黑河流域森林生态系统湿热特征分析

蒋 冲[1], 王 飞[1,2], 穆兴民[1,2], 赵 云[1]

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 利用 2008 年黑河流域典型森林生态系统土壤和空气温湿度观测资料,分析了不同层次土壤和大气温度和湿度的变化特征。结果表明:(1) 各层土壤温度在 2—3 月达到一年中的最小值,在 7—9 月达到一年中最高值,土壤温度周年变化幅度以及年最低温度随土壤深度的增加而递减。(2) 表层土壤含水量受春季融雪和降雨影响较大,在 8 月中、上旬达到最高值;20—40 cm 土壤含水量对春季融雪响应较弱,80—120 cm 土壤含水量较为稳定,不受冻融交替影响。(3) 从当年 7 月中旬至次年 1 月下旬,林地各层气温呈下降趋势,2 月上旬至 7 月上旬呈上升趋势;距离地表近 2 m 高度全年各月份气温略高于 10 m 和 24 m 高度,气温最高值和最低值分别出现在 14:30 和 6:30 左右。(4) 4—6 月林内湿度相对较低,7—10 月相对较高,空气相对湿度最高值和最低值分别出现在 22:00 和 11:30 左右;10 m 和 24 m 处空气相对湿度变化规律与 2 m 处基本一致。

关键词: 黑河流域; 森林生态系统; 土壤温度; 土壤湿度; 气温; 大气相对湿度

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2012)03-0096-05 **中图分类号**: Q149

Characteristics of Temperature and Humidity in Forest Ecosystem of Heihe River Basin

JIANG Chong[1], WANG Fei[1,2], MU Xing-min[1,2], ZHAO Yun[1]

(1. *College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Temperature and humidity characteristics of soil and air at different levels are analyzed based on the observed data of typical forest ecosystem of Heihe River basin in 2008. Results show that: (1) Soil temperature at different depths is the lowest between February and March each year and the highest between July and September. Annual temperature difference and minimum soil temperature decreased with the increase in soil depth. (2) The moisture of top soil is greatly affected by snowmelt in spring and rainfall, reaching its maximum value in the middle or last ten days of August. There is less impact of snowmelt in spring on the soil moisture between 20 and 40 cm from soil surface. The soil moisture content between 80 and 120 cm is quite stable and is not influenced by snowmelt in spring. (3) Air temperature at different heights in forest presents a declining trend from the middle of July to the last ten days of January next year and then increases continuously from the early of February to the early of July. Air temperature at 2 m height is a bit warmer than that at 10 and 24 m heights. The highest and lowest daily temperature peaks are observed at about 14:30 and 6:30, respectively. (4) Air humidity in forest is lower between April and June and higher between June and October. The maximum and minimum relative humidity values are observed at about 22:00 and 11:30, respectively. The humidity variation at 10 or 24 m height is similar to that at 2 m height.

Keywords: Heihe River basin; forest ecosystem; soil temperature; soil moisture; air temperature; relative air humidity

收稿日期:2011-07-25 **修回日期**:2011-09-26

资助项目:国家自然科学基金项目"基于相同气候条件的人类活动对河流水沙影响定量评价:以黄土高原延河流域为例"(41171420); 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目"北方旱区土壤水分遥感监测试验研究"(10502-Z12-9); 中国科学院对外合作重点项目计划"渭河流域水环境问题综合治理对策"(GJHZ1018); 中荷联合主题研究项目"Netherlands Organization for Scientific Research"(OND1339291)

作者简介:蒋冲(1987—),男(汉族),黑龙江省哈尔滨市人,硕士研究生,研究方向为黄土高原气候变化与生态水文。E-mail:cba8702@nwsuaf.edu.cn。

通信作者:王飞(1971—),男(汉族),陕西省户县人,博士,副研究员,主要从事水土保持环境效应评价研究。E-mail:wafe@ms.iswc.ac.cn。

森林约占陆地面积的 30%[1],其水量和能量平衡在陆地水循环以及能量平衡中具有举足轻重的地位。森林土壤和空气的热量和水分的交换是森林生态系统水循环和能量平衡中的一个重要分量。水分和热量的交换所引起的温度和湿度的变化是区域乃至全球气候变化研究的重要研究内容[2]。因此,合理并准确地评价森林土壤和空气的温度、湿度变化,对于了解大范围的水分和能量循环具有重大意义。青海云杉(*Picea crassifolia*)是我国青藏高原东北边缘的特有树种,主要分布在祁连山和贺兰山两大山系,其在祁连山的分布面积占总面积的 94.6%[3]。目前,有关青海云杉林的生境特征[4]、空间分布格局[5-7]、生物量[8-9]、土壤呼吸[10-12]和水源涵养功能[13-15]的研究已有相关报道。由于祁连山区现有水源涵养林 4.36×10^5 hm^2,青海云杉是其主要的建群树种,面积占水源涵养林总面积的 24.74%,占乔木林总面积的75.72%[16],其生态水文服务功能举足轻重。因此,研究青海云杉林的土壤以及近地表空气不同高度/深度温度和湿度的变化对于青海云杉林甚至祁连山区、黑河流域的水量和能量平衡的研究具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黑河流域是中国西部各内陆河流域中最有代表和地区性特色的流域之一,从其上游到中下游,寒区和旱区相伴而生,具有独特的以水为纽带的"冰冻土—森林—河流—湖泊—绿洲—荒漠"多元自然景观,顺次分布的高山冰雪带、草原森林带、平原绿洲带和戈壁荒漠带等自然地理单元,是在流域尺度上开展寒区和干旱区水文与生态等陆面过程研究的理想场所。本文所选择的试验区是大野口关滩森林站。该站位于祁连山中段大野口流域关滩阴坡的森林内。观测点的经纬度为 100°15′01″E 和 38°32′01″N。海拔高度为 2 835.2 m。气候类型属于高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候。年均气温 0.5 ℃,年均降水量 368 mm,年平均水面蒸发量 1 051 mm,平均相对湿度 60%(1994—2004 年)。林内主要是高约 15—20 m 的云杉,地面覆盖有厚约 10 cm 的苔藓,植被生长情况良好。土壤类型为森林灰褐土,土壤厚度平均约 120 cm[4]。

1.2　实验设计

本研究所有观测数据均共享自"中国西部环境与生态科学数据中心"黑河综合遥感联合试验大野口关滩森林站自动气象站数据集。大野口关滩森林站观测试验场东西宽 15 m,南北长 15 m。试验场内的微气象观测塔高 24 m,在观测塔的 2,10 和 24 m 高度上分别布设了风、温、湿梯度观测传感器和雪深传感器,光合有效辐射计及辐射四分量计、超声风速仪和气体分析仪架设在 20 m 高度。在 24 m 气象观测塔的北部 6 m 处有一个面向东方,深 1.2 m 的土壤剖面。在 0.05 m 和 0.15 m 深处布设有土壤热流传感器,在 0.05,0.1,0.20,0.40,0.80 和 1.20 m 处分别布设有 6 层的土壤温度和土壤水分传感器。土壤剖面在开挖和添埋过程中采取了分层处理,以尽量保持土壤原有的分层结构,地表植被层也得以完整保留。由于土壤已被冻结,0.8 m 和 1.2 m 的土壤温度和水分传感器采取了填埋方式布设;上述所有观测量均由数据采集器每 30 min 自动记录其平均值,观测时间为 2008 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日。具体的观测项目及所用传感器型号、生产厂家、参数和测量高度/深度如表 1 所示。

表 1　大野口关滩森林站观测项目及传感器信息

观测项目	传感器型号	生产厂家	观测精度	观测高度(深度)/m
气 温	HMP45C	Vaisala (芬兰)	±0.2 ℃	1.92,9.90,23.75
相对湿度	HMP45C	Vaisala (芬兰)	±2%	1.92,9.90,23.75
土壤湿度	CS616	Campbell (美国)	±2%	0.05,0.10,0.20,0.40,0.80,1.20
土壤温度	107 ℃	Campbell (美国)	±0.2 ℃	0.05,0.10,0.20,0.40,0.80,1.20

1.3　数据处理

为了计算青海云杉林内森林和土壤的年、月温湿度变化,首先将每 30 min 的观测量数据转换为日平均数据,再将每 10 d 的日平均数据分别平均,求得旬、月土壤和空气的温湿度值。由于受降雨、降雪、雾霜等不利气象条件及电源不足等影响,自动气象站所观测的数据系列在全年连续观测期间均有不同程度的缺失。对于缺失的土壤和空气温度、湿度数据,本文采用数据缺失日前后 2 d 的日平均值对其进行插补,最大限度地保留数据的真实性。

2　结果与分析

2.1　土壤温度变化

图 1 显示,不同深度土壤温度的总体变化规律基本相似,土壤温度在 2—3 月达到一年中的最小值,从表层 5 cm 到深层 120 cm 分别为 −9.96,−8.81,

－7.67，－6.17，－2.85，和－0.19 ℃。以上数据表明表层土壤因为和空气接触较为频繁，受气温季节变化影响显著。而深层土壤因为和空气交换不如表层土壤剧烈，所以温度周年变化不大，不同层次土壤温度周年变化幅度（年最高温度与最低温度之差）以及年最低温度随土壤深度的增加而递减。最明显的就是 80 cm 和 120 cm 土层的温度变化，全年各月土壤温度基本稳定在 0 ℃左右，无明显变化，这是由于该地区 80 cm 和 120 cm 土壤常年冻结，所以温度变化微小。另外，图 1 反映出不同层次土壤到达年最低温度的时间稍有差异，随着土层深度的增加土壤温度达到最低值的时间依次滞后，这是由于土壤对热量的传导不如空气快，土壤温度变化相比于空气温度变化略显滞后。不同深度土壤温度从 2 月起逐渐上升，在 7—9 月达到年中最高值，各深度处温度最高值分别为 8.48，7.10，5.80，2.72，0.42，和－0.26 ℃。土壤年最高温度和最低温度表现出的规律基本类似，也是随土壤深度的增加而递减。从 4 月中、下旬开始各层温度差越来越大，到峰值减小，随后 10—11 月各层温度基本上相等，11 月以后各层温差继续加大。表层 5 cm处温度从 5—9 月都是最高的，最深层 120 cm 处温度从 11 月到次年 5 月都是最高的，这表明 4 月底 5 月初和 10 月底 11 月初处于季节过渡时期。

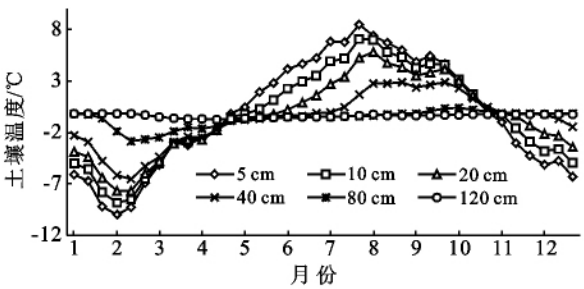


图 1 不同层次土壤温度月变化

2.2 土壤含水量变化

由于林地土壤水分主要受降雨影响，而受人为扰动较少，关滩林地站土壤湿度呈现出的变化规律与前人关于该地区农田土壤水分变化的描述明显不同[17-20]。由于关滩站地处寒区，林地土壤水分变化与我国南方大部分地区林地土壤水分变化规律也不尽相同。就表层 5 cm 和 10 cm 土壤而言，其含水量受春季融雪和降雨影响较大。从图 1 可以看出，5 cm 和10 cm土壤温度在 5 月之前小于 0 ℃，但随着 4 月底 5 月初温度不断升高，已经超过 0 ℃，积雪开始融化，表层土壤受春季融雪影响，含水量也相对小幅上升约 5%（图 2）。表层 5 cm 土壤对于融雪的响应最为敏感，水分含量上升较快，而 10 cm 土壤水分含量上升则存在约为 1 旬的滞后时间。20—40 cm 土壤对春季融雪响应较弱，基本无变化。80—120 cm 土壤因为常年冻结，不受冻融交替影响，水分含量较为稳定，体积含水量变化范围基本在 0.10%～0.25%。随着雨季的到来（6 月下旬至 8 月中旬），除底层 120 cm土壤之外，各层土壤含水量都随降水量变化而大幅波动，在 8 月中、上旬达到含水量最高值，随后小幅回落，在 9 月上旬至 10 月上旬间又震荡上升，然后转为逐渐下降趋势并趋于稳定，一直持续到次年 5 月。这一现象是由于该地区 11 月土壤开始结冻，降水滞留在表层，加之植物开始由生长期转入休眠期，蒸腾减少，根系层受表层和深层土壤水分补充影响和本身消耗减少，土壤水分有一个增加过程。进入 11 月，气温逐渐降低，林草逐渐停止生长，大气降水较少，此时林地水分损耗主要以林地蒸发为主，但由于林地有枯枝落叶层覆盖，削弱了林地土壤水分损耗。

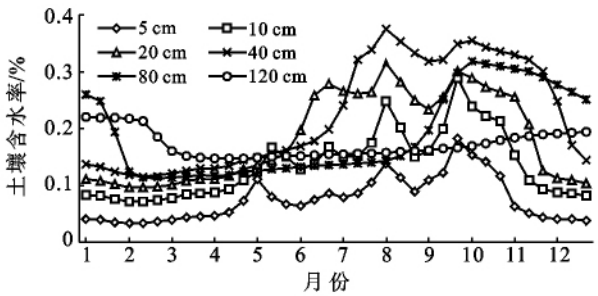


图 2 不同层次土壤体积含水量月变化

从图 2 可以看出，11 月至次年 5 月土壤含水量成平稳趋势，这是由于随着气温的进一步降低，土壤开始冻结，土壤中的水分以冻结的形式存在，将会进一步阻止了水分的运动，从而减少了土壤水分的消耗，有利于土壤水分的保持。

青海云杉林土壤水分年动态分为水分消耗期、水分积累期、水分消退期、水分稳定期 4 个时期。土壤水分消耗期从 5 月初土壤解冻开始到 6 月中旬雨季来临为止，土壤中水分消耗大于补给，土壤含水量不断下降，到 6 月初降至较低值，但并不是最低水平。土壤水分积累期从 6 月初至 8 月初，虽然土壤蒸发和林木蒸腾作用强烈，但由于降水量大，土壤含水量持续升高，到 8 月初达到全年最高值。土壤水分消退期从 8 月底或 9 月初，虽然仍有一部分降雨，但林木蒸腾旺盛，林地蒸发强烈，土壤中的水分不断减少。土壤水分稳定期从 11 月开始，气温低，林木生长停止，虽然降水很少，但土壤水分相对保持在一定高度不变。由于祁连山水源涵养林区处在干旱半干旱区，降水本身较少，始终存在水分不足的问题，生长季节土壤水分输入大于水分消耗的情况较少。

2.3　空气温度变化

2.3.1　**空气温度月变化**　从图 3 中可以看出。不同高度空气温度的总体变化规律基本相似,从当年 7 月中旬至次年 1 月下旬温度呈下降趋势,2 月上旬至 7 月上旬呈上升趋势,空气温度在 1 月下旬达到一年中的最小值,从近地表 2～24 m 分别为 -19.00,-19.50 和 -19.42 ℃。不同高度空气温度从 2 月初逐渐上升,在 7 月上旬达到年中最高值,不同高度处温度最大值分别为 13.80,13.34,和 12.93 ℃,随后又转为下降趋势。以上分析表明,7 月份为季节过渡时期。另外,从图 3 可以看出,距离地表近 2 m 处全年各月份温度略高于 10 m 和 24 m 处温度,这可能是由于近地表温度与土壤直接接触,与地表热量交换频繁导致的。

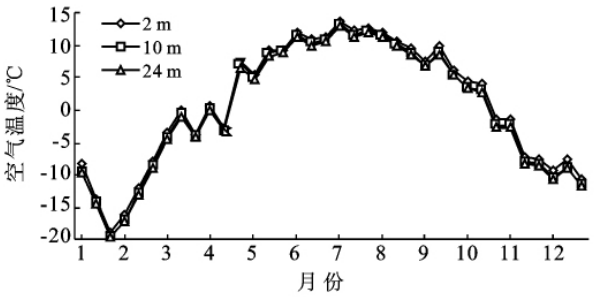


图 3　不同高度空气温度月变化

2.3.2　**空气温度日变化**　选择 7 月份树木生长最旺盛的晴天做日变化曲线图,如图 4 所示。近地表 2 m 处从 16:30 到次日 7:00 时间段内空气温度呈震荡下降趋势,这是由于没有太阳辐射的作用,加之大气的热容量小,空气温度急剧下降;而在 7:00 到 16:30 时间段由于太阳辐射增强空气温度呈震荡上升趋势。昼夜空气温度最高值(16.84 ℃)出现在 14:30 左右,最低值(1.94 ℃)出现在 6:30 左右,最高温度是最低温度的 5.73 倍。10 m 和 24m 处空气温度变化规律与 2 m 处变化规律基本类似。

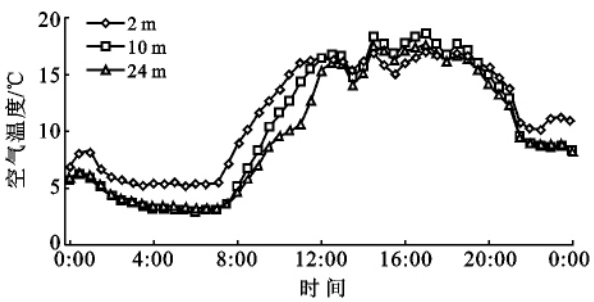


图 4　不同高度空气温度日变化

2.4　空气湿度变化

2.4.1　**空气湿度月变化**　据多年观测研究,祁连山青海云杉林林内各月相对湿度均高于林外草地,年均湿度比林外高 16.67%[16]。森林保持湿度作用大小受输入林内水分多少影响,4—6 月外界向森林输入的水分少、林地温度较低,通过蒸发向空气释放的水汽少,森林保持湿度的作用相对较小,林内湿度相对较低;7—10 月由于外界通过降水向森林输入水分较多,林地温度升高,通过蒸发向空气释放较多水汽,森林保持湿度作用相对较大,林内湿度较高。湿度最高值出现在年降水较集中、土壤蒸发强烈的月份;湿度最低值出现在年降水较小、地温下降、土壤水开始以固体形式存储的月份。林内湿度高值出现在年降水较集中、植物光合作用旺盛、土壤蒸发强烈的 7—10 月;在 3—5 月由于林内外积雪随着气温升高而融化,一部分下渗补充土壤,一部分变成水汽增加空气湿度,从而在干旱期出现湿度较高值。湿度最低值出现在降水稀少、土壤结冻、植物停止生长的冬季。

2.4.2　**空气湿度日变化**　选择 7 月份树木生长最旺盛的晴天做日变化曲线,近地表 2 m 处从 22:00 到次日 11:30 时间段内空气相对湿度呈震荡下降趋势,而在 11:30 到 22:00 时间段呈震荡上升趋势。昼夜空气相对湿度最高值出现在 22:00 左右,最低值出现在 11:30 左右。影响空气相对湿度的主要因素是气温、地面蒸发、风力等,其中关键的影响要素是近地表气温。当气温下降,其他条件不变时,大气相对湿度呈上升趋势,反之,则呈下降趋势,这是因为气温决定着空气饱和水汽含量和水汽扩散的快慢。当地面蒸发减弱,其他条件不变时,大气相对湿度也会随之下降,反之,则呈上升趋势。影响地面蒸发的主要因子是地温的变化,地温决定着土壤水分的活跃程度。此外,风力对空气相对湿度的影响作用也非常显著,当风力增大时,由于空气流动加强,使其相对湿度下降,反之则呈上升趋势。在 22:00 左右,由于没有太阳辐射的作用,加之大气的热容量小,空气温度急剧下降,而在该区 11:30 时太阳辐射作用已经很强,大气温度已超过日平均气温,所以空气湿度较低。由于土壤的热容量很大,在 22:00 时虽然没有太阳辐射的作用,但土壤温度仍然保持一个相当高的温度值,其蒸散作用并没有因此而减弱,反之,11:30 时虽然太阳辐射较强,但地温仍然很低,使得地面蒸散作用比较弱。10 m 和 24 m 处空气湿度变化规律与 2 m 处变化规律基本类似。

3　结 论

(1) 不同深度土壤温度的总体变化规律基本相似,在 2—3 月达到一年中的最小值,不同层次土壤温

度周年变化幅度以及年最低温度随土壤深度的增加而递减。深层土壤常年冻结,温度变化微小,土壤到达年最低温度的时间随着土层深度的增加依次滞后。土壤温度从 2 月起逐渐上升,在 7—9 月达到年中最高值,4 月底 5 月初和 10 月底 11 月初处于季节过渡时期。

(2) 在森林温度变化方面,不同高度空气温度的总体变化规律基本相似,从当年 7 月中旬至次年 1 月下旬温度呈下降趋势,2 月上旬至 7 月上旬呈上升趋势。距离地表近 2 m 处全年各月份温度略高于 10 m 和 24 m 处,这可能是由于近地表温度与土壤直接接触,与地表热量交换频繁导致的。在本文选取的 7 月份树木生长最旺盛的的晴天,昼夜空气温度最高值出现在 14:30 左右,最低值出现在 6:30 左右,10 m 和 24 m 处空气温度变化规律与 2 m 处变化规律基本类似。

(3) 在森林湿度变化方面,4—6 月森林保持湿度的作用相对较小,林内湿度相对较低,7—10 月森林保持湿度作用相对较大,林内湿度较高,湿度最高值出现在年降水较集中、土壤蒸发强烈的月份。林内湿度高值出现在 7—10 月,湿度最低值出现在冬季。在空气湿度日变化方面,近地表 2 m 处昼夜空气相对湿度最高值出现在 22:00 左右,最低值出现在 11:30 左右,10 m 和 24 m 处空气湿度变化规律与 2m 处变化规律基本类似。

(4) 表层 5 cm 和 10 cm 土壤受春季融雪和降雨影响较大。随着 4 月底 5 月初温度不断升高,积雪开始融化,表层土壤受春季融雪影响,含水量也相对小幅上升约 5%,10 cm 土壤水分含量上升则存在约为 1 旬的滞后时间。20—40 cm 土壤对春季融雪响应较弱,基本无变化。80—120 cm 土壤因为常年冻结,不受冻融交替影响,水分含量较为稳定。春季融雪是我国北方地区独特的水文现象,是对降水季节变化规律的进一步调整。积雪在流域内空间上分布的不均匀性造成流域内春季积雪消融时产生与降水相异的水文规律,特别是积雪春季消融补充祁连山水源涵养林区各河流域春季降水少而形成的春季枯水,在一定范围内缓解了各河流下游地区春季用水高峰与降水较少的矛盾。在局部范围、时间内有利地缓解了中下游地区的春早,因此积雪是祁连山林区独特的“固体水库”。随着雨季的到来,除底层 120 cm 土壤之外,各层土壤含水量都随降水量变化而大幅波动,在 8 月中、上旬达到含水量最高值。进入 11 月以后植物进入休眠期,土壤冻结,虽然降水少,但蒸发散也很小,土壤含水量相对较高,且保持稳定。

研究青海云杉林的土壤以及近地表空气不同高度/深度温度和湿度的变化对于青海云杉林甚至祁连山区、黑河流域的水量和能量平衡的研究具有重要意义,值得进一步深入研究。

[参 考 文 献]

[1] Food and Agriculture Organization(FAO). State of the world's forests[M]. Rome: FAO, 2005:166-166.

[2] Garratt J R. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments:a review[J]. Journal of Climate, 1993,6(3):419-448.

[3] 刘兴聪. 青海云杉[M]. 兰州:兰州大学出版社,1992:1-3.

[4] 赵传燕,别强,彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析[J]. 地理学报,2010,65(1):113-121.

[5] 郝虎,刘兴明,宋采福,等. 祁连山北坡苔藓—青海云杉林优势种空间分布格局研究[J]. 甘肃林业科技,2005,30(4):9-12.

[6] 邸华,刘建泉,丁国民,等. 祁连山北坡草类—青海云杉林优势种群分布格局分析[J]. 甘肃林业科技,2009,34(3):5-8.

[7] 张立杰,赵文智,何志斌. 青海云杉(*Picea crassifolia*)种群格局的分形特征及其影响因素[J]. 生态学报,2008,28(4):1383-1389.

[8] 刘兴聪. 祁连山哈溪林场青海云杉林生物量的测定[J]. 甘肃林业科技,1992,14(1):7-10.

[9] 常学向,车克钧,宋彩福. 祁连山林区青海云杉林群落生物量的初步研究[J]. 西北林学院学报,1996,11(1):19-23.

[10] 罗龙发,牛赟,王艺林,等. 祁连山青海云杉林温度变化对土壤呼吸的影响[J]. 林业科学,2007,43(10):117-121.

[11] 常宗强,史作民,冯起. 气温对祁连山不同植被状况土壤呼吸的影响[J]. 中国农业气象,2005,26(2):85-89.

[12] 彭家中,常宗强,冯起. 温度和土壤水分对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(3):165-169.

[13] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟,等. 祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究[J]. 应用生态学报,2004,15(7):1148-1152.

[14] 金博文,王金叶,常宗强,等. 祁连山青海云杉林冠层水文功能研究[J]. 西北林学院学报,2001,16(S1):39-42.

[15] 刘旻霞,车克钧. 祁连山青海云杉林枯落物层水文效应分析[J]. 甘肃农业大学学报,2004,39(4):434-438.

[16] 王金叶,刘贤德,金博文,等. 祁连山青海云杉林调节林内水分变化研究[J]. 西北林学院学报,2001,16(S1):43-45.

[17] 何志斌,赵文智. 荒漠绿洲区人工梭梭林土壤水分空间异质性的定量研究[J]. 冰川冻土,2004,26(2):207-211.

[18] 王志强,刘宝元,王晓兰. 黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响[J]. 地理研究,2005,24(1):113-120.

[19] 曹宇,欧阳华,肖笃宁,等. 额济纳天然绿洲景观变化及其生态环境效应[J]. 地理研究,2005,24(1):130-139.

[20] 许月卿. 土地利用对地下水位下降的影响:以河北平原为例[J]. 地理研究,2005,24(2):222-228.