

青海湖芨芨草干草原浅层土壤温度和导温率的基本特征*

张法伟¹ 郭竹筠² 林 丽¹ 李以康¹ 曹广民^{1**} 陈桂琛¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2. 河南省义马市实验中学, 三门峡 472300)

摘要:通过解析芨芨草(*Achnatherum splendens*)干草原原生植被生长季中期5、10、20、40、60和80cm 6个土层连续监测的土壤温度资料,探讨其生长季土壤温度和土壤导温率的基本特征。结果表明:芨芨草干草原表层(<20cm)土壤温度日变化明显,遵循正弦波动规律;20-40cm为正弦波动和线性振荡的过渡层,40cm以下无显著日变化。土壤温度日变化振幅(A)和相位(φ)随土壤深度(z)增加分别呈现几何级数衰减($A=4.60e^{-6.74z}$, $R^2=0.93$)和线性延迟($\varphi=6.14z+7.67$, $R^2=0.95$)模式;表层土壤温度对脉冲式降水表现为渐变式响应并出现同温层;典型晴天下土壤导温率(κ)随土壤深度增加而指数升高($\kappa=2 \times 10^{-7}e^{4.21z}$, $R^2=0.92$)。34.7cm土层的土壤温度日变化与5.0cm反相,而土壤温度日变化恒温层为86.0-102.0cm土层。

关键词:土壤温度振幅;谐波法;振幅法;相位法

中图分类号:S161.2 文献标识码:A

Soil Shallow Layer Temperature and Thermal Diffusivity of *Achnatherum splendens* Arid Grassland around Qinghai Lake Area

ZHANG FA-wei¹, GUO Zhu-jun², LIN Li¹, LI Yi-kang¹, CAO Guang-min¹, CHEN Gui-chen¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 810001, China; 2. Yima Experimental Middle School, Sanmenxia 472300)

Abstract: Based on soil surface temperature of six soil layers at depth of 5cm, 10cm, 20cm, 40cm, 60cm and 80cm from June 15 to July 14 in 2010, the variation of soil shallow layer temperature and soil thermal diffusivity was studied. The results showed that there were an obvious sinusoidal diurnal variations of soil temperature from top layers (<20cm), buffer layer (20-40cm) for sinusoidal fluctuation and linear oscillation while undetectable diurnal changes below 40cm soil layers. The amplitude (A) and phase (φ) of diurnal soil temperature variations declined exponentially ($A=4.60e^{-6.74z}$, $R^2=0.93$) and linearly ($\varphi=6.14z+7.67$, $R^2=0.95$) with the soil depth (z) increased, respectively. The response to pulse precipitation of soil temperature at top layers changed gradually, and resulted in the same thermal soil layers. Soil thermal diffusivity (κ) was enhanced exponentially ($\kappa=2 \times 10^{-7}e^{4.21z}$, $R^2=0.92$) with soil depth enhancement. There were totally opposite diurnal fluctuations between 34.7cm and 5.0cm. The depth of diurnal constant temperature strata was about 86.0-102.0cm.

Key words: Soil temperature amplitude; Sinusoidal analytical method; Amplitude method; Phase method

青海湖面积约 $2.96 \times 10^4 \text{ km}^2$, 不仅维系着青藏高原东北部和国家生态安全, 而且作为天然的生态屏障控制着西部荒漠的东蔓延, 具有重要的生态地位和社会价值^[1]。芨芨草(*Achnatherum splendens*)干草原是环湖地区温性草原的代表群落, 多分布于海拔2900-3400m的开阔平坦的湖积平原、河谷阶地

和山前缓坡, 约占环湖区域面积的1/3^[2]。其不但是环湖地区重要的草业和畜牧业基地, 且由于其生物学特性使其在防风固沙、水土保持、生物多样性保护等方面作用显著^[3]。近年来, 在气候变化和过度放牧的双重压力下, 芨芨草草原急剧退化, 系统稳定性破坏严重。

* 收稿日期: 2011-08-08 ** 通讯作者。E-mail: caogm@nwipb.cas.cn

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAC30B04)

作者简介: 张法伟(1981-) 河南义马人, 硕士, 工程师, 主要从事高寒地区物质和能量交换过程研究。

E-mail: flingzhang@gmail.com

浅层土壤温度梯度表征了土壤内热量传输的方向和强度^[4],是地气耦合过程的能量纽带^[5],影响土壤蓄水保墒能力和地气耗散结构^[6],甚至大气环流模式^[7],而且对系统碳源/汇功能^[8]、植被的退化恢复和生态系统稳定性等有较大影响^[9]。土壤导温率(κ , m^2/s)指单位体积土壤吸收(释放)的热量所引起温度变化的速率,是土壤热力学特征的重要指标,是模拟土壤和生态系统能量平衡的关键参数^[10-11],但实践中难以直接测定,多采用间接方法(如振幅法、相位法、谐波法和数值法)计算而得^[7,12-14]。青藏高原表层土壤温度的日变化显著,温度振幅垂直传递深度约为 40.0cm ^[15];土壤导温率等热力学特征存在明显的季节变异^[16],对土壤湿度也具有相当的依赖性^[17],而且随土壤深度增加而增大^[15]。本研究通过解析芨芨草干草原植被生长季浅层土壤温度及导温率的基本特征,为区域尺度水热模型提供关键参数,进而为维持芨芨草草原生态系统的稳定性和农牧业可持续发展提供一定依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验区($37^{\circ}15'N$, $100^{\circ}20'E$, 海拔 3260m)位于青海湖北岸三角城种羊场地区的典型芨芨草原生封育草原(20世纪80年代开始封育)。该区是典型的高原大陆性气候,干旱少雨,年均气温和降水量分别为 -0.6°C 和 370.3mm ,降水比较集中而且雨热同季, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 $1299^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,年蒸发量为 607.4mm ,最大冻土深度为 2.88m 。土壤为栗钙土,土壤容重和 pH 值分别为 $1.21\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 9.08 。土壤粘粒含量 $34.8\% \sim 45.3\%$,浅层土壤田间持水量 $29.7\% \sim 32.0\%$ ^[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

芨芨草多为集群分布^[19],因此选择芨芨草单种盖度大于 80% 、植株高度大于 1m 、生长良好的区域作为原生草地试验区。土壤温度由 HOBO Weather Station(Onset Computer Corporation, USA)分 6 层监测,深度依次为 5 、 10 、 20 、 40 、 60 和 80cm 。土壤温度探头为 $12\text{-Bit Temperature Smart Sensor}$ (S-TMB-M002, USA)。工作站采样频率为 1min ,并自动计算、存储各层 30min 的平均值。本文选取 2010 年 6 月 15 日-7 月 14 日的数据集,分析芨芨草草原生长季的浅层土壤温度和导温率特征。利用 Soil Moisture Smart Sensor(S-SMA-M005, USA)自动观测研究时段内各土层平均土壤体积含水量 5 、 10 、 20 、 40 、 60 和 80cm 土层分别为 0.32 、 0.33 、 0.26 、 0.22 、 0.25 和 $0.22\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.2.2 土壤导温率计算方法

假设土壤仅有垂直方向的热传导,一维均值土壤的热传导方程为^[13]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中, T 为土壤温度(K), t 为时间(s), κ 为土壤导温率($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), z 为土层深度(m)。假设土壤深度足够深而且土壤温度变化特征符合正弦波动规律^[7],则式(1)的解析解为

$$T_{(z_2,t)} = \bar{T}_{(z_2)} + A_{(z_1)} \exp^{-(z_2-z_1)\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}} \times \sin(\omega t - \phi_1 - (z_2-z_1)\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}) \quad (2)$$

式中, $\bar{T}_{(z_2)}$ 为深度 Z_2 (m) 处的平均温度(K); ω 为地球自转角频率($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$); A_{z_1} 为深度 Z_1 (m) 处, $\frac{2\pi}{\omega}$ (s) 周期内的温度振幅($\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$, K); $A_{z_1} \exp^{-(z_2-z_1)\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}}$

是土壤深度 Z_2 处的温度振幅(K); $\phi_1 + (z_2-z_1)\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}$ 为土壤深度为 Z_2 处的温度相位。利用 Z_1 和 Z_2 处的温度资料,采用最小二乘法求出土层 Z_1 到 Z_2 之间的平均土壤导温率(κ)。此即为谐波法。

同时采用振幅法式(3)和相位法式(4)计算相应的土壤导温率,即

$$\kappa_a = \frac{\pi}{\omega} \left(\frac{z_2 - z_1}{\ln A_1 - \ln A_2} \right)^2 \quad (3)$$

$$\kappa_p = \frac{\pi}{\omega} \left(\frac{z_2 - z_1}{\varphi_{z_1} - \varphi_{z_2}} \right)^2 \quad (4)$$

式中, φ_z 为深度 Z (m) 处土壤温度的波动相位,由温度(T)和时间(t)的正弦函数 $T_z = \bar{T}_z + A_z \sin(\omega t - \varphi_z)$ 采用最小二乘法拟合所得^[12],式中其它参数意义同式(2)。本文通过比较 3 种方法的计算精度,寻找适合芨芨草干草原的土壤导温率计算方法。

2 结果与分析

2.1 浅层土壤温度的平均日变化特征

为了减少突变天气的影响,将 2010 年 6 月 15 日-7 月 14 日的土壤温度按照北京时间进行平均,以解析土壤温度的日变化特征(图 1)。由图 1 可见,表层($< 20\text{cm}$)土壤温度日变化规律明显,表现为典型的准正弦波动;深层($> 40\text{cm}$)土壤温度日变化较为平稳,接近线性振荡;而 $20-40\text{cm}$ 土层作为正弦波动和线性振荡的过渡层。表层土壤温度的正弦波动与太阳辐射的日变化一致,说明表层土壤温度的日变化主要受太阳辐射日变化的影响。同时由图 1 可知, $10-$

40cm 土层在 12:00 左右出现短暂的同温层,即该层土壤在垂直方向上的温度梯度(dT/dz)几乎为 0,不存在垂直方向的热量传递。在 6:00,5-20cm 的 $dT/dz < 0$,而 20-40cm 的 $dT/dz > 0$,即 20cm 土壤的热量最大。随着太阳高度角的增大,地表获得太阳短波辐射大于地面的长波辐射,这种净辐射能使地表温度开始升高,5-20cm 的 dT/dz 逐渐变大,热量向上传递强度减弱,但由于位相滞后,20cm 土壤自上节余热量不足以抵消向下的热量传递,20-40cm 的 dT/dz 缓慢变小。5-10cm 的 dT/dz 约在 11:00 由负转为正($dT/dz > 0$),即热量开始向下传递。当 10-20cm 的 dT/dz 和 20-40cm 的 dT/dz 均趋于 0 时,同温层出现。但此时太阳高度角接近最大,总辐射能量较强,地表垂向热量传递迅速,致使同温层持续时间较短。

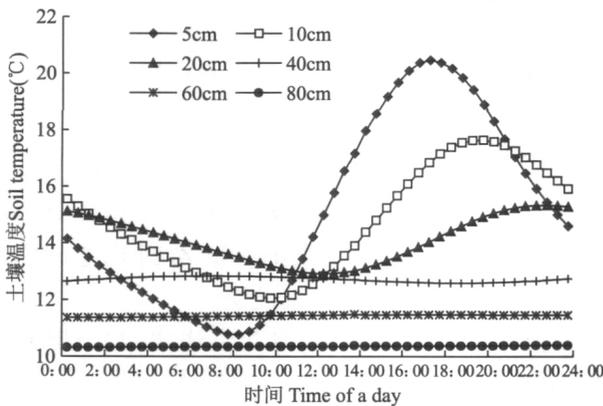


图 1 芨芨草干草原浅层土壤温度的平均日变化

Fig. 1 Average diurnal change of soil surface temperature at different soil depth in *Achnatherum splendens* arid grassland

依据温度振幅 $[(T_{max} - T_{min}) / 2]$ 计算可知,5、10、20、40、60 和 80cm 处土壤温度日变化振幅分别为 4.8、2.8、1.2、0.1、0.06 和 0.04°C,由于土壤温度的日振幅(A)主要受控于太阳辐射,随土壤深度(z)增加呈现出阻尼振荡趋势,符合指数衰减模式($A = 4.60e^{-6.74z}$, $R^2 = 0.93$)。芨芨草草原浅层土壤温度日振幅的衰减模式表明太阳辐射的影响强度随土壤深度算术级数增加而呈几何级数降低。各层土壤温度的最大值出现时间分别为 17:00、19:30、22:30、7:00、13:30 和 23:30,如果以该时间为土壤温度波动的相位(φ)则芨芨草草原土壤温度的位相变化吻合线性延迟模式($\varphi = 6.14z + 7.67$, $R^2 = 0.95$)。

2.2 浅层土壤温度的逐日变化特征

由图 2a 可知,芨芨草草原生长季表层(<20cm)土壤温度逐日均值波动剧烈,这是因为它受太阳辐射和降水的强烈影响;而深层土壤温度由于表层的缓冲

作用,其日均值曲线趋向平稳。5、10 和 20cm 土壤温度分别为 15.0 ± 0.34 (平均值 \pm 标准误)、 14.7 ± 0.29 和 14.1 ± 0.25 °C;40、60 和 80cm 的土壤温度分别为 12.7 ± 0.18 、 11.4 ± 0.16 和 10.4 ± 0.15 °C,土壤温度变化的标准误也表明了表层土壤逐日温度波动较大。而各层的温度逐日振幅分别为 4.2、3.6、2.8、2.0、1.4 和 1.3°C,和土壤深度的关系也符合指数衰减模式($A = 4.15e^{-1.62z}$, $R^2 = 0.97$),其衰减强度低于日变化的强度且相关程度(R^2)较高,表明浅层土壤温度在短时间分辨率(小于天的时间尺度)波动的受控因素较多,而较长时间分辨率(大于月的时间尺度)的振荡则由于土壤缓冲和滤波作用表现简单。

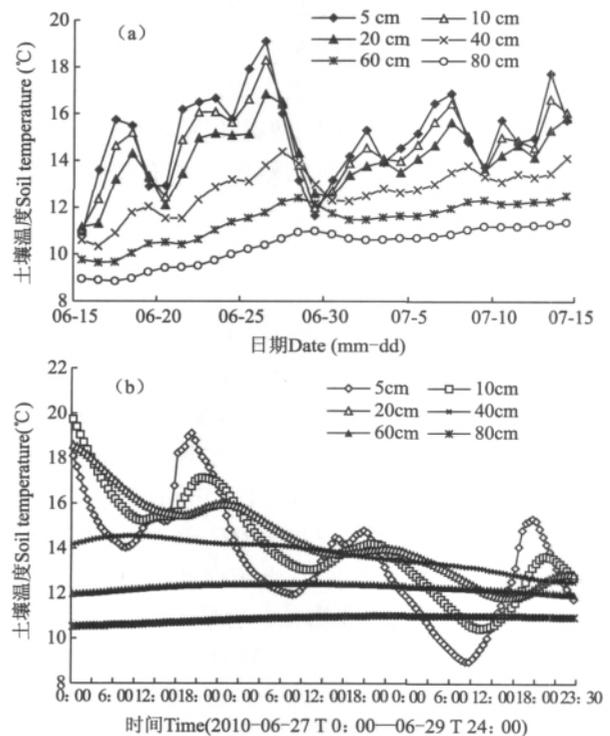


图 2 芨芨草草原生长季土壤温度的逐日变化特征 (a) 和对脉冲式降水的响应 (b)

Fig. 2 Mean daily variations of soil temperature at different layers (a) and its response to pulse precipitation (b) in *Achnatherum splendens* arid grassland

由图 2b 可知,不同深度的土壤温度对脉冲式降水的响应存在较大差异。以 6 月 27 日 0:00-29 日 23:30 的变化为例,研究区域出现大约 18.0mm 的降雨,浅层土壤温度呈现一个近似渐变过程的响应,表现为表层土壤温度迅速降低,5、10 和 20cm 土壤温度分别降低 28.8%、22.9% 和 14.2%。由于表层土壤对降水等扰动的过滤和深层土壤响应的滞后,以降雨过程中的深层土壤逐日温度最大值作为降雨前温度,

以后 3d 作为降雨的响应过程, 40、60 和 80cm 土壤温度分别降低了 9.3%、4.9% 和 2.5%。降雨过程中, 5.0、10.0 和 20.0cm 土壤垂直温度梯度缩小并趋于 0, 几近出现等温层。这主要是由于 (1) 降水过程降低了地气温差, 地气之间感热和显热能量传输均减小, 即土壤向大气的能量输出减弱; (2) 降水增加了土壤含水量, 改变了浅层土壤的热力学特征并使之趋同, 增加了土壤垂直方向上的能量交换强度。而降雨过后, 地气之间的显热和潜热能量交换增强, 土壤温度的垂直梯度开始增高并经过 1~2d 恢复至降水前的状态 (图 2a), 相比矮高草草甸 3~5d 的时间进程^[8], 暗示芨芨草干草原土壤湿度变化迅速, 系统持水能力较弱。

2.3 土壤导温率的基本特征

由于浅层土壤温度受太阳辐射、天空云量和地表覆盖等因素的影响较大, 加之高原气候多变致使土壤温度的波动并非严格遵循正弦变化。因此选择天气变化较为稳定的 6 月 26 日来探讨典型晴天下土壤导温率的基本特征。3 种方法的计算结果见表 1。由于 40cm 及以下土壤温度的日变化规律正弦函数模拟的效果不显著 (图 1), 因此谐波法和相位法无计算结果。通过利用计算得到的导温率对 5.0cm 土壤温度的模拟, 振幅法和相位法的模拟效果分别为 0.87 和 0.86, 而谐波法模拟效果为 0.88 ($P < 0.01$), 只是略高于前两种计算方法, 表明芨芨草草原典型晴天的土壤导温率可用计算较为简单的振幅法进行获取。

表 1 芨芨草干草原典型晴天不同深度的土壤导温率

Table 1 Soil thermal diffusivity of different strata over clear day in *Achnatherum splendens* arid grassland

深度 Soil depth (cm)	土壤导温率 Soil thermal diffusivity ($10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)		
	谐波法 Sinusoidal method	振幅法 Amplitude method	相位法 Phase method
5-10	1.93	2.46	2.24
10-20	4.47	5.21	7.57
20-40	-	5.63	-
40-60	-	31.08	-
60-80	-	45.18	-

注 “-”表示由于非正弦波动没有计算结果。

Noté “-” represented no results for non-sinusoidal fluctuation.

土壤导温率 (κ) 随土壤深度 (z) 增大而指数增加 ($\kappa = 2 \times 10^{-7} e^{4.21z}$, $R^2 = 0.92$), 说明芨芨草草原的土壤均质性较差, 土壤导温率垂向异质性较强。这与芨芨草生物学特性和土壤物理组成相关。芨芨草表层 (<20cm) 土壤内植物根系较多, 死活根系交织盘错,

加之土壤水分含量表层 (33%) 和深层 (24%) 差异较大, 两者相互作用改变了土壤系统表层的导热性; 深层内尽管几乎无植物根系且土壤含水量波动范围小, 但土壤的砾石性差别较大, 各层厚度边界不一致造成了土壤垂直剖面的空间异质性较强。

由式 (2) 可知, 当土壤深度为 $\pi\sqrt{2\kappa\omega} + Z_1$ 时, 该层的温度正好与 Z_1 层温度相位相差 π , 即两者日变化正好相反。计算可知, 34.7cm 处的土壤温度日变化与 5cm 处的正好相反。如果假设地下 Z (m) 处的振幅与地表振幅之比小于某一阈值 α 时, 该层即为恒温层 ($Z = -\ln\alpha \cdot \frac{2\kappa}{\omega}$)。计算可知, $\alpha = 0.01$ 和 0.001 时, 57.3cm 和 86.0cm 土层分别为其日变化恒温层。而依据本文振幅衰减拟合的指数方程计算可得 68.3cm 和 102.0cm 土层分别为 $\alpha = 0.01$ 和 $\alpha = 0.001$ 的土壤恒温层, 均比土壤导温率计算结果略大。这主要是由于土壤导温率在垂直剖面上的异质性较强, 另外可能因为导温率是典型晴天的计算数值, 而土壤振幅则是多天的平均结果。

在土壤均质的假设下, 土壤热力学参数和土壤含水量密切相关。6 月 26 日, 5、10、20、40、60 和 80cm 的土壤容积含水量分别为 25.5、31.7、22.1、22.1、24.4 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 21.7 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, 土壤含水量随土壤深度变化较为复杂。土壤导温率和含水量的相关分析表明, 芨芨草干草原土壤含水量的临界值约为 23.0 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。当土壤导温率与土壤含水量小于该值时, 两者正相关, 反之则负相关, 这和李韧等^[16]对青藏高原北部的研究结果接近。

3 结论与讨论

芨芨草干草原的表层 (<20cm) 土壤温度的日变化基本形态符合经典的正弦波动规律。尽管青藏高原太阳辐射较强, 但是在下垫面反射和土壤水分等因素的综合作用下, 土壤温度日变化明显层在 40cm 范围, 即太阳辐射日变化影响可以达到的大致深度, 这个深度明显高于敦煌戈壁的 10cm 的研究结果^[5], 但和青藏高原那曲高寒草地^[15] 和东北半干旱草地^[20] 的研究结果接近。芨芨草干草原的土壤深层温度几乎没有日变化, 印证了土壤是一个很好的滤波器, 太阳辐射的短周期 (日) 波动只能影响到浅层土壤, 长周期波动才可能影响到深层土壤。芨芨草干草原的浅层土壤温度日变化振幅和相位随土壤深度增加分别呈现几何级数降低和线性延迟, 与腾格里沙漠的草原荒漠化区域相似^[14], 但其降低和延迟强度均较小。综合东北地区、腾格里沙漠、敦煌戈壁和青藏地区的

研究结果表明生物区系和土壤结构只能改变土壤热量垂向传输的强度而不能改变其传输方式。

本试验谐波法计算的土壤导温率和相位法结果差别不大,这和莫兴国等^[13]的研究结果区别较大。主要因为本文的温度相位是通过土壤温度采用正弦方程模拟而来,比采用最大(最小)土壤温度所对应的时间作为相位更为准确,这与代成颖等^[12]的研究结论一致。芨芨草干草原 10cm 土壤导温率为 $1.93 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,和黄土高原地区^[12]、可可西里及北麓河地区^[16]研究结果接近,但明显低于华北平原的研究结果^[13]。尽管黄土高原、可可西里和北麓河地区的植被与芨芨草草原的植被覆盖差异较大,但导温率的一致性表明表层土壤导温率可能主要取决于土壤结构和水文条件。芨芨草干草原 5cm 土壤温度日变化与 34.7cm 土层的相位相反,比敦煌 20cm 土层要深,日变化恒温层为 86-102cm 土层,也比敦煌戈壁的 40cm 研究结果高^[5],但接近于通常认为的 100cm 以下没有明显的日变化信号的研究结果。

借此文以缅怀中国科学院西北高原生物研究所陈桂琛研究员!

参考文献:

- [1]陈珪琛,彭敏.青海省芨芨草草原的群落特征及其分布规律[J].西北植物学报,1993,13(2):154-162.
- [2]周笃笃,马海州,山发寿,等.青海湖流域及周边地区的草地资源与生态保护[J].资源科学,2006,28(3):94-101.
- [3]周国英,陈珪琛,赵以莲,等.青海湖地区芨芨草群落特征及其物种多样性研究[J].西北植物学报,2003,23(11):1956-1962.
- [4]刘霞,景元书,王春林.广东省裸地和草地地表温度时空分布特征[J].中国农业气象,2011,32(1):28-34.
- [5]张强,曹晓彦.敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究[J].大气科学,2003,27(2):245-254.
- [6]王兆伟,郝卫平,龚道枝,等.秸秆覆盖量对农田土壤水分和温度动态的影响[J].中国农业气象,2011,31(2):244-250.
- [7]Hsieh C I, Huang C W, Ger K. Long-term estimation of soil heat flux by single layer soil temperature [J]. International Journal of Biometeorology, 2009, 53(1): 113-123.
- [8]张法伟,李英年,赵新全,等.一次降水过程对青藏高原高寒草甸 CO₂ 通量和热量输送的影响[J].生态学杂志,2008,27(10):1685-1691.
- [9]李英年,张法伟,刘安花,等.矮嵩草草甸土壤温湿度对植被盖度变化的响应[J].中国农业气象,2006,27(4):265-268.
- [10]Heusinkveld B G, Jacobs A F G, Holtslag A A M, et al. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122(1): 21-37.
- [11]涂新斌,戴福初.土体一维传热方程解析解及热扩散系数测定[J].岩土工程学报,2008,30(5):652-657.
- [12]代成颖,高志球,王琳琳,等.两种土壤温度算法的对比分析[J].大气科学,2009,33(1):135-144.
- [13]莫兴国,李宏轩,刘苏峡,等.用土壤温度估算表层土壤导温率与热通量的研究[J].中国生态农业学报,2002,10(1):62-64.
- [14]王新平,李新荣,张景光,等.沙漠地区人工固沙植被对土壤温度和土壤导温率的影响[J].中国沙漠,2002,22(4):344-349.
- [15]王可丽,程国栋,江畅畅,等.青藏高原那曲地区非均质土壤导温率的变化及土壤温度数值模拟[J].冰川冻土,2007,29(3):470-474.
- [16]李韧,赵林,丁永健,等.青藏高原北部活动层土壤热力特性的研究[J].地球物理学报,2010,53(5):1060-1072.
- [17]杨梅学,姚檀栋,王绍令,等.藏北高原土壤的温湿特征[J].地理研究,1999,18(3):312-317.
- [18]朱宝文,陈晓光,郑有飞,等.青海湖北岸天然草地小尺度地表径流与降水关系[J].冰川冻土,2009,31(6):1074-1079.
- [19]周国英,陈珪琛,魏国良,等.青海湖地区芨芨草群落主要种群分布格局研究[J].西北植物学报,2006,26(3):579-585.
- [20]涂钢,刘辉志,董文杰.东北半干旱区退化草地土壤温度的日、季变化特征[J].高原气象,2008,27(4):741-748.