In typical alpine meadow and swamp, the active soil moisture and temperature at different depth of layer were observed to reveal the influences of the snow cover changes on the soil water-heat processes. The results show that the thawing and freezing started-time of active soil were later and the duration of freezing were longer with snow cover than that without snow both in alpine meadow and swamp areas. With the snow cover, the active soil temperature variation rate decreased while the soil moisture variation rate increased. The snow cover plays important roles in restraining the soil temperature change and accelerating the moisture change in active soil layer. The impacts of snow cover on soil temperature and moisture are greater in autumn and summer than that in winter and spring, and the influence is more dominant in melting process than in freezing process. Snow cover results in reducing the annual maximum soil temperature and rising the annual minimum soil

收稿日期: 2012-02-29; 修订日期: 2012-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggx@imde.ac.cn

temperature in alpine swamp. On the contrary, both the annual maximum and minimum soil temperature increase under snow cover in alpine meadow. By comparing the temperature differences between the annual maximum and minimum temperature of swamp and meadow soil with or without snow cover, it shows that the snow cover has greater influence on swamp soil temperature than on meadow soil. Some parameters, such as time of melting (T_s), duration of melting and increasing (T_r), the range of soil moisture content increasing (ΔW_s), time of freezing (T_d), duration of freezing (T_z) and the range of soil moisture content falling (ΔW_d), were selected to objectively reflect the influence of snow cover on soil moisture during the freezing process. The results show that the snow cover has more influence on soil moisture in melting and rising process than that in freezing and falling process, and has a more influence on swamp soil moisture than on meadow soil.

Key Words: Qinghai-Tibetan Plateau; permafrost; snow; swamp; meadow; active soil; water-heat process

青藏高原约占我国陆地面积的四分之一,平均海拔在 4000 m 以上,广泛发育着多年冻土和季节冻土,是世界上海拔最高、地形最复杂的高原冻土区。正是由于其特殊的地理位置及其地貌特征,使其在全球气候变化等方面扮演着重要的角色^[1]。在青藏高原区,冻土是随着自然气候的波动在雪盖、高原植被、地表水、地下水和地质构造及地貌的形成演化等地理、地质因素共同作用下的结果^[2],是通过活动层、雪盖、植被与大气相互作用而形成发展的,多年冻土与大气之间的相互作用则主要是通过活动层中的水热动态变化过程来实现的^[3]。地表的植被、积雪、土质等条件直接影响多年冻土区活动层的厚度,年平均地温等的变化,地表植被与水分等条件与多年冻土的发生和发展是一个相互依存、相互发展的关系^[3]。

积雪对土壤温度的影响是由它对土壤表面各种热交换过程的影响组成。积雪可增大地表的反射率,减少辐射能的吸收,使雪面温度比气温低^[4]。由于积雪是热的不良导体,热导率低,冬季可防止土壤热量散逸,使土壤温度高于气温;春季气温回升时,则阻碍土壤增温,使土壤温度回升时间滞后。

对于积雪的保温作用,国外做了大量的研究工作。Brown^[5]认为雪盖的变化所引起的土壤温度变化远大于植被覆盖所造成的影响。Shanley^[6]指出冻结深度与雪层厚度成反比。Goodrich^[7]通过数值模拟表明,积雪的有无和厚度的深浅都对地面温度和冬季冻结深度有重要的影响。国内也有相关的研究。戴竞波等^[8]研究认为,在一定厚度的积雪覆盖下,地温曲线趋于缓和、日温差小;而在没有雪盖时,日温差大,雪有良好的保温作用。张廷军等^[9]研究认为,不稳定的积雪主要起降温作用;稳定积雪形成越早,则其保温作用愈明显。积雪是气候系统的重要组成部分,它们的“易变性”构成了气候系统的不稳定因素。气候变化归根结底是气候系统水热平衡的改变,积雪恰好是反映水热变化的一个综合指标和灵敏的指示器^[10]。植被和积雪是两种影响冻土活动层水热状态最为重要的地表覆被类型,以前大多研究关注了积雪或是植被单要素作用,积雪与植被覆盖变化对活动层土壤水热动态的协同影响研究较少。本次研究就是要探索不同植被覆盖下积雪变化对土壤水热过程的差异性影响,而高寒草甸和高寒沼泽是青藏高原多年冻土区分布面积较大、生态意义最为突出的两类高寒草地类型。通过分析研究青藏高原这两种典型的草地类型在积雪变化下的土壤水热过程,了解基于积雪和植被协同影响对高寒生态系统冻土活动层土壤水热过程,为全球变化下青藏高原脆弱的生态系统未来的变化趋势和驱动因素提供科学的依据和理论支持。本文通过在青藏高原长江源区风火山流域高寒沼泽、草甸区建立观测场,观测多年冻土区在有、无积雪覆盖条件下地温和水分状况,研究青藏高原多年冻土区积雪对高寒沼泽、草甸土壤的水热过程的影响。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

风火山试验区位于长江源区北麓河流域,隶属青海省玉树藏族自治州曲麻莱县境内,属于典型的多年冻土区,高寒沼泽、草甸发育典型。研究区海拔 4680—5360 m,属于青藏高原干旱气候区,年平均气温 $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 $23.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-37.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量 290.9 mm,年平均蒸发量 1316.9 mm,相对湿

度平均为 57%, 年平均地温 $-1.5\sim-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年冻土厚度为 50—120 m, 活动层厚度 0.8—2.5 m。

沼泽草甸 ($34^{\circ}43.816'N, 92^{\circ}53.506'E$), 海拔 4778 m; 高寒草甸 ($34^{\circ}43.682'N, 92^{\circ}53.697'E$), 海拔 4766 m。两种样地均属多年冻土区, 沼泽草甸植被群落主要以藏嵩草 (*Kobresia tibetica*)、羊茅 (*Festuca sp.*)、青藏苔草 (*Carex atrofusca*) 和矮火绒草 (*Leontopodium leontopodioides*) 等高寒植物为主; 高寒草甸植被群落主要以高山嵩草 (*Kobresiapygmaea*)、矮嵩草 (*K. humilis*) 和线叶嵩草 (*K. capilifolia*) 等为主。

1.2 研究方法

在风火山试验区, 分别建立两组观测场, 其中分别观测在有、无积雪覆盖下的高寒沼泽 (植被覆盖度 86% 左右) 和高寒草甸 (植被覆盖度 84% 左右) 的地温和土壤水分。其中有雪组在雪栅栏 (高 1.8 m) 下风处 5 m 平行于雪栅栏设置 3 个观测点 (各个观测点相距 5 m, 雪栅栏总长 20 m), 有雪期 (从当年秋冬季降雪开始至翌年 4、5 月份开始逐渐融化) 观测点平均雪盖厚度 $>15\text{ cm}$; 无雪组设在雪栅栏影响降雪漂移轨迹之外, 距雪栅栏 20 m 远的地区, 与有雪组观测点平行, 每隔 5 m 取一个观测点, 共设置 3 个。每个观测点开挖垂直剖面, 分别在 5、10、15 cm 深度埋设地温观测探头和水分观测仪, 从 2009 年 10 月份开始到 2011 年 8 月份, 每隔 3 h 各点观测 1 次, 取平均值作为当天的温度、水分数据。

其中土壤温度的采集采用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室研制的热敏电阻传感器, 用美国 Fluke 公司生产的万用表 (Fluke180 系列) 读取电阻值, 计算土壤温度。传感器的适用范围为 $-40\sim-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 系统精度为 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]。土壤含水量的采集采用荷兰 Eijkelamp 公司生产的频域反射仪 (FDR), 利用电磁脉冲原理, 根据电磁波在介质中传播频率来测量土壤的表观介电常数, 从而计算土壤体积含水量, 系统精度为 $\pm 2\%$ [10]。FDR 所测得的土壤水分主要指土壤中未冻水的体积含水量, 因此在之后的分析中, 土壤水分指的是未冻水含水量, 而不包括含冰量。地温数据和水分数据是同步观测的, 本文主要对这些地温水分数据进行分析, 来研究积雪覆盖下浅层土壤中的水热过程。其中, 土壤热状况用地温来反映, 本文利用等温线图来表示等温线在土壤深度的最大值, 用以反映土壤的热量状况。

2 实验结果与数据分析

2.1 积雪覆盖对高寒沼泽、草甸浅层土壤冻融过程的影响

以每日测量土壤的温度开始持续 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始记为土壤的冻结日期, 以每日土壤温度开始持续 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开始记为土壤的消融日期 [11], 得到高寒沼泽和草甸在有无积雪覆盖的条件下浅层土壤开始冻结日期、开始消融日期以及土壤的持续冻结时间, 见表 1 (取土壤开始冻结时 2009-10—2010-9 整个过程年)。根据土壤的冻融过程中水热状况的不同特性及表 1 的相关数据, 这里可将高寒沼泽、草甸浅层土壤的年际变化过程分为以下 4 个阶段, 即为夏季融化过程 (简记 ST) (5 月初—10 月中旬): 土壤剖面处于消融状态的阶段; 秋季冻结过程 (简记 AF) (10 月中旬—下旬): 土壤剖面正在冻结的阶段; 冬季降温过程 (简记 WC) (11 月初—1 月中旬): 土壤剖面冻结后的持续降温过程; 春季升温过程 (简记 SW) [11] (1 月中旬—5 月中旬): 土壤剖面冻结, 地温降至最低后的持续升温阶段。

从表 1 可以看出, 积雪覆盖对浅层土壤开始冻结过程、开始融化过程的时间以及冻结持续时间是有影响的。无论是高寒沼泽还是高寒草甸, 浅层土壤开始冻结过程时间大都在 10 月 13 日和 14 日, 并且在有无积雪覆盖条件下高寒沼泽和草甸浅层土壤开始冻结过程表现出一致性。在观测土壤 5、10、15 cm 深度处有积雪覆盖的浅层土壤开始冻结过程时间都比没有积雪覆盖下的浅层土壤的开始冻结过程时间滞后了 1 d, 但在同样覆盖条件 (有积雪、无积雪覆盖) 下浅层土壤的开始冻结过程时间在不同土壤深度上没有差异。土壤开始消融过程时间出现在 5 月上旬和下旬, 高寒沼泽和草甸的浅层土壤在有积雪覆盖的条件下土壤开始消融过程的时间分别比在没有积雪覆盖的情况下延迟了 3—13 d、7—8 d, 并且在两种覆盖条件 (有积雪、无积雪覆盖) 下, 观测深度 5、10、15 cm 处土壤开始消融过程时间都随着土壤深度的增加有滞后的趋势。其中, 沼泽土壤在消融过程中随深度的滞后时间是 13.4 d 和 3.6 d; 草甸土壤在消融过程中随深度的滞后时间是 1 天。另外, 草甸土壤不同深度土壤消融时间都比沼泽土壤消融时间滞后, 其中无积雪覆盖下滞后约 2—4 d, 有积雪覆盖下

约滞后 2—10 d。浅层土壤的冻结持续时间由于积雪覆盖的影响有增加的趋势,并且随着土壤深度的减小有缩短的倾向。在同样覆盖条件(有积雪、无积雪覆盖)下,高寒草甸比沼泽的浅层土壤开始融化过程时间要延迟 2—10 d。此外,高寒沼泽、草甸在有无积雪覆盖的条件下土壤从 5 cm 深度冻结到 15 cm 深度的时间基本一致;同样在有无积雪覆盖条件下,高寒沼泽、草甸浅层土壤从 5 cm 深度融化到 15 cm 深度的时间有增加的趋势,特别是高寒沼泽,其土壤融化时间随深度的加深增加明显。

表 1 有无积雪覆盖下高寒沼泽、草甸浅层土壤冻结消融起始日期及冻结时间

Table 1 The thawing start date, the freezing start date and the frozen duration (day) of the shallow soil of alpine swamp and meadow with or without snow cover

土地类型 Land type	项目 Item	观测点深度 Observation depth/cm					
		5		10		15	
		积雪 Snow	无积雪 Without snow	积雪 Snow	无积雪 Without snow	积雪 Snow	无积雪 Without snow
沼泽	冻结起始日期	10-14	10-13	10-14	10-13	10-13	10-20
草甸	The freezing start date/(月-日)	10-14	10-13	10-14	10-13	10-13	10-14
沼泽	消融起始日期	04-28	05-05	05-11	05-08	05-15	05-02
草甸	The thawing start date/(月-日)	05-17	05-09	05-17	05-10	05-17	05-10
沼泽	冻结持续时间	196	204	210	207	214	194
草甸	The frozen duration/d	215	208	215	209	216	208

以上分析表明,高寒沼泽、草甸浅层土壤开始冻结过程时间由于积雪覆盖的影响有滞后的倾向;而开始消融过程时间随着土壤深度的增加有滞后的趋势,并且由于积雪覆盖其开始消融过程的时间有所延迟;浅层土壤持续冻结时间随着土壤深度的减小有缩短的倾向,但在积雪覆盖的影响下有增加的趋势。

2.2 积雪覆盖对高寒沼泽浅层土壤水热过程的影响

(1) 积雪覆盖对高寒沼泽浅层土壤温度的影响

土壤温度变化过程体现了土壤能量状况的变化过程,有无积雪覆盖下高寒沼泽浅层土壤温度年内变化过程(之前分为 AF、WC、SW、ST 四个阶段)见图 1。

在秋季冻结阶段(AF),土壤浅层接受太阳短波辐射小于放射的长波辐射,浅层土壤因有净的能量支出而降温,土壤温度随着深度的增加而升高^[11]。从图 2 可以看出,在没有积雪覆盖的高寒沼泽浅层土壤中,浅层土壤的温度随着深度的增加而升高。而在有积雪覆盖的情况下,土壤温度从 5 cm 到 10 cm 深度有所降低,从 10 cm 到 15 cm 深度又有轻微的回升。在土壤冻结前,5、10 cm 和 15 cm 深度处,有积雪覆盖的土壤温度都要低于无积雪覆盖的土壤;而在土壤冻结后,有积雪覆盖的土壤温度都比无积雪覆盖的土壤温度略高,这是由于积雪的保温作用导致的。从整个土壤冻结过程来看,在同一深度有积雪覆盖的土壤与无积雪覆盖的土壤相比温度变化要小。特别在 5 cm 深度 10 月 23 日开始急剧降温,无积雪覆盖的土壤温度下降速率与有积雪覆盖的相比要大。而在 10 cm 与 15 cm 深度出现急剧降温分别是 10 月 24 日和 10 月 25 日,分别滞后了 1、2 d,降温速率特征与 5 cm 深度处的一致,无积雪覆盖的地温变化速率要大于有积雪覆盖的土壤温度。总体来看,有积雪覆盖的高寒沼泽浅层土壤不同深度土壤平均降温速率小于无积雪覆盖的土壤,积雪对土壤起到了保温作用。

在冬季降温阶段(WC),当浅层土壤完全冻结后,无论有无积雪覆盖条件下土壤温度都开始急剧降低,之后出现了一个缓慢的降温过渡期,使土壤温度最终降到最低,这个降温过程一直持续到 1 月中旬。从图 1 可以看出,在 100 d 附近(2011 年 1 月左右)土壤到达最低温度,无积雪覆盖的土壤等温线最低达到 -14°C ,有积雪覆盖的土壤等温线最低到 -13°C ,并且最低等温线都出现在 10 cm 深度处。在整个降温过程中来看,有无积雪覆盖浅层土壤不同深度的降温速率基本一致,由于积雪的保温作用,有积雪覆盖的土壤温度都要略高于无积雪覆盖的土壤。

在春季升温阶段(SW),当浅层土壤温度由最低值开始升高时,总体表现为线性增加的趋势,并且土壤温

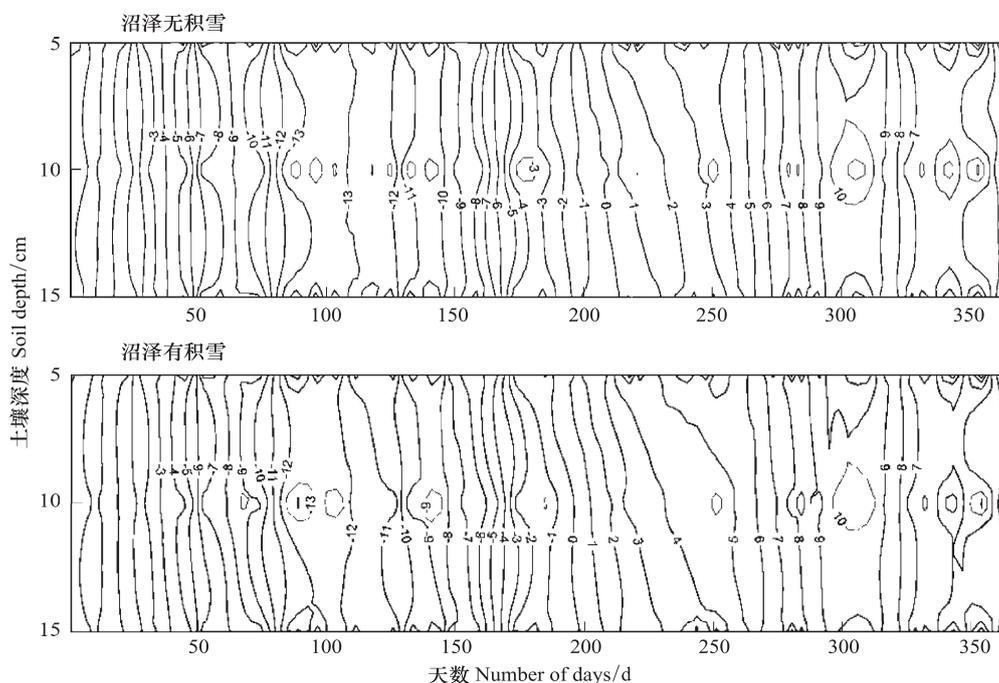


图 1 有积雪覆盖下高寒沼泽浅层土壤温度年内变化过程

Fig.1 The annual change process of shallow soil temperature of alpine swamp with or without snow cover

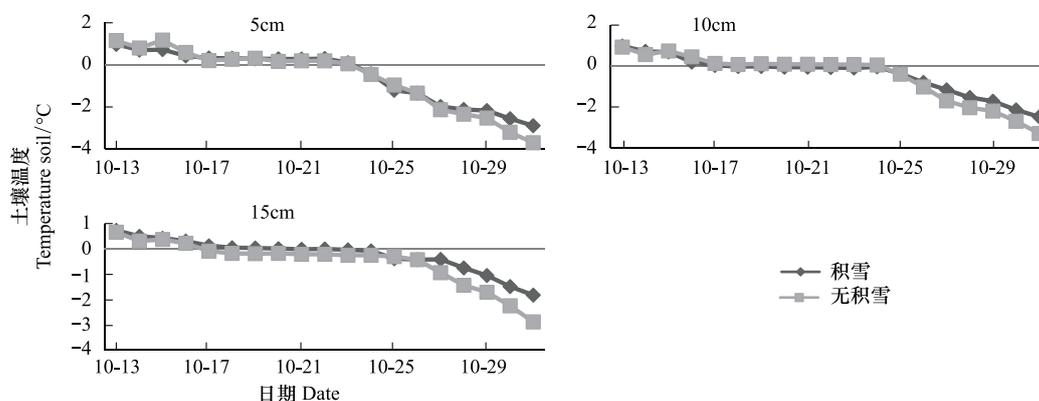


图 2 有积雪覆盖下高寒沼泽浅层土壤秋季冻结过程温度变化

Fig.2 The temperature variation during freezing process in autumn of shallow soil of alpine swamp with or without snow cover

度的升高速率与冬季降温过程土壤温度的降低速率相比略小。从3月底开始(图1,第160天开始)有积雪覆盖的土壤在不同深度都出现了一个短暂的地温急剧回升期。这主要是由于此时期是土壤能量传递方向发生转化的时期,地表接收的太阳辐射开始转变为大于地表发射的长波辐射。从整个升温过程来看,无论有无积雪覆盖浅层土壤不同深度地温的回升过程基本一致,有积雪覆盖的土壤地温在浅层略高一些。从图1可以看出,有积雪覆盖的土壤0℃等温线出现在190—200 d,而无积雪覆盖的土壤0℃等温线出现在200—210 d左右。也就是说,在春季升温阶段有积雪覆盖的土壤浅层较无积雪覆盖的土壤提前10天温度回升到0℃,这主要是由于积雪的覆盖阻挡了土壤散热,起到了保温的作用。

在夏季融化阶段(ST),土壤完全消融后,因湿度较大,吸收太阳辐射的能力加强,地表反照率较小,使地表接收的太阳短波辐射大于地表放射的长波辐射,浅层土壤因有净的能量收入而温度升高^[11],土壤温度从地面开始向下随深度的增加而逐渐降低,无论有无积雪覆盖,不同深度的土壤都经历一个温度增加到最高值,之后开始降低到0℃的过程。如图3,高寒沼泽浅层土壤4—6月份温度变化曲线,在4月份土壤开始升温到完

全融化 5 cm 处有雪盖的土壤温度高于无雪盖的,这主要由于积雪的保温作用使得土壤表层热量散失小于无雪盖的土壤。而在 10、15 cm 处无雪盖的地温要高于有雪盖的,这和沼泽草甸自身的因素密切相关。高寒沼泽在地表 10 cm 以下,土壤有机质含量增高,土壤含水量增大,阻止了一部分热量下土壤下部的传输,导致向下传输的热量减小。特别在土壤融化期,深层土壤含水量邹增,使得地温降低。对于有雪盖的沼泽土壤,积雪反照率高,加之自身的升华作用吸热,使得土壤热量向下传输的更少,从而导致 10 cm 以下土壤温度有雪盖得低于无雪盖的。

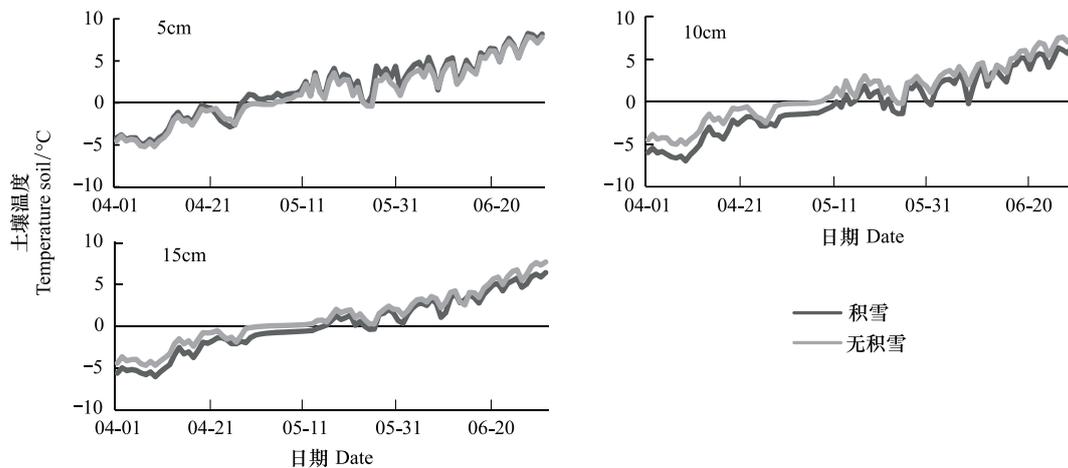


图3 有无积雪覆盖下高寒沼泽浅层土壤4-6月温度变化

Fig. 3 The temperature variation of shallow soil of alpine swamp with or without snow cover from April to June

(2) 积雪覆盖对高寒沼泽浅层土壤水分的影响

高寒沼泽浅层土壤水分变化过程反映了土壤的干湿状况,是地气系统水循环中的重要组成部分。有无积雪覆盖下不同深度土壤水分变化过程(包括 AF、WC、SW、ST 四个阶段)见图 4。从图中看出,土壤水分变化显著,在有无积雪覆盖条件下浅层土壤不同深度都存在一个低含水时期和一个高含水时期。

在秋季冻结过程(AF),如图 4 无论有无积雪覆盖浅层土壤水分含量都经历一个土壤冻结初期水分缓慢减小和土壤冻结末期水分急剧减小期。土壤冻结初期水分缓慢减小,在 5、10 cm 和 15 cm 深度有积雪覆盖土壤水分含量要高于无积雪覆盖土壤。土壤冻结末期水分迅速减小,5 cm 深度土壤与 10、15 cm 相比较,在时间上分别提前了 2 d 和 4 d,且水分减小速率也比 10、15 cm 深度土壤大。从土壤表层到 15 cm 深度,有积雪覆盖的高寒沼泽浅层土壤水分、水分梯度都比没有积雪覆盖的土壤大。有积雪覆盖的土壤在 10 cm 与 15 cm 深度水分减小速率比无积雪覆盖的土壤略高;但是,随着土壤深度的增加,水分减小速率有减缓的趋势。也就是说在秋季土壤冻结过程末期,经历了整个冻结过程后土壤水分含量随着深度的增加有升高的趋势。另外,无积雪覆盖的土壤水分含量高于积雪覆盖的土壤,且随着深度的增加表现也越明显。这主要是由于水分观测仪记录的是土壤中未冻水(液态水)的含量,在本阶段末期,水分观测仪记录的数值代表土壤完全冻结前其未冻水的含量。秋冬季土壤冻结是从表层与深层(60 cm 深度)开始向中部的双向冻结,土壤水分向着温度相对较低的表层与深层迁移^[12],由于无积雪覆盖的土壤温度低于有积雪覆盖的土壤,其土壤冻结过程所用时间与有积雪覆盖土壤相比要少,其土壤中的一部分水分还没有向表层与深层迁移就已经冻结,导致此时期无积雪覆盖的土壤含水量高于有积雪覆盖的土壤。

在夏季融化过程(ST),从图 4 可以看出,与秋季冻结过程相对应,有无积雪覆盖的浅层土壤水分含量都经历一个水分急剧增加期和水分上下波动期。在水分急剧增加期,5 cm 深度的土壤水分含量比 10、15 cm 深度土壤开始急剧增加时间提前 5—8 d,且水分升高的速率与 10、15 cm 深度相比也略高。从图中还可看出,在 5 月底 6 月初时有雪盖的土壤水分含量在不同深度继续急剧升高,明显高于无积雪的土壤。这是由于此阶段气温回升使地表覆盖的积雪开始融化,雪水渗入土壤,土壤含水量急剧增大。在 6—8 月份,有无雪盖的浅层

土壤 5、15 cm 深度处水分含量要高于 10 cm 深度,从前面分析的沼泽土壤温度变化可知,越靠近地表土壤温度越高,从融雪水的下渗角度分析,土壤中的未冻水沿着温度降低的方向迁移,迁移量的大小随温度梯度的增大而增加^[13]。土壤表层温度不利于下渗,10 cm 处向深层下渗相对快于 15 cm 处向深层下渗,从而导致 10 cm 处土壤水分含量低。从前面分析的土壤温度变化可知,积雪消融后有雪盖的土壤温度梯度大于无雪盖的土壤,从而导致有雪盖的土壤水分含量在 10、15 cm 处明显大于无雪盖的土壤水分含量。

在冬季降温过程(WC)与春季升温过程(SW)中,浅层土壤冻结后,土壤中液态水含量很小,此时期土壤与大气的蒸汽交换主要在土壤表层以升华等形式进行^[14],且交换量很小,从图 4 可以看出,这两个阶段在有积雪覆盖条件下不同深度土壤水分含量整体上趋于平缓。因此,本文只对土壤冻结前和消融后的水分含量进行对比分析。通过对 1 年的数据进行分析,浅层土壤消融后的含水量基本上与冻结前的含水量相同。无积雪覆盖的浅层土壤不同深度土壤冻结前含水量与消融后含水量的差值为正值,范围在 0—5%;有积雪覆盖的浅层土壤不同深度土壤冻结前含水量与消融后含水量的差值大都为负值,存在个别正值接近于零。说明由于积雪的影响,浅层土壤水汽交换量减少,积雪的覆盖有利于土壤水分的维持。

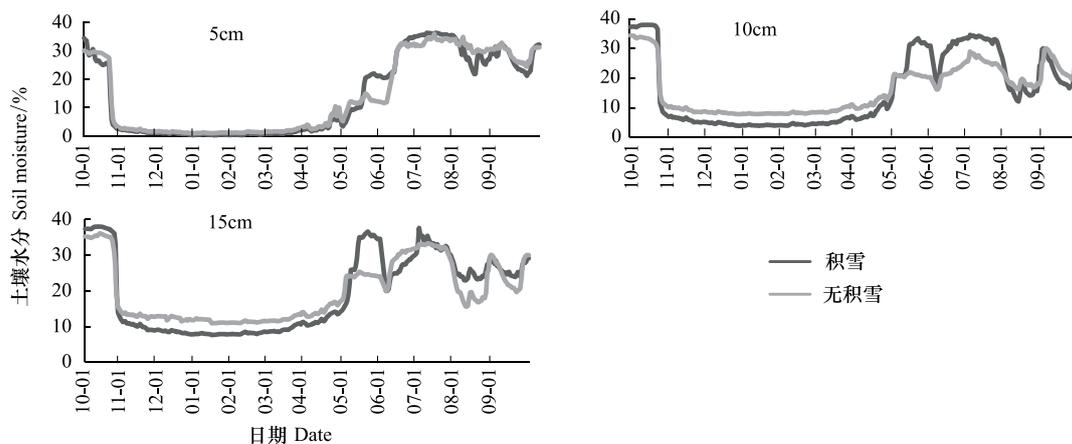


图 4 有积雪覆盖下高寒沼泽浅层土壤水分变化过程

Fig. 4 The shallow soil moisture change process of alpine swamp with or without snow cover

2.3 积雪覆盖对高寒草甸浅层土壤水热过程的影响

(1) 积雪覆盖对高寒草甸浅层土壤温度的影响

同高寒沼泽浅层土壤类似,高寒草甸浅层土壤有无积雪覆盖下地温变化过程分为 AF、WC、SW、ST 四个阶段,见图 5。

在秋季冻结阶段(AF),浅层土壤因有净的能量支出而降温,土壤温度随着深度的增加而升高。从图 6 可以看出,在冻结过程中没有积雪覆盖的高寒草甸浅层土壤,温度随着深度的增加而升高。而在有积雪覆盖的情况下,在冻结初期土壤温度从 5 cm 到 15 cm 深度基本上没有变化;在冻结末期土壤温度随着深度的增加有所升高。在 5 cm 与 10 cm 深度,有积雪覆盖的土壤温度略高于无积雪覆盖的土壤,而在 15 cm 处,有积雪覆盖的土壤温度在整个冻结过程都比无积雪覆盖的土壤温度低。从整个土壤冻结过程来看,在同一深度有积雪覆盖的土壤与无积雪覆盖的土壤相比温度变化要小。在 10 月 23 日 5 cm 处土壤开始迅速降温,无积雪覆盖的土壤温度下降速率与有积雪覆盖的相比要大。而在 10 cm 与 15 cm 深度出现急剧降温分别是 10 月 25 日和 10 月 27 日,分别滞后了 2 d 和 4 d,降温速率特征与 5 cm 深度处的一致,无积雪覆盖的地温变化速率要大于有雪盖的土壤温度。总体来看,有积雪覆盖的高寒草甸浅层土壤不同深度土壤平均降温速率都要小于无雪盖的土壤,这是由于积雪的保温作用导致的。

在冬季降温阶段(WC),从图 5 可以看出,浅层土壤完全冻结后,土壤温度开始急剧降低,之后出现一个相对缓慢的降温过渡期,使土壤温度降到最低,这与之前分析的高寒沼泽土壤降温过程类似。从图 5 可以看

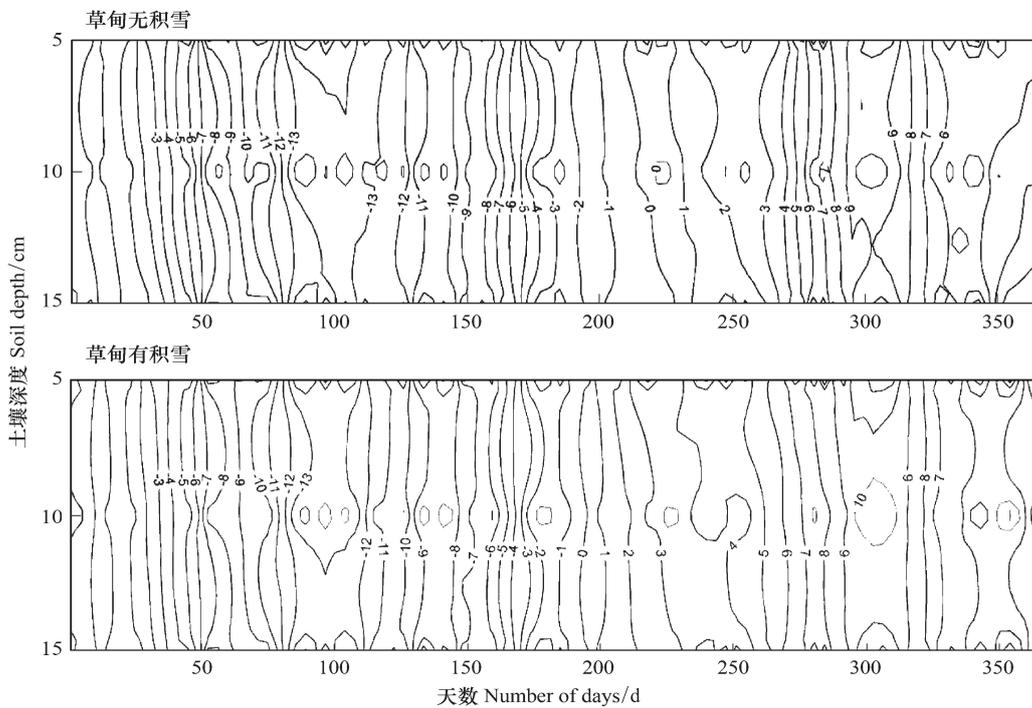


图 5 有积雪覆盖下高寒草甸浅层土壤温度年内变化过程

Fig. 5 The annual temperature variation process of shallow soil of alpine meadow with or without snow cover

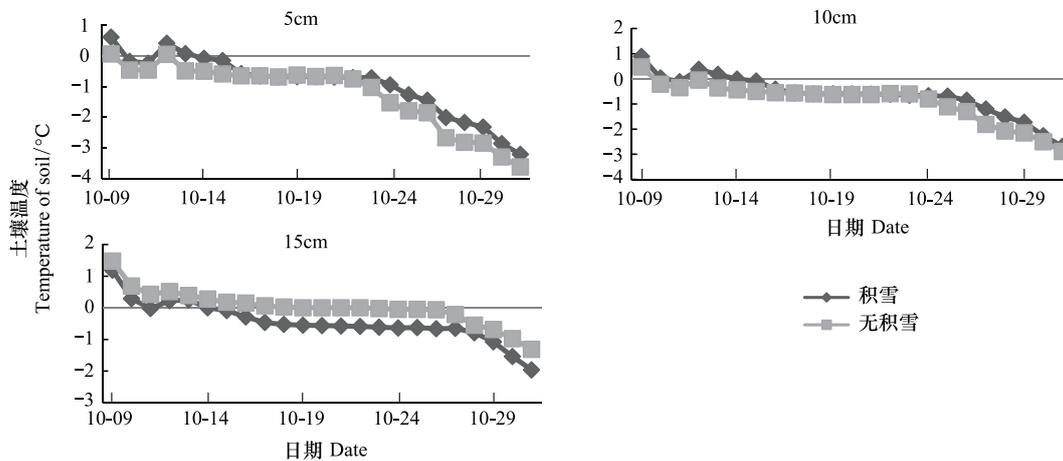


图 6 有积雪覆盖下高寒草甸浅层土壤秋季冻结过程温度变化

Fig. 6 The temperature variation during autumn freezing process of shallow soil of alpine meadow with or without snow cover

出,在 100 d 附近(2011 年 1 月左右)土壤到达最低温度,无积雪覆盖的土壤 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线未闭合,而有积雪覆盖的土壤等温线到最低温度 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是闭合,并且最低等温线出现在 10 cm 深度处,说明有雪盖的土壤温度略高于无雪盖的土壤温度。从整个降温过程中来看,有无积雪覆盖下,土壤不同深度的降温速率基本一致。过程中,由于积雪的保温作用,有积雪覆盖的土壤温度要略高于无积雪覆盖的土壤。无论有无积雪覆盖土壤温度还表现出随着深度的增加逐渐升高的趋势。

在春季升温阶段(SW),从图 5 可以看出,草甸浅层土壤由最低温度开始升高时,与沼泽土壤升温表现出相同的特性:地温回升呈线性增加的趋势,土壤温度升高速率与冬季降温过程地温的降低速率略小,在 3 月下旬有无积雪覆盖的土壤在不同深度都出现了一个短暂的地温急剧回升期。在此阶段,无论有无积雪覆盖浅层土壤不同深度地温的回升过程基本一致,有积雪覆盖的土壤地温高于无积雪覆盖的土壤温度 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,这主

要是由于积雪的保温作用,阻挡了土壤热量的散失。

在夏季融化阶段(ST),浅层土壤吸收的能量多于发散的能量,土壤温度随着深度的增加而逐渐降低,无论有无积雪覆盖,不同深度的土壤都达到一个温度增加的最高值,之后又开始降温过程,其中升温速率与降温速率大致相同。从图5中可看出,在200 d(4月底)时无雪盖的土壤温度在 -1°C ,而有雪盖的草甸土壤温度在 1°C ,说明无雪盖的土壤温度低于有雪盖的土壤,有雪盖的草甸土壤解冻早于无雪盖的。在200 d(4月底)到250 d(6月中)无论有无积雪覆盖土壤的升温速率大致相同,都比较缓慢。此时到300 d(7月底),无雪盖的土壤温度上升速率要高于有雪盖的土壤,从图中可知有雪盖的土壤在此期间地温由 1°C 升高到最高 10°C ,无雪盖的土壤由 -1°C 升高到最高 10°C ,有、无雪盖条件下升温差为 2°C 。如图7为4—6月各层地温变化曲线,从图中可看出4月份土壤开始升温,最初由于积雪的保温作用,有雪盖的草甸土壤地温要高于无雪盖的,大概到4月底时二者的地温开始逐渐接近,经过5月份的过渡期到6月份有雪盖的高寒草甸地温已经低于无雪盖的地温了,也就是说这个阶段积雪由4月份之前对土壤起的保温作用转变成为对土壤的制冷作用^[15-16]。

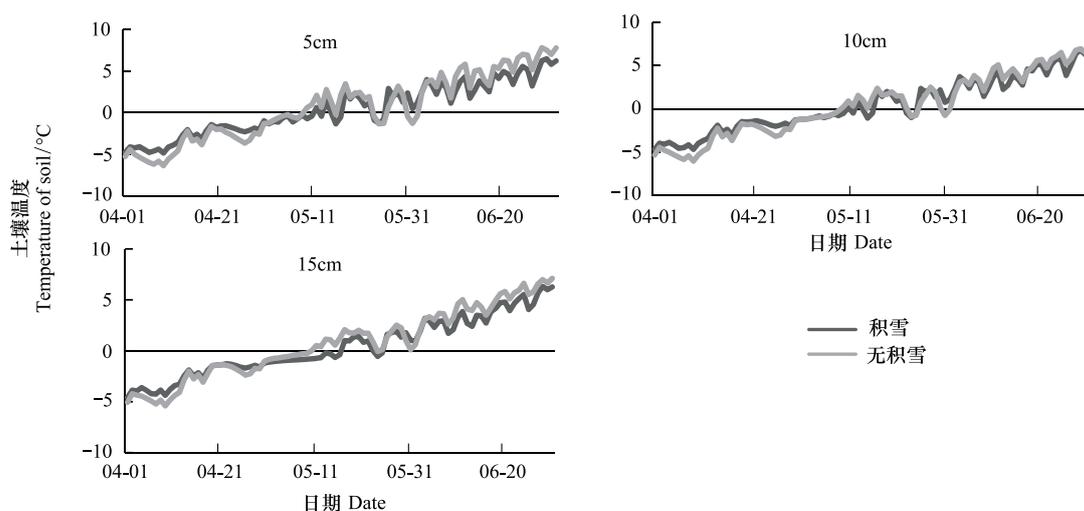


图7 有无积雪覆盖下高寒草甸浅层土壤4—6月温度变化

Fig.7 The temperature variation of shallow soil of alpine meadow with or without snow cover from April to June

(2) 积雪覆盖对高寒草甸浅层土壤水分的影响

有无积雪覆盖下高寒草甸浅层土壤不同深度水分变化过程(包括AF、WC、SW、ST四个阶段)见图8。从图中看出,土壤水分随时间变化显著,有无积雪覆盖条件下浅层土壤不同深度都存在一个平稳低含水时期和一个波动高含水时期。图8与图4相比较,二者的图形变化趋势大致相同,一个年周期中都有一个冬季的低含水时期和夏季的高含水时期。

在秋季冻结过程(AF),如图8,无论有无积雪覆盖不同深度土壤水分含量都经历一个土壤冻结初期水分缓慢减小和土壤冻结末期水分迅速减小期,这与沼泽浅层土壤冻结过程相似。土壤冻结初期水分缓慢减小,在5 cm和15 cm深度有积雪覆盖的土壤水分含量略低于无积雪覆盖土壤,在土壤冻结末期水分迅速减小,5 cm深度土壤与10、15 cm相比较,在时间上分别提前了5 d和8 d。在冻结过程末期,浅层土壤水分含量大都在10%附近,且随着深度的增加水分有减小的趋势。

在夏季融化过程(ST),从图8可以看出,与秋季冻结过程相对应,在有无积雪覆盖下浅层土壤水分含量都经历一个水分急剧增加期和水分上下波动期。在水分急剧增加期,5 cm深度的土壤水分含量比10、15 cm深度土壤开始急剧增加时间提前3—10 d,且水分升高的速率与10、15 cm深度相比也略高。有雪盖的草甸土壤在5月份又出现了一个水分含量急剧升高期,这是由于此阶段气温回升使地表覆盖的积雪开始融化,雪水渗入土壤,土壤含水量急剧增大。水分含量上下波动期,无积雪覆盖的浅层土壤在5、10 cm水分含量低于有积雪覆盖的土壤,15 cm水分高于有雪盖的草甸土壤;无雪盖的土壤从地表到15 cm深度水分含量有逐渐升

高的趋势。

冬季降温过程(WC)与春季升温过程(SW),这个时期浅层土壤冻结,土壤中液态水含量很小,直到第二年地温回升,被冻结的固态水融化。从图8可以看出,这两个阶段在有积雪覆盖条件下草甸浅层土壤水分含量整体上趋于平缓,这与沼泽浅层土壤此时期的特性一致。因此,同样对草甸土壤冻结前和消融后的水分含量进行对比分析表明:浅层土壤消融后的含水量基本上与冻结前的含水量相同;无积雪覆盖的浅层土壤不同深度土壤冻结前含水量与消融后含水量的差值为正值,范围在0—7%;有积雪覆盖的浅层土壤不同深度土壤冻结前含水量与消融后含水量的差值大都为负值,存在个别正值,但其差值都在零附近。说明由于积雪的影响,浅层土壤水汽交换量减少,积雪的覆盖有利于土壤水分的维持。

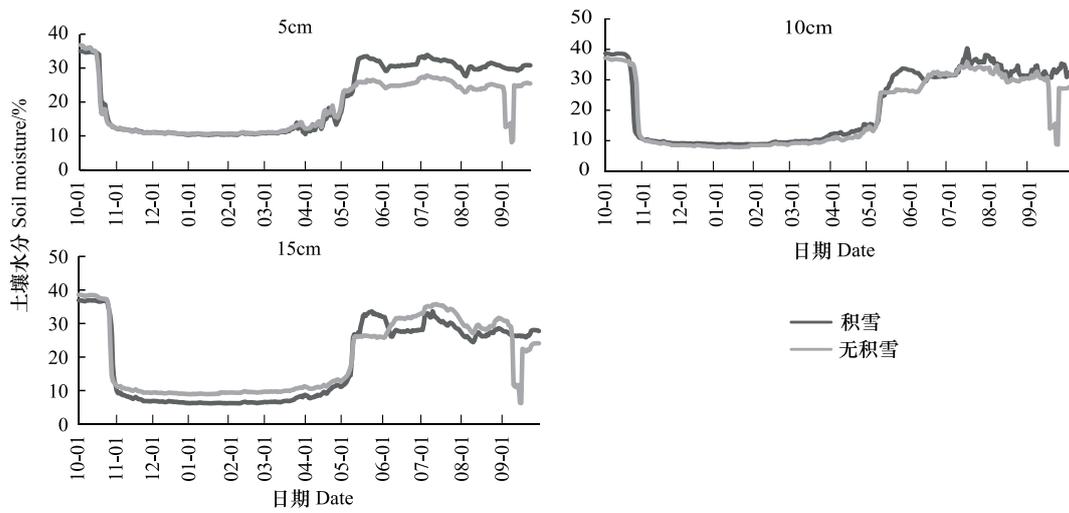


图8 有积雪覆盖下高寒草甸浅层土壤水分变化过程

Fig. 8 The change process of shallow soil moisture of alpine meadow with or without snow cover

3 讨论

3.1 积雪对高寒沼泽和草甸浅层土壤温度的不同作用

通过之前的分析可知,在土壤降温阶段和冻结阶段有雪盖的土壤温度都要比无雪盖的土壤温度略高,温度的变化率略小。当达到最低温度时有雪盖的地温也要高于无雪盖的地温,其中沼泽土壤在5、10、15 cm深度处差值分别为0.66、0.44、1.44,草甸土壤差值分别为0.68、0.4、0.06。从表2可看出,土壤最低温时地温随深度的增加而升高,有雪盖的沼泽土壤在5—10 cm之间温度梯度要小于无雪盖的土壤;有雪盖的草甸土壤5—10 cm与10—15 cm之间温度梯度都要小于无雪盖的土壤,并且随着深度的增加温度梯度增大,说明了积雪对地表的保温作用。

表2 有积雪下高寒沼泽、草甸浅层土壤年内最低、最高温度梯度

Table 2 The annual minimum and maximum temperature gradient of alpine swamp and meadow shallow soil with or without snow cover

参数 Parameter		最低温时 The minimum temperature		最高温时 The maximum temperature	
		有雪盖 Snow	无雪盖 Without snow	有雪盖 Snow	无雪盖 Without snow
		沼泽 Swamp	5—10 cm	-0.22	-0.44
	10—15 cm	-1.3	-0.3	0.45	0.59
草甸 Meadow	5—10 cm	-0.42	-0.69	0.64	0.09
	10—15 cm	-0.69	-1.16	0.32	0.89

在土壤升温阶段和融化阶段,同样有雪盖的地温要略高,地温变化率略小。在夏季积雪完全融化,土壤出现最高温度,有雪盖的草甸土壤温度高于无雪盖的,其在5、10、15 cm深度处差值分别为0.78、0.23、0.8;而有

雪盖的沼泽土壤温度低于无雪盖的,差值分别为 -0.46 、 -0.5 、 -0.36 。从表2可看出,此时地温随着土壤深度的增加而降低,由于积雪在夏季完全融化,沼泽土壤有无积雪覆盖下温度梯度无明显差异,且都随深度的增加温度梯度减小。草甸土壤有雪盖的土壤温度梯度随深度降低,而有雪盖的土壤温度梯度随深度升高。

通过用SPSS的单因素方差分析来研究积雪对浅层土壤温度的影响。结果显示,其中高寒草甸3月份有、无积雪覆盖的浅层土壤在5、10、15 cm处温度有显著差异,分别是0.001、0.002、0.007,都小于0.05(显著性水平 $\alpha=0.05$),4月份在5、10、15 cm处温度差异不显著,分别为0.1、0.13、0.6,5月份各层差异极不显著,分别为0.678、0.828、0.541,6、7月份各层土壤差异较显著,大都在0.01附近,到了8月份各层温度差异不显著,分别为0.154、0.316、0.067。这主要是由于在4月份之前土壤处于冻结状态,地表的积雪对地温起到了保温的作用,使得由于积雪覆盖浅层土壤温度差异显著。进入4月份之后(特别是下旬),土壤开始升温,无雪盖的土壤地温回升速度快于有雪盖的,使得有、无雪盖的浅层土壤地温逐渐接近,特别到了5月份二者温度极近似,此时正好是有雪盖地温由之前的高于无雪盖地温向低于无雪盖地温转化的过渡期(如图7),所以导致4、5月份二者地温差异不显著,尤其是5月份。6月份地温继续升高,但此时有雪盖的土壤地温要低于无雪盖的,积雪在此阶段起到了抑制温度回升的作用。一直到8月份,积雪完全融化之后,积雪对二者地温影响差异不显著。对于高寒沼泽,3月份有、无积雪覆盖的浅层土壤在各层地温具有显著差异,都小于0.05,4月在5 cm处地温差异不显著,为0.584,而在10、15 cm处差异显著为0.001、0.005,5月份各层地温差异不显著,分别为0.715、0.429、0.643,6、7、8月份同4月份在5 cm处地温差异不显著,分别为0.343、0.227、0.343,而在10、15 cm处差异显著分别为0.017、0.012和0.012、0.005以及0.044、0.036。这一过程主要是因为3月份土壤完全冻结,由于积雪的保温作用使得有雪盖的沼泽浅层土壤温度相对无雪盖的要高,因此二者地温差异显著。4月份地温回升,由于积雪的制冷作用^[15],无雪盖的土壤地温回升速度快于有雪盖的,使得有、无雪盖的浅层土壤地温逐渐接近,在土壤5 cm处地温差异不显著。但是由于沼泽草甸具有较厚的草根层(10—25 cm)和凋落物层,加之其本身相对与草甸具有较高的含水量,使得在土壤10 cm以下影响地温的因素多,此阶段又是土壤开始融化阶段,由于地表积雪的存在反射了一部分热能,使得热量向土壤下部的传输减小,导致其10 cm以下土壤温度低于无雪盖的地温,使得在10、15 cm处二者地温差异显著。5月份(如图3)是土壤温度由负温向正温的过渡期,热量传输由向上为主转为向下为主;同时,此时期也是土壤水分发生相变的主要阶段,这些复杂的热传导过程导致该时段各层地温差异不显著。6月份地温继续升高,在积雪与沼泽草甸本身因素的共同作用下,直到8月份其5 cm处地温差异不显著,而在10、15 cm处差异显著。

由于积雪的作用使得沼泽土壤年内的最低温度略高、最高温度略低,草甸土壤年内的最高温和最低温都略高。通过分析比较年内土壤最高温与最低温差发现,草甸浅层土壤在5、10、15 cm深度有雪盖与无雪盖的地温差分别为 -0.1 、 0.18 、 0.14 ;沼泽浅层土壤有无雪盖的地温差分别为1.12、0.94、1.8。由于积雪的影响,沼泽浅层土壤年内的温度差分别是草甸浅层土壤年内差的11.2、5.22、12.86倍。

3.2 积雪对高寒沼泽和草甸浅层土壤水分的不同作用

为了客观反映积雪对土壤水分在冻融过程的影响,选择土壤水分变化的融升时间 T_s (土壤水分曲线由冻结期开始融化增加形成凸起的拐点,称为土壤水分融升始点,对应时间称为土壤融化初始时间)、融升历时 T_r (土壤水分开始融升至夏初水分峰值所经历的时间)、土壤融化水分升高幅度 ΔW_s (简称融升幅度)等指标来刻画土壤融化期分水的变化^[17],其中:

$$\Delta W_s = (\theta_m - \theta_0) / \theta_0 \quad (a)$$

式中, θ_m 、 θ_0 分别表示土壤水分融升峰值和融升初始值。

同样地,确定土壤水分冻结时间 T_d 、冻结历时 T_z 、土壤冻结水分降低幅度 ΔW_d (简称冻降幅度)来刻画土壤冻结发生时土壤水分的变化^[17],见表3。

土壤水分相对融升幅度和冻降幅度反映了土壤水分在冻结融化过程中的变化程度(表3)。在不同的深度,高寒沼泽、草甸有雪盖的土壤水分融升幅度和水分融升历时远大于无雪盖的土壤。高寒沼泽不同深度有

雪盖与无雪盖的土壤水分融升幅度比分别为 2.51、3.65、7.57;高寒草甸不同深度有雪盖与无雪盖的土壤水分融升幅度比分别为 2.32、1.26、1.97。以上不同的融升幅度形成了融化发生期土壤水分分布由于积雪的覆盖变化的显著差异:由于积雪覆盖,春夏气温回升积雪消融,土壤水分融升幅度增大;对于不同土地类型有无积雪覆盖土壤水分融升幅度比来看,高寒沼泽土壤在不同深度都大于草甸土壤,说明在浅层土壤水分融化过程中积雪覆盖对沼泽的影响大于草甸的。

表 3 有无雪盖高寒沼泽、草甸浅层土壤不同深度土壤融升冻降幅度参数

Table 3 The melting-rising and freezing-falling scope parameters in different depth of shallow soil of alpine swamp and meadow with or without snow cover

深度 Depth		5cm			10cm			15cm		
参数 Parameter	T_s /月-日	T_r /d	ΔW_s	T_s /月-日	T_r /d	ΔW_s	T_s /月-日	T_r /d	ΔW_s	
沼泽	有雪 Snow	04-16	35	2.99	05-01	20	0.95	05-06	15	0.53
Swamp	无雪盖 Without snow	04-16	28	1.19	04-30	14	0.26	05-03	11	0.07
草甸	有雪盖 Snow	04-16	35	1.3	04-19	31	1.18	05-03	18	1.32
Meadow	无雪盖 Without snow	04-16	39	0.56	04-20	24	0.94	05-03	12	0.67
参数 Parameter	T_d /月-日	T_z /d	ΔW_d	T_d /月-日	T_z /d	ΔW_d	T_d /月-日	T_z /d	ΔW_d	
沼泽	有雪盖 Snow	10-22	5	0.8	10-24	4	0.62	10-27	2	0.29
Swamp	无雪盖 Without snow	10-22	5	0.84	10-24	4	0.54	10-27	2	0.16
草甸	有雪盖 Snow	10-17	10	0.49	10-21	7	0.66	10-25	6	0.71
Meadow	无雪盖 Without snow	10-15	12	0.6	10-20	8	0.68	10-25	5	0.65

T_s 土壤水分变化的融升时间, T_r 土壤水分的融升历时, 土壤融化水分升高幅度 ΔW_s ; 土壤水分冻结时间 T_d 、土壤水分冻结历时 T_z 、土壤冻结水分降低幅度 ΔW_d

在土壤冻结阶段,从不同覆盖类型土壤水分冻结历时和变化幅度来看,同一土地类型不同深度有无雪盖土壤冻结历时几乎相同,且与融升历时相比,所用时间明显缩短。土壤水分冻降幅度变化与融升幅度相比,其变化的范围小。沼泽土壤在 5、10、15 cm 深度有无雪盖土壤水分冻降幅度差值分别为 -0.04、0.08、0.13,草甸土壤有无雪盖水分冻降幅度差分别为 -0.11、-0.02、0.06。由于此阶段地表的积雪尚未形成,也说明了积雪对土壤冻融过程中水分变化过程的影响。

4 结论

(1) 无积雪覆盖的浅层土壤与有积雪覆盖的土壤相比,土壤开始冻结和融化时间有所提前,且冻结持续时间相对较短。无论是高寒沼泽还是高寒草甸,积雪对其浅层土壤的冻融作用起到了滞后的作用。

(2) 无论高寒沼泽还是高寒草甸,无积雪覆盖的浅层土壤与有积雪覆盖的土壤相比,土壤温度变化速率略大、土壤水分变化速率略小,积雪起了抑制土壤温度变化速率、促进水分变化速率的作用。

(3) 积雪覆盖对秋季冻结过程和夏季融化过程浅层土壤的温度和水分的影响明显大于冻结降温过程和春季升温过程。不管是高寒草甸还是高寒沼泽,积雪对浅层土壤冻结后地温和水分的影响小于土壤未冻结时,并且对融化过程的影响较冻结过程明显。

(4) 由于积雪的保温作用使得沼泽、草甸土壤年内的最低温度升高,通过分析有无雪盖土壤年内最高最低温差,说明积雪的覆盖对沼泽土壤温度的影响要大于草甸土壤。通过引入土壤水分冻降幅度、融升幅度等参数,表明积雪覆盖对土壤水分融升过程的影响大于冻降过程,且对沼泽浅层土壤的影响大于草甸浅层土壤。

References:

- [1] Yao T D. The Cryospheric Dynamic Characteristics of the Central Qinghai Tibetan Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1-308.
- [2] Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, Chen G D, Li S D. Geocryology in China. Beijing: Science Press, 2002: 1-450.
- [3] Wu Q B, Shen Y P, Shi B. Relationship between frozen soil together with its water-heat process and ecological environment in the Tibetan Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 250-255.
- [4] Gao R, Wei Z G, Dong W J. Analysis of the cause of the differentia in interannual variation between snow cover and seasonal frozen soil in the

- Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 153-159.
- [5] Brown R J E. Influence of climate and terrain on ground temperatures in the continuous permafrost zone of northern Manitoba and Keewatin District, Canada. *Proceeding of the Conference on Permafrost*, 3 rd ed. National Research Council of Canada, 1974; 15-21.
- [6] Shanley J B, Chalmers A. Effect of frozen soil on snow melt runoff at Sleepers River, Vermont. *Hydrological Processes*, 1999, 13(12/13): 1843-1857.
- [7] Goodrich L E. The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19(4): 421-432.
- [8] Dai J B, Li A Y. Influence of snow cover to the ground temperature in the permafrost region in the northern part of the Great Xing'an Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(1): 10-18.
- [9] Zhang Y J, Tong B L, Li S D. Influence of snow cover on the lower limit of permafrost in Altai Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(1): 57-63.
- [10] Hu H C, Wang G X, Wang Y B, Liu G S, Li T B, Ren D X. Response of soil heat-water processes to vegetation cover on the typical permafrost and seasonally frozen soil in the headwaters of the Yangtze and Yellow Rivers. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(2): 242-250.
- [11] Liu G S, Wang G X, Hu H C, Li T B, Wang J F, Ren D X, Huang Y J. Influence of vegetation coverage on water and heat processes of the active layer in permafrost regions of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 89-95.
- [12] Cheng G D. Thick underground ice formation process. *Science in China Series B*, 1982, (3): 281-288.
- [13] Ren X Z. Study on the Effect of Snow Melt on the Soil Water Content and Temperature [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [14] Yang M X, Yao T D, He Y Q. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 553-558.
- [15] Tian J, Chen X F. The influence of the surface earth's heat energy with snow. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2003, (5): 27-29.
- [16] Hinkel K M, Bockheim J G, Peterson K M, Norton D W. Impact of snow fence construction on tundra soil temperatures at Barrow, Alaska. *Permafrost*, Phillips, Springman & Arenson, 2003: 401-405.
- [17] Li Y S. The Experimental Study of the Impact of Alpine Meadows Coverage Changes on the Hydrological Cycle at Permafrost Zone of the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences for the Degree of Doctor of Philosophy, 2007.
- [18] Chen X F, Tian J, Zhang X P, Wang T L, Xie L Q, Wei D, Yang G F. An overview of the researches on the coupled transport of water, heat and solute in the accumulating and melting processes of snowpack. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(2): 288-292.
- [19] Wang G X, Li Y S, Wang Y B, Chen L. Typical alpine wetland system changes on the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 481-491.
- [20] Wang G X, Hu H C, Wang Y B, Chen L. Response of alpine cold ecosystem biomass to climate changes in permafrost regions of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(5): 671-679.
- [21] Wang G X, Bai W, Li N, Hu H C. Climate changes and its impact on tundra ecosystem in Qing-Tibet Plateau, China. *Climatic Change*, 2011, 106(3): 463-482.
- [22] Mellander P E, Löfvenius M O, Laudon H. Climate change impact on snow and soil temperature in boreal Scots pine stands. *Climatic Change*, 2007, 85(1/2): 179-193.
- [23] Wipf S, Stoeckli V, Bebi P. Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Climatic Change*, 2009, 94(1/2): 105-121.

参考文献:

- [1] 姚檀栋. 青藏高原中部冰冻圈动态变化特征. 北京:地质出版社,2002;1-308.
- [2] 周幼吾,郭东信,邱国庆,程国栋,李树德. 中国冻土. 北京:科学出版社,2002;1-450.
- [3] 吴青柏,沈永平,施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系. *冰川冻土*,2003,25(3):250-255.
- [4] 高荣,韦志刚,董文杰. 青藏高原冬春积雪和季节冻土年际变化差异的成因分析. *冰川冻土*,2004,26(2):153-159.
- [8] 戴竞波,李恩英. 大兴安岭北部多年冻土地区雪盖对地温的影响. *冰川冻土*,1981,3(1):10-18.
- [9] 张廷军,童伯良,李树德. 我国阿尔泰山地区雪盖对多年冻土下界的影响. *冰川冻土*,1985,7(1):57-63.
- [10] 胡宏昌,王根绪,王一博,刘光生,李太兵,任东兴. 江河源地区典型多年冻土和季节冻土区水热过程对植被盖度的响应. *科学通报*,2009,54(2):242-250.
- [11] 刘光生,王根绪,胡宏昌,李太兵,王俊峰,任东兴,黄雅娟. 青藏高原多年冻土区植被盖度变化对活动层水热过程的影响. *冰川冻土*,2009,31(1):89-95.
- [12] 程国栋. 厚层地下冰的形成过程. *中国科学: B 辑*,1982,(3):281-288.
- [13] 任喜珍. 积雪消融对土壤水热状况的影响研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [14] 杨梅学,姚檀栋,何元庆. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用. *山地学报*,2002,20(5):553-558.
- [15] 田静,陈晓飞. 积雪对地面热状况的影响. *水土保持科技情报*,2003,(5):27-29.
- [17] 李元寿. 青藏高原典型多年冻土区高寒草甸覆盖变化对水循环影响的试验研究 [D]. 北京:中国科学院,2007.
- [18] 陈晓飞,田静,张雪萍,王铁良,谢立群,魏丹,杨国范. 积雪融雪过程中水、热、溶质耦合运移规律的研究进展. *冰川冻土*,2006,28(2):288-292.
- [19] 王根绪,李元寿,王一博,陈玲. 近 40 年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化. *地理学报*,2007,62(5):481-491.
- [20] 王根绪,胡宏昌,王一博,陈琳. 青藏高原多年冻土区典型高寒草地生物量对气候变化的响应. *冰川冻土*,2007,29(5):671-679.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)

Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus*) SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)

Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)

Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai Lake of Guizhou, China YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)

Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)

Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)

Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)

Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)

Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)

Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)

The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)

The dynamic variation of maize (*Setaria mays* L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)

Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)

Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)

Effects of fire damages on *Larix gmelinii* radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)

A model for water consumption by mountain jujube pear-like XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)

Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元

DOI: 10.5846/stxb201202290273

常娟, 王根绪, 高永恒, 王一博. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7289-7301.

Chang J, Wang G X, Gao Y H, Wang Y B. Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7289-7301.

青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响

常 娟¹, 王根绪^{2,*}, 高永恒², 王一博¹

(1. 兰州大学资源与环境学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 有无积雪覆盖下浅层土壤水热过程是青藏高原多年冻土区水能循环中的一个重要不确定因素。为了研究积雪覆盖对高寒沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响, 在青藏高原多年冻土区选择了典型的有无积雪覆盖的沼泽、草甸建立观测场, 观测浅层土壤的温度和水分状况。通过分别研究积雪对高寒沼泽、草甸浅层土壤温度和水分的影响, 结果表明: 高寒沼泽、草甸在有积雪覆盖下浅层土壤开始冻结和消融的时间都有所滞后, 且冻结持续时间相应有所增加。由于积雪覆盖, 浅层土壤温度变化速率略有减小而水分变化速率略有增加, 积雪起到了抑制土壤温度变化速率和促进土壤水分变化速率的作用。积雪覆盖对秋季冻结过程和夏季融化过程浅层土壤的温度和水分的影响明显大于冬季冻结降温过程和春季升温过程, 且对融化过程的影响较冻结过程明显。通过对比分析有无雪盖沼泽和草甸土壤, 说明积雪的覆盖对沼泽土壤温度的影响要大于草甸土壤, 对土壤水分融升过程的影响大于冻降过程, 且对沼泽浅层土壤的影响大于草甸浅层土壤。

关键词: 青藏高原; 多年冻土; 积雪; 沼泽; 草甸; 浅层土壤; 水热过程

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau

CHANG Juan¹, WANG Genxu^{2,*}, GAO Yongheng², WANG Yibo¹

1 College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China

2 Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China

Abstract: The average altitude of Tibetan Plateau is over 4000 m above sea level with vast areas of permafrost. The interaction between permafrost and the atmosphere is realized by the dynamic water-heat process within the active layer. The snowy condition on the earth surface directly impacts on the variations of the thickness of the active layer and the annual mean soil temperature in the permafrost area. Thus, the shallow soil water-heat process with or without snow cover is a very important uncertain factor in the water and energy circulation processes of the permafrost areas in Tibetan Plateau. In typical alpine meadow and swamp, the active soil moisture and temperature at different depth of layer were observed to reveal the influences of the snow cover changes on the soil water-heat processes. The results show that the thawing and freezing started-time of active soil were later and the duration of freezing were longer with snow cover than that without snow both in alpine meadow and swamp areas. With the snow cover, the active soil temperature variation rate decreased while the soil moisture variation rate increased. The snow cover plays important roles in restraining the soil temperature change and accelerating the moisture change in active soil layer. The impacts of snow cover on soil temperature and moisture are greater in autumn and summer than that in winter and spring, and the influence is more dominant in melting process than in freezing process. Snow cover results in reducing the annual maximum soil temperature and rising the annual minimum soil

收稿日期: 2012-02-29; 修订日期: 2012-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggx@imde.ac.cn