

doi:10.3799/dqkx.2014.040

黄河源区植被对活动层温度和水分的影 响

罗栋梁, 金会军, 何瑞霞, 杨思忠

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, 甘肃兰州 730000

摘要: 植被和活动层水热关系是青藏高原冻土生态环境的重要组成部分, 对气候变化和工程活动积极响应, 是目前全球变化研究的热点之一. 为了解植被差异对活动层水热过程的影响, 以场地监测和植被调查数据为基础, 分析了黄河源区高温高海拔多年冻土区同一地貌单元内局地条件相似而植被差异显著的 3 个场地活动层温度和水分变化. 初步结果表明: 植被盖度较低时, 活动层水分含量也低, 且含水量高值区趋于中下部; 植被盖度较高时, 冷季地气温差和温度位移都减小, 暖季地气温差增大; 随着植被盖度增大, 冻融开始和结束时间明显滞后, 冻融持续时间延长. 初步揭示了黄河源区地表植被对活动层水分和温度的影响过程, 对研究和保护高寒生态环境稳定具有重要意义.

关键词: 活动层; 水热过程; 植被; 响应; 气候变化; 黄河源区.

中图分类号: P642.14 **文章编号:** 1000-2383(2014)04-0421-10 **收稿日期:** 2013-08-27

Responses of Surface Vegetation on Soil Temperature and Moisture of the Active Layer in the Source Area of the Yellow River

Luo Dongliang, Jin Huijun, He Ruixia, Yang Sizhong

State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Relationships of the vegetation and active layer are the foci of global change study since the interaction between the vegetation and hydrothermal processes of the active layer are important part of Qinghai-Tibet Plateau permafrost ecosystems, and they are liable to react on the global warming and anthropogenic activities. Based on the analysis of soil temperature and unfrozen water content of the active layer, surveys of vegetation, the influences of vegetation on the variations of hydrothermal processes of the active layer in the source area of the Yellow River (SAYR) are studied. Preliminary results show that variations of unfrozen water content and soil temperature of the active layer are significantly affected by vegetation cover, above-ground biomass, and dominant species. The distribution unfrozen water content is consistent with the vegetation coverage. The offsets between the ground surface temperature and air temperature, which are affected by the vegetation cover, are higher in winter-time and lower in summer-time. The beginning of freezing is latter, the finishing of freezing is earlier, and the duration of freezing is longer for those sites with higher vegetation cover. With lowering of vegetation cover, zones with higher content of unfrozen water shift towards the bottom of the active layer. This study reveals the effects of variations of vegetation on soil temperature and unfrozen water content of the active layer for warm, and high-altitude permafrost in the SAYR, and will also facilitate the research and protection of cold eco-environments in the SAYR.

Key words: active layer; hydrothermal variation; vegetation; response; climate change; source area of the Yellow River.

活动层是热力学动态最活跃的岩(土)层, 伴随着夏季融化、暖季冻结过程的进行及其复杂的水热耦合, 对高寒植被(梁四海等, 2007)、地气能量交换(周剑等, 2008)、多年冻土区碳储分布变化(牟翠翠等, 2013)等施加综合影响. 活动层水热过程及其温度和水分变化不仅受气温、海拔和冻土环境等因素

制约(陆子建等,2006;王根绪等,2006),在局地尺度内更大程度上受植被覆盖、植株种类及地上生物量等为表征的植被特征差异影响.吴青柏等(2003)研究表明,不同草原生态系统水热特征差异较大,从而影响地表温度、冻融指数及活动层厚度.陆子建等(2006)指出工程活动导致包括高寒植被在内的下垫面条件改变对活动层水热状态变化影响很大.金会军等(2008)就植被盖度对地温的影响规律进行了研究,指出植被盖度依次减少时,地面温度年较差也减少.胡宏昌等(2009)、李元寿等(2010)、Wang *et al.* (2010)研究表明,青藏高原多年冻土活动层土壤水分对植被盖度差异响应强烈:盖度越小,冻结和融化开始时间越早,相变量越大,冻结深度积分越小,负值等温线和未冻结期正值等温线最大侵入深度和持续时间明显增加.此外,一些学者的研究表明,植被物种多样性和生物量空间分布规律对活动层埋深变化产生积极响应(陈生云等,2010;王增如等,2012).但包括植被盖度、物种和地上生物量差异等在内的高寒植被特征等对活动层冻融过程及其温度、水分变化影响的综合研究却较少.而土壤含水量与地面温度呈一定关系,并可指示植被发育程度(周丹等,2013).本文拟通过对位于青藏高原东北部黄河源区高温高海拔多年冻土区的麻多乡,同一地貌单元内、差异性植被条件下的 3 个活动层场地温度和水分变化进行分析,研究活动层水热过程、温度和水分变化

对高寒植被特征差异的响应.

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区域概况

黄河源区位于青藏高原大片连续多年冻土东北边缘(图 1),是典型高温多年冻土区,年平均地温大多高于 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻土层厚 40 m 内(罗栋梁等,2012).海拔是多年冻土空间分布的主要影响因素,随着海拔由两湖(扎陵湖、鄂陵湖)湖区及黄河干流河谷向南向北升高,年平均地温降低,冻土厚度增加,活动层厚度则有减少趋势(罗栋梁等,2013).冻土对增温响应明显(郝振纯等,2007).麻多乡($35^{\circ}02'$, $96^{\circ}23'$,海拔 4 420 m)位于黄河源区西部约古宗列盆地,西距黄河正源约古宗列曲发源地雅拉达泽山($35^{\circ}09'40.11''$, $95^{\circ}41'38.43''$,5 214 m)63 km,东距扎陵湖西岸即黄河入湖口 62 km.气候严寒,水热同期,2011 年年均气温 $-5.78\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月(12 月、1 月)月均气温为 $-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-17.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,1~3 月月均气温也低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,6~9 月月均气温为正;年降水量约 350 mm,降水多集中在 6~9 月,占全年降水量 70%以上(图 2).根据活动层底部年均温度约 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和地温梯度约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$ (罗栋梁等,2012)推算:本区多年冻土年平均地温 $0\sim -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻土层厚 20 m 内.

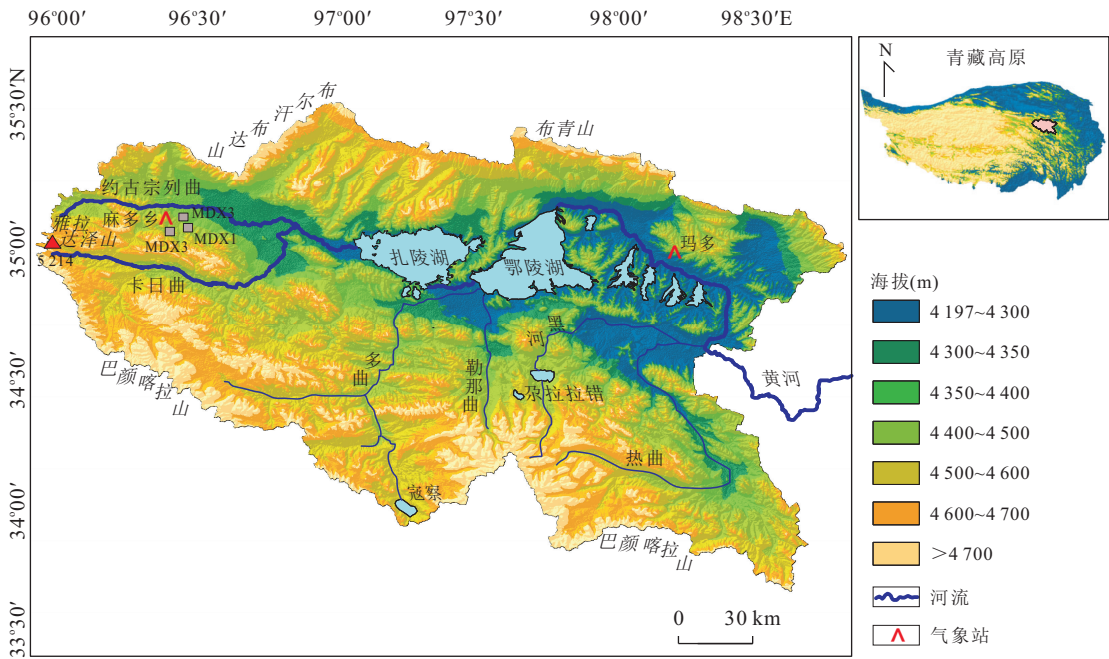


图 1 黄河源区地理地貌

Fig.1 Geomorphological characteristics of the sources areas of the Yellow River

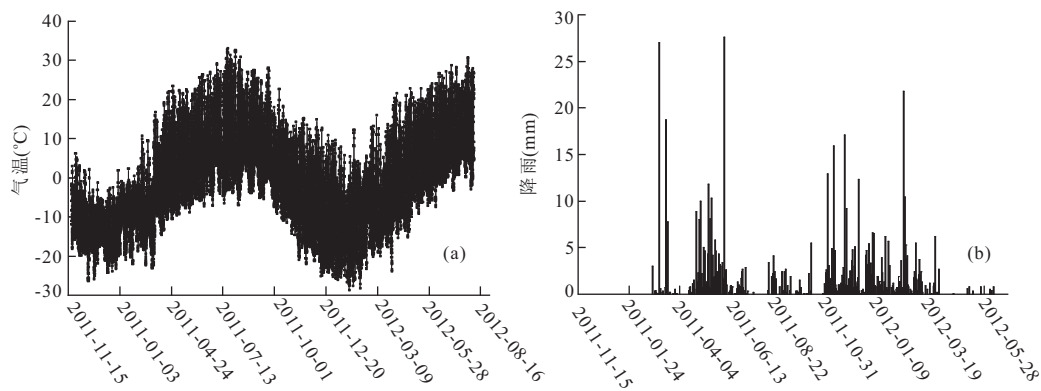


图 2 麻多乡 2011、2012 年气温和降水变化

Fig.2 Air temperature and rainfall in 2011 and 2012 in Maduo site

1.2 场地布置和植被调查

2010 年 10 月在研究区根据植被特征差异布置了 3 个活动层场地,相距不到 100 m.其中 MDX1 和 MDX3 深 200 cm,MDX2 深 250 cm(图 3).在各场地 5、20、40、80、120、160 和 200 cm 等深度布设温度和水分探头.5 cm 深处地温被当作地面温度.采用 RM. Young 温湿度计测量气温,其测量范围 - 50 ~ 50 °C,精度为±0.3 °C;采用 TRwS 称重式总降水仪测定降水量,精度为 0.25 mm.温度探头系由冻土工程国家重点实验室研制的高精度热敏电阻温度传感器,系统精度为±0.05 °C.土壤体积含水量由美国 Campbell Scientific Inc.公司生产的 TDR(时域反射仪)CS616 探头测定,系统精度为±0.05%,分辨率 0.1%.安装完成后将所有探头与 CR3000 数据采集器连接,进行自动采集,其中气象站场地要素每半小时记录 1 次,活动层场地要素每 1 小时记录 1 次.植被调查内容包括植被盖度、植株高度和地上生物量,每个场地包括 7、8 个 1 m×1 m 的调查样方,在 2011 和 2012 年 7~8 月的植被生长期进行.植被盖度采取专家目估打分取平均值法获得,植株高度以直尺量测 3 株以上同类植物取均值,采取刈割法割取地上植物装入信封,在室内利用烘箱在 80 °C 下烘干并称其净重获取地上生物量.

植被调查表明麻多乡高寒草甸植被的优势类群为嵩草属(*Kobresia*),但包括植被盖度、丰富度指数、地上生物量和优势建群种在内的场地植被特征差异显著.MDX1 地表含水量较高,热融浅洼地较多,冷生地貌发育.植被盖度 80%~90%,植被丰富度指数 13,优势建群种为耐寒湿生和湿中生藏嵩草(*K.tibetica*),伴生种包括毛茛(*Ranunculus*)、苔草(*Carex*)、黄芪(*Astragalus*)、火绒草(*Leontopodi-*

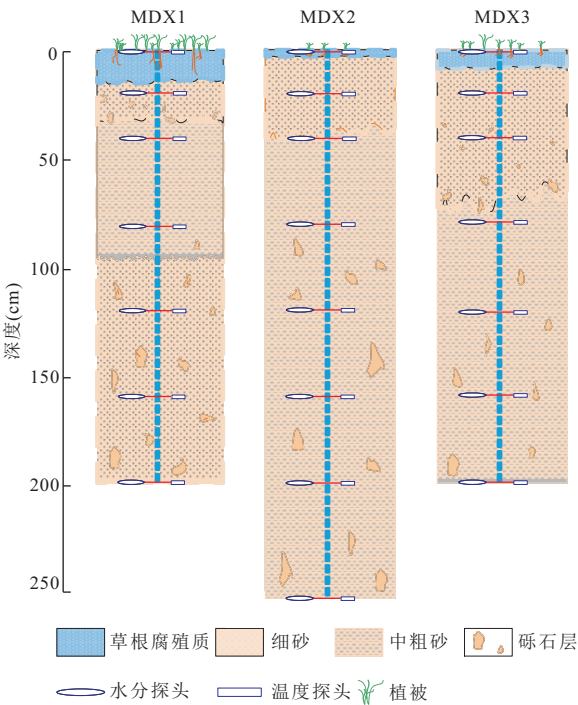


图 3 MDX1、MDX2、MDX3 场地岩性及探头布设

Fig.3 The lithology, temperature and moisture probes of Sites MDX1, MDX2, MDX3

um)、矮嵩草(*K.humilis*)、线叶嵩草(*K.capillifolia*)、高山嵩草(*K.pygmaea*)等,高度 0.5 ~ 18.0 cm.土壤类型以中粗砂为主,有机质含量不高.MDX2 为高寒草原,地上生物量 46.4 g·m⁻²,植被盖度 20%~30%,植被丰富度指数 18,以耐寒中生矮嵩草(*K.humilis*)为优势种,伴生种有蒿(*Artemisia*)、火绒草(*Leontopodium*)、棘豆(*Oxytropis dc.*)、香青(*Anaphalis sinica hance*)等,且出现生长偏暖性的早熟禾(*Gramineae Poa*)和旱生性质的紫花针茅(*Gramineae Stipa*),高度为 0.5~11.0 cm.土壤类型以粉土和粉砂土为主,有机质含量不高.

表 1 黄河源区麻多乡场地植被特征

Table 1 Vegetation characteristics in Maduo sites in the sources areas of the Yellow River

场地编号	优势种	主要伴生种	植被盖度(%)	丰富度	地上生物量(g·m ⁻²)	土壤质地
MDX1	藏嵩草	线叶嵩草、黑穗苔草、矮嵩草、毛茛、龙胆、虎尾草、火绒草、黄芪等	83	13	370.3	中粗砂
MDX2	矮嵩草	早熟禾、小嵩草、苔草、香青、棘豆、龙胆、沙生风毛菊、毛茛等	25	18	46.4	粉土、粉砂
MDX3	小嵩草	矮嵩草、火绒草、芸香叶唐松草、雪白委陵菜、早熟禾、棘豆、苔草、沙生风毛菊、垂头菊等	60	8	94.5	红褐砂粘土和砾石

MDX3 为高寒草原,植被盖度为 60%左右,植被丰富度指数 8,以小嵩草(*K.pygmaea*)为优势种,伴生种有火绒草(*Leontopodium*)、香青(*Anaphalis sinica hance*)、棘豆(*Oxytropis dc.*)、芸香叶唐松草(*Thalictrum*)等,高度为 0.5~7.0 cm.土壤类型为红褐色砂粘土和砾石,因含水量较低、土质紧密,植被盖度与地上生物量有较好的对应关系,当植被盖度较高时,地上生物量也较大(表 1).

1.3 研究方法

本文所指土壤含水量为液态水体积含水量,不包括含冰量.在 Microsoft Excel 中求取各深度土壤温度年平均值和月平均值,土壤含水量月平均值、标准偏差,通过比较不同场地相同深度土壤含水量月平均值标准偏差研究植被盖度对活动层水分变化过程的影响.标准偏差 σ 定义如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad , \quad (1)$$

式中: x_i 是土壤体积含水量日平均值, μ 是土壤体积含水量月平均值.土壤体积含水量变化率 δ 为:

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} \quad . \quad (2)$$

通过等温线最大侵入深度比较不同植被特征对

活动层温度变化过程的影响.等温线最大侵入深度在 Golden Surfer 软件中基于反距离加权平均法(IDW)对土壤温度插值获得.

2 植被特征差异对活动层温度的影响

2.1 地气温差差异

以植被盖度、地上生物量等为主要表征的植被特征差异对地气温差的影响十分复杂:一方面滞留大部分太阳辐射能,极大地减少进入土层、使土壤升温的热量;同时又降低近地表风速、减少表土层向大气的放热强度.植被究竟起保温还是冷却作用,与所在地区、植被类型及盖度等有密切关系(金会军等, 2008). 2011 年 MDX1 地面温度年平均值为 $-0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$,日均温变幅 $-11.5\sim 10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年较差 $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;MDX2 地面温度年平均值为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$,日均温变幅 $-12.0\sim 15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年较差 $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;MDX3 地面温度年均 $-0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$,日均温变幅 $-13.1\sim 13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年较差 $26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 4a).MDX2 地面年均温远高于 MDX1 和 MDX3,这可能与其植被盖度低有关,植被盖度低时对太阳辐射能滞留少,对近地表风速降低作用也弱,减少了表土层水分蒸发及向大气放热

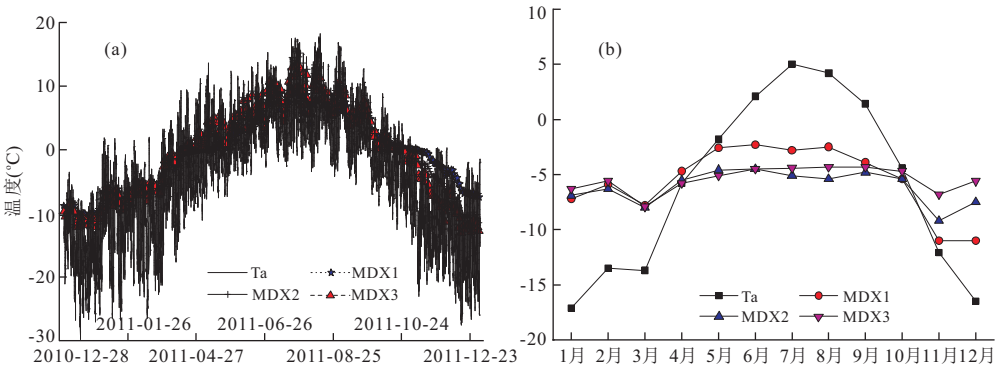


图 4 MDX1、MDX2、MDX3 场地的气温 (T_a) 和地面温度 (5 cm) 在 2010—2011 年的逐日变化(a)和在 2011 年的逐月变化(b)
Fig.4 Daily changes in 2010—2011(a) and monthly changes in 2011 (b) of air temperature and ground surface temperature (5 cm) at sites MDX1, MDX2 and MDX3

强度,从而进入土层的热量就较多.也与其疏松的土壤质地相关,疏松的土壤保温效果相对较差,土层向大气的散热强度高于致密土壤.比较麻多乡地气温差发现:地面月均温比月均气温均高 2.0℃以上,各月差值暖季较小,冷季较大(图 4b).冬季(12 月~次年 2 月)地气温差以 MDX1 最大,MDX2 次之,MDX3 最小,比如 MDX1 在 11 月、12 月地气温差达 11℃,而 MDX2 为 -9.2 和 -7.5℃,MDX3 为 -6.8 和 -5.6℃;就夏季(6~8 月)而言,MDX1 地气温差最小,差值仅有 2~3℃,而 MDX3 和 MDX2 地气温差大于 4℃.3 个场地地面温度以植被盖度最高的 MDX1 冷季最高、暖季最低,这意味着较高的植被盖度通过蒸发、散发和蒸腾作用、大气和土壤间的水分交换作用影响了场地空气和土壤的热量平衡(吴青柏等,2003),冷季因削弱直接太阳辐射对地表起到一定保温作用而增加了地气温差,在暖季减小太阳有效辐射使土壤冷却从而减小了地气温差.

2.2 活动层温度-深度差异

图 5 显示了 MDX1、MDX2 和 MDX3 不同深度土壤年平均温度,由图不难判断,3 个场地活动层 200 cm 深度以上相同深度土壤年平均温度具有如下关系:MDX1<MDX3<MDX2.表明在其他地理因素和局地条件相似背景下,植被盖度与活动层温度总体而言具有负相关关系:植被盖度越高,活动层温度就越低.但随着深度加深,不同场地活动层的温

度差异减小,如 MDX1 和 MDX3 场地,在 200 cm 深度的年平均温度都是一 0.5℃左右.而植被盖度低、土壤质地疏松的 MDX2 场地,随着深度加深,土壤年平均温度由地面 5 cm 的 +0.1℃降低到 250 cm 深处的一 0.4℃.这表明植被特征差异对活动层温度的复杂影响主要在中上部,而在活动层底部及其下部,随着地表一大气能量交换及地中热流等各种热交换过程实现的能量平衡,中上部温度差异较大的活动层底部温度渐趋一致.活动层土壤年平均温度的纵深分布表明(图 5),麻多乡场地存在较明显的负温度位移,即活动层底板年平均温度低于地表年平均温度,而底板以下的年平均温度又随深度增加而升高,导致温度-深度廓线上最低温出现于底板附近.这种温度位移由融土和冻土之间导热系数差异引起(Burn and Smith,1982),使得年平均地面温度为正的岛状多年冻土边缘也可能存在多年冻土(程国栋,2003),并且,温度位移具有这样的特征:活动层越厚,地面融化指数越大,温度位移值越大(Romanovsky and Osterkamp,1995).麻多乡场地活动层厚度估计大于 2.5 m,3 个场地温度位移绝对值大小具有如下关系:MDX2>MDX3>MDX1,这与其植被盖度高低具有负相关关系,即植被盖度高,温度位移绝对值反而小.较高植被盖度的场地对太阳辐射能的截留和反射作用强,并且叶片在蒸腾过程中对蒸发潜热的吸收作用强,导致进入浅表层中的土壤热量少,使得植被盖度较高的浅表层土壤温度相对较低,因而其温度位移值偏小.

2.3 活动层冻融过程差异

在其他因素相似背景下,不同植被条件对活动层冻融过程差异的影响明显,主要影响其起始融化和起始冻结时间,以及冻结持续时间(刘光生等,2009).图 6 显示了麻多乡 3 个场地活动层冻融过程及其温度变化.各场地开始融化时间:MDX1 为 5 月中旬,MDX2 为 4 月中下旬,MDX3 为 4 月上中旬;开始冻结时间:MDX1 为 10 月中下旬,MDX2 为 10 月初,MDX3 为 9 月末 10 月初.可见随着植被盖度增加,麻多乡 3 个场地起始融化时间滞后 10~20 天左右,而起始冻结时间也相应滞后,这可能是由融冻过程转换初期较高植被盖度对地-气间热量交换和变化程度起到一定缓冲作用,减小了植被附着根系的急剧降温所致.

各场地因植被特征差异导致融化完成和冻结完成时间差异也很明显.活动层底部 200 cm 深度融化完成时间分别为:MDX1 为 8 月中旬左右,MDX2

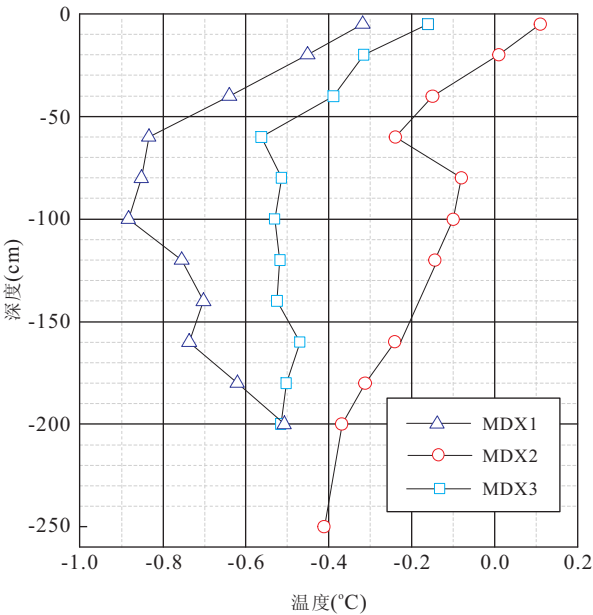


图 5 MDX1、MDX2、MDX3 活动层年平均温度沿深度分布
Fig. 5 Ground temperature profiles of active layer in MDX1, MDX2 and MDX3

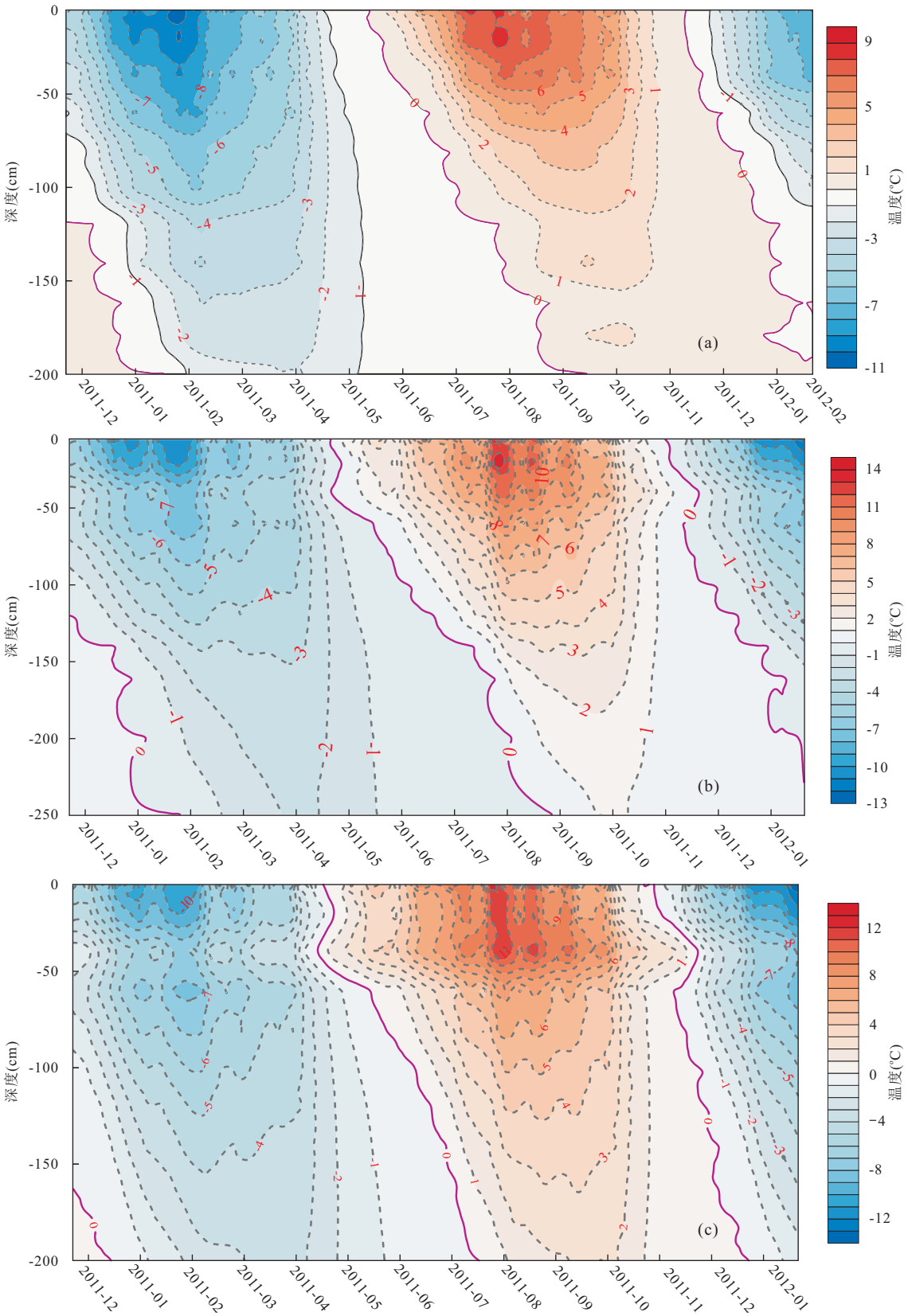


图 6 不同植被盖度下活动层冻融过程

Fig.6 Freezing/thawing processes under different vegetation conditions
a.MDX1; b.MDX2; c.MDX3

为8月上旬,MDX3为7月中下旬;200 cm的冻结完成时间:MDX1为1月中旬,MDX2为12月底1月初,MDX3为12月中旬.而MDX2活动层250 cm融化完成和冻结完成时间分别为8月末和1月中下旬.

2.4 等温线最大侵入深度差异

等温线最大侵入深度是指该温度在活动层中存在的最大深度,反映了土壤热量状况(胡宏昌等,2009).由于麻多乡活动层厚度较大而地下水位相对较高,在布置活动层时未能揭穿活动层厚度,因此不能判断0℃等温线最大侵入深度.本文通过判断±1、±3、±5℃的等温线最大侵入深度比较3个场地活动层土壤温度差异(图6).MDX1的+1℃等温线最大侵入深度为150 cm左右,MDX2超过250 cm,约为260 cm,而MDX3也超过200 cm.对于+3℃等温线最大侵入深度,MDX1、MDX2和MDX3分别为75、150、155 cm;+5℃等温线最大侵入深度,MDX1约为60 cm,而MDX2和MDX3约为100 cm.对于负温等值线而言,各场地-1℃等温线最大侵入深度均超过200 cm;MDX1的-3℃等温线最大侵入深度约为160 cm,而MDX2和MDX3分别约为150和200 cm;MDX1的-5℃等温线最大侵入深度与其+2℃等温线的侵入深度基本相当,约为105 cm,而MDX2和MDX3约为100 cm和125 cm,差距不是很明显.以上表明,MDX1正温等值线侵入深度最浅,而MDX2和MDX3基本相当;MDX1负温等值线最大侵入深度小于MDX3但大于MDX2;同一场地绝对值相同的正负温等值线最大侵入深度差异以MDX1最大,且其正温等值线比相应负温等值线最大侵入深度要小得多,而MDX2和MDX3差距并不大,这表明MDX1土壤热量平衡可能为较大负值,这有利于保护多年冻土或延缓其退化,且在较高土壤含水量的基础上有利于地下冰的形成和维持.植被盖度可能是造成这种显著差异的主要因素:相同地理气候条件下,植被盖度越高,正温等温线最大侵入深度就越浅,而负温等温线侵入深度差异并不明显;岩性和含水量条件综合影响土壤热量和地温分布的垂直差异.

3 活动层土壤水分变化分析

植被特征差异和岩性条件对活动层土壤体积分水量的时空分布和变化影响明显,各场地土壤体积分含水量都是暖季较高、冷季较低.MDX1在3个场地

中土壤体积分含水量最高,且其高值出现于近地表层40 cm的7~10月(图7a),这对应于黄河源区气温较高、降水量较丰沛的暖季;MDX2土壤体积分含水量值相对较低,其高值出现于暖季,分布在活动层中下部的200 cm(图7b);MDX3土壤体积分含水量值介于上述2个场地之间,但其高值出现于活动层中部160 cm,且随着暖季到来发生较多的水分迁移,导致体积分含水量高值区不断下移,如6、7、8月活动层土壤体积分含水量高值分别出现于80 cm、120 cm、160 cm(图7c).

对各场地土壤水分各月变化值比较分析,发现活动层中土壤水分冷季变化较少,而暖季变化很大,处于冷暖季交替和冻融转换的季节,其变化率最大(图7).如MDX1的40 cm深度1~3月体积分水分含量(下简称土壤水分)标准偏差仅分别为0.03、0.04、0.04,其变化率不超过3%,5月变化率为18.2%,而6~9月变化率均超过30%;80 cm土壤水分变化率5月前低于6%,但6月增加到45.5%;120 cm深度1~5月水分变化率均低于3%,6月为7.2%,7月增加到46.7%;而160 cm土壤水分变化率直到8月前都低于5%,8月增加到29.2%.MDX2的40 cm深度在1~3月水分变化率低于2.5%,6月变化率最高为15.0%,此后又趋于稳定,7~10月变化率均低于5.0%,而11月变化率增大到18.2%;80 cm土壤水分含量变化率在1~3月不超过3%,4月为8.5%,5月为57.1%;而120 cm土壤水分变化率在5月及之前均低于5%;160 cm土壤水分变化率从5月前低于3%到6、7、8月分别增加至10.2%、17.1%、43.3%.MDX3的40 cm土壤水分变化率1~3月低于2.1%,5、7月变化率较高,分别为14.0%和17.8%;80 cm土壤水分变化率在5月为109.2%,为3个场地活动层中变化率的最大值;120 cm土壤水分变化率在5月也较大,为80.7%,6月变化率为61.4%,而1~4月变化率均小于4.2%;160 cm土壤水分变化率1~4月均低于3.6%,而5月为30.4%,8月最高为53.7%.MDX1和MDX3的200 cm土壤水分变化率1月分别为41.1%和29.3%,均远远超过同一场地相同时间其他深度土壤水分变化率,这意味着伴随土壤温度降到冻结温度以下,冻结过程已进行到这一深度,液态水转换为固态冰而造成土壤体积分含水量下降明显.MDX2的200 cm土壤水分变化率在11、12月较大,分别为24.2%和19.5%,意味着其土壤水分剧烈变化早于其他两个场地,即冻结过程早于其他两个场地.上述

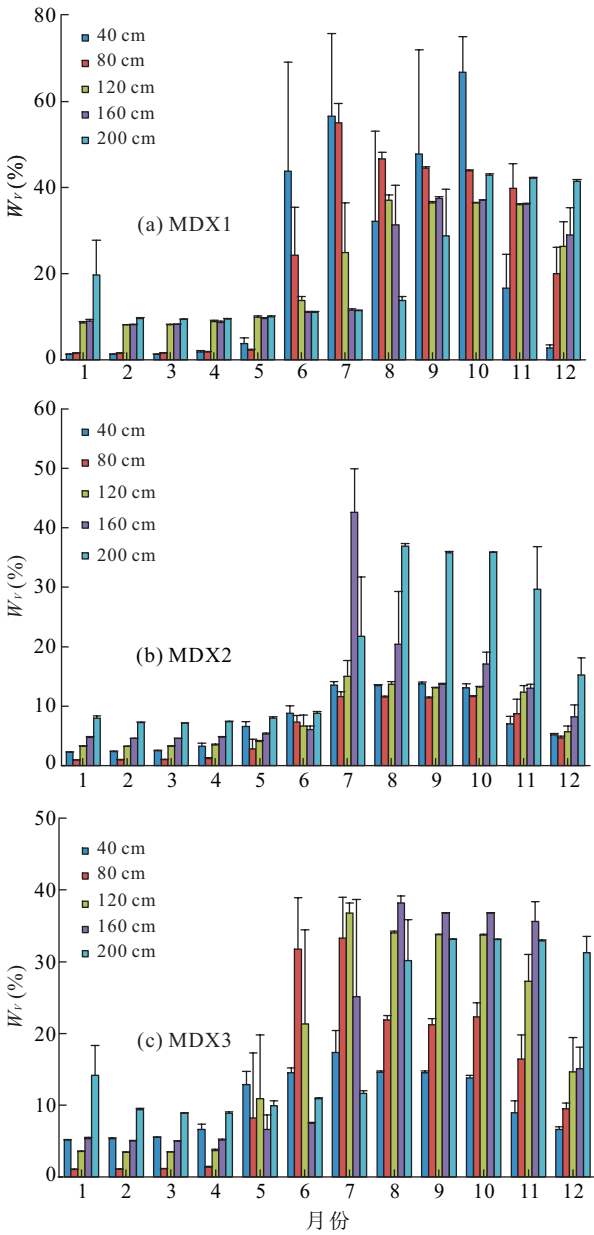


图 7 黄河源区麻多乡活动层土壤体积水百分含量及其变化
Fig.7 Soil volumetric water content of the active layer in
Maduo town in the sources areas of the Yellow River

分析表明,土壤水分变化率值以 MDX1 的 40 cm 最大,而 MDX2 和 MDX3 在 80 cm 最大,3 个场地土壤水分变化率在活动层中下部较小,且各深度变化率较大值出现时间会伴随冻融锋面的迁移即冻融过程的进行而相应滞后;活动层处于冻结状态时的土壤水分变化率较小,通常低于 5%;在冻结和融化状态发生转换时,活动层土壤水分骤然变化,这是由于冻结或融化过程的进行及冰水相变造成了土壤水的固液状态转变,加之暖季降水较多造成下渗,导致活动层中土壤水分含量变化显著.MDX2 活动层下部

土壤水分剧烈变化且早于其他场地,与其土壤颗粒较粗、持水性差而导水性强相关,这也可能进一步导致了活动层中较高的土壤温度.

4 结论

本文基于青藏高原东北部黄河源区麻多乡岛状多年冻土活动层场地的监测数据,分析了植被特征差异对活动层水热过程及其温度和水分变化的深刻影响,得到以下结论:

(1) 植被盖度越高,冷季地气温差就越大,相反暖季地气温差却较小;同时,不同深度土壤年平均温度也较低.对于植被盖度较高的 MDX1 场地,暖季地气温差仅为 2~3℃,而冷季地气温差达到了-10℃以上.随着深度加深,植被特征差异导致活动层中上部较大的年平均温度差异在活动层底部附近渐趋于一致.

(2) 麻多乡场地存在负的温度位移,即场地地表年平均温度低于活动层底部年平均温度,并且,植被盖度与温度位移绝对值存在一定负相关关系.

(3) 植被盖度越高,融化开始、融化完成、冻结开始和冻结完成时间就越晚.

(4) 植被盖度越高,活动层内体积含水量就越高,并且含水量高值区也由活动层上部向底部转移.活动层水分在冷季变化率较小,暖季变化率较大,而冻融转换过程的水分变化率最大.

致谢:在野外调查工作中,得到林琳的大力支持和热心帮助,在此深表感谢.衷心感谢审稿人提出的宝贵修改意见.

References

Burn,C.R.,Smith,C.A.S.,1988.Observations of the Thermal Offset in Near-Surface Mean Annual Ground Temperatures at Several Sites near Mayo Yukon Territory,Canada.*Arctic*,41(2):99-104.

Chen,S.Y.,Zhao,L.,Qin,D.H.,et al.,2010.A Preliminary Study of the Relationships between Alpine Grassland Biomass and Environmental Factors in the Permafrost Regions of the Tibetan Plateau.*Journal of Glaciology and Geocryology*,32(2):405-413 (in Chinese with English abstract).

Cheng,G.D.,2003.Influences of Local Factors on Permafrost Occurrence and Their Implications for Qinghai-Xizang Railway Design.*Science in China (Series D)*,33(6):602-607 (in Chinese).

- Hao, Z. C., Li, L., Wang, J. H., et al., 2007. Impact of Climate Change on Surface Water Resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 425—432 (in Chinese with English abstract).
- Hu, H. C., Wang, G. X., Wang, Y. B., et al., 2009. 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*, 54(2): 242—250 (in Chinese).
- Jin, H. J., Sun, L. P., Wang, S. L., et al., 2008. Dual Influences of Local Environmental Variables on Ground Temperatures on the Interior-Eastern Qinghai-Tibet Plateau (I): Vegetation and Snow Cover. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(4): 535—545 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. S., Wang, G. X., Zhao, L., et al., 2010. Response of Soil Moisture in the Permafrost Active Layer to the Change of Alpine Meadow Coverage on the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(1): 157—165 (in Chinese with English abstract).
- Liang, S. H., Wan, L., Li, Z. M., et al., 2007. The Effect of Permafrost on Alpine Vegetation in the Source Regions of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(1): 45—52 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. S., Wang, G. X., Hu, H. C., et al., 2009. 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*, 31(1): 89—95 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Z. J., Wu, Q. B., Sheng, Y., et al., 2006. Heat and Water Difference of Active Layers beneath Different Surface Conditions near Beiluhe in Qinghai-Xizang Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(5): 642—647 (in Chinese with English abstract).
- Luo, D. L., Jin, H. J., Lin, L., et al., 2012. New Progress on Permafrost Temperature and Thickness in the Source Area of the Huanghe River. *Scientia Geographica Sinica*, 32(7): 898—904 (in Chinese with English abstract).
- Luo, D. L., Jin, H. J., Lin, L., et al., 2013. Distributive Features and Controlling Factors of Permafrost and the Active Layer Thickness in the Bayan Har Mountains along the Qinghai-Kangding Highway on Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 33(5): 635—640 (in Chinese with English abstract).
- Mu, C. C., Zhang, T. J., Cao, B., et al., 2013. Study of the Organic Carbon Storage in the Active Layer of Permafrost over the Eboing Mountain in the Upper Reaches of the Heihe River in the Eastern Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Romanovsky, V. E., Osterkamp, T. E., 1995. Interannual Variations of the Thermal Regime of the Active Layer and Near-Surface Permafrost in Northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6(4): 313—335. doi: 10.1002/ppp.3430060404
- Wang, G. X., Li, Y. S., Wu, Q. B., et al., 2006. Impacts of Permafrost Changes on Alpine Ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 36(8): 743—754 (in Chinese).
- Wang, G. X., Liu, L. A., Liu, G. S., et al., 2010. Impacts of Grassland Vegetation Cover on the Active-Layer Thermal Regime, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(4): 335—344. doi: 10.1002/ppp.699
- Wang, Z. R., Yang, G. J., He, X. B., et al., 2012. Response of Distribution Patterns of Plant Species Diversity and Biomass to Permafrost Changes. *Acta Prataculturae Sinica*, 21(1): 10—17 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q. B., Shen, Y. P., Shi, B., 2003. Relationship between Frozen Soil together with Its Water-Heat Process and Ecological Environment in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(3): 250—255 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Zhang, Z. F., Long, F., et al., 2013. Mapping Buried Faults Using the Temperature-Vegetation-Dryness Index with an Application in Yangla Copper Mining Area, Yunnan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 423—430 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Wang, G. X., Li, X., et al., 2008. Energy-Water Balance of Meadow Ecosystem in Cold Frozen Soil Areas. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(3): 398—407 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈生云, 赵林, 秦大河, 等, 2010. 青藏高原多年冻土区高寒草地生物量与环境因子关系的初步分析. 冰川冻土, 32(2): 405—413.
- 程国栋, 2003. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示. 中国科学(D辑), 33(6): 602—607.
- 郝振纯, 李丽, 王加虎, 等, 2007. 气候变化对地表水资源的影响. 地球科学——中国地质大学学报, 32(3): 425—432.
- 胡宏昌, 王根绪, 王一博, 等, 2009. 江河源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, 54(2): 242—250.

金会军,孙立平,王绍令,等,2008.青藏高原中、东部局地因素对地温的双重影响 (I):植被和雪盖.冰川冻土,30(4):535—545.

李元寿,王根绪,赵林,等,2010.青藏高原多年冻土活动层土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应.冰川冻土,32(1):157—165.

梁四海,万力,李志明,等,2007.黄河源区冻土对植被的影响.冰川冻土,29(1):45—52.

刘光生,王根绪,胡宏昌,等,2009.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,31(1):89—95.

陆子建,吴青柏,盛煜,等,2006.青藏高原北麓河附近不同地表覆被下活动层的水热差异研究.冰川冻土,28(5):642—647.

罗栋梁,金会军,林琳,等,2012.黄河源区多年冻土温度及厚度研究新进展.地理科学,32(7):898—904.

罗栋梁,金会军,林琳,等,2013.巴颜喀拉山青康公路沿线多年冻土和活动层分布特征及影响因素.地理科学,33(5):635—640.

牟翠翠,张廷军,曹斌,等,2013.祁连山区黑河上游俄博岭多年冻土区活动层碳储量研究.冰川冻土,35(1):1—9.

王根绪,李元首,吴青柏,等,2006.青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响.中国科学(D辑),36(8):743—754.

王增如,杨国靖,何晓波,等,2012.物种多样性和生物量分布规律对冻土活动层埋深变化的响应.草业学报,21(1):10—17.

吴青柏,沈永平,施斌,2003.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,25(3):250—255.

周丹,张振飞,龙斐,等,2013.用温度植被干旱指数(TVDI)识别隐伏断层:以云南羊拉铜矿区为例.地球科学——中国地质大学学报,38(2):423—430.

周剑,王根绪,李新,等,2008.高寒冻土地区草甸草地生态系统的能量—水分平衡分析.冰川冻土,30(3):398—407.