

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 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 (SHENTAI XUEBAO)

第32卷 第4期 2012年2月 (半月刊)

目 次

围垦对南江东滩湿地大型底栖动物的影响.....	马长安,徐霖林,田伟,等 (1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价	孙才志,杨磊 (1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征	侯勇,高志岭,马文奇,等 (1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟.....	高照全,冯社章,张显川,等 (1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应.....	宋春桥,游松财,柯灵红,等 (1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应	唐振兴,何志斌,刘鹤 (1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素.....	田风霞,赵传燕,冯兆东,等 (1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应.....	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等 (1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程.....	马井会,顾松强,陈敏,等 (1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系	田丰歌,徐兆礼 (1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状.....	张跃环,王昭萍,闫喜武,等 (1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征.....	李慧,王江涛 (1115)
起始生物量比对3种海洋微藻种间竞争的影响.....	魏杰,赵文,杨为东,等 (1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅.....	文世勇,宋璐璐,龙华,等 (1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应.....	陈书军,陈存根,邹伯才,等 (1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局.....	田中平,庄丽,李建贵 (1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较.....	石松利,王迎春,周红兵,等 (1163)
干旱胁迫下黄土高原4种乡土禾草抗氧化特性	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁 (1174)
施加角担子菌B6对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响	肖逸,王兴祥,王宏伟,等 (1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生生境.....	张翼飞,王炜,梁存柱,等 (1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系.....	管孝艳,王少丽,高占义,等 (1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性.....	刘春利,胡伟,贾宏福,等 (1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局.....	张春华,王宗明,居为民,等 (1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立.....	王鹏,张春庆,陈化榜,等 (1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较.....	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等 (1241)
西花蓟马在6种蔬菜寄主上的实验种群生命表	曹宇,郅军锐,孔译贤 (1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织N同位素转化率的影响	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等 (1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别.....	许文雯,孙翔,朱晓东,等 (1264)
珠三角城市绿地CO ₂ 通量的季节特征	孙春健,王春林,申双和,等 (1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例	吴以中,朱沁园,刘宁,等 (1283)
专论与综述	
湿地退化研究进展	韩大勇,杨永兴,杨杨,等 (1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评	杨荣,苏永中,王雪峰 (1308)
问题讨论	
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性	屠振力,方俐晶,王家刚 (1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响	杨永胜,卜崇峰,高国雄 (1327)
研究简报	
祁连山典型灌丛降雨截留特征.....	刘章文,陈仁升,宋耀选,等 (1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法	喻梅,周守标,吴晓艳,等 (1347)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-02	



封面图说: 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才被发现的新鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球90%以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201010091418

唐振兴,何志斌,刘鹤.祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应.生态学报,2012,32(4):1056-1065.

Tang Z X, He Z B, Liu H. Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1056-1065.

祁连山中段林草交错带土壤水热特征 及其对气象要素的响应

唐振兴,何志斌*,刘鹤

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站,兰州 730000)

摘要:利用综合环境观测仪(ENVIS)的长期监测数据,分析了2002-06-01—2008-05-31期间祁连山阴坡林草交错带土壤水热特征及其与气象要素的统计关系,结果表明:1)土壤温度与空气温度年内变化格局相似,但存在滞后期,滞后时间随土壤深度增加而增加;土壤温度年际变化与气温一致,呈逐渐降低趋势。2)土壤水分表现为20—80 cm土壤水分易受外界降水过程影响,120 cm和160 cm深度土壤水分变化相对平缓;土壤水分季节性冻融过程中的主要控制因子为温度,但20—80 cm冻土的融化还受上层土壤水分融化和降雨下渗影响。3)月尺度上土壤水分和温度与气象要素的统计关系优于日尺度。利用气象要素在月尺度上建立的经验模型上对20—60 cm深度土壤温度的估算效果相对较好。

关键词:祁连山;林草交错带;土壤水热特征;气象要素

Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors

TANG Zhenxing, HE Zhibin*, LIU Hu

Linze Inland River Research Station, Chinese Ecosystem Network Research, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, China Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Land surface processes and land-atmosphere interactions are hot research focuses of the earth science, and the coupling soil heat and water dynamics in the near surface is the critical link between these processes and interactions. Analysis of the soil heat and water dynamics in Qilian Mountains was quite limited, primarily because there was no enough long-term monitoring data. This situation has been moderated, more or less, with a lot of automatic recording field station been established over the past decade. Pailugou forest station is among the stations with the longest periods of observations (10 years) in this region. By using the long-term field monitoring dataset (measured via ENVIS system from Jun 1, 2002 to May 31, 2008), we analyzed the relationships between soil temperature, soil moisture dynamics and other meteorological factors in the forest-grassland ecotone of Qilian Mountains. The results were shown as follows: 1) the changing patterns and trends of the soil temperature are largely consistent with the air temperature at different temporal scale, while a lag phase between them was observed which increase with soil depth. 2) Soil moisture dynamics is much more complex compared with the temperature dynamics, and strongly affected by the precipitation / evaporation and melting / freezing processes. Generally, the variability of soil moisture is relatively more intense at the depths of 20—80 cm and less intense at the depths of 80—160 cm in the soil profile. Moreover, small differences exist between the evolution trends in the soil moisture

基金项目:国家自然科学基金项目(30800147);国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91025014);中国科学院百人计划项目资助(29Y127D11)

收稿日期:2010-10-09; 修订日期:2011-11-10

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: hzbbmail@lzb.ac.cn

dynamics at the different depths, for example, soil moisture slightly decreased at the 40 cm and 80 cm, while increased at the other depths of the soil profile during the study period. 3) Energy budget at the soil surface significantly controlled the seasonal melting of the top-layer frozen soil (0—20 cm), while the liquid water infiltrated from the precipitation and melting water in the top-layers also contributed a lot to the melting processes of low-layer frozen soil (20—80 cm). 4) At the daily time scale, soil temperature is highly related with the air temperature, while the soil moisture is also highly related with the net solar radiation beside the air temperature. At the monthly time scale, soil temperature is mainly controlled by the air temperature and relative air humidity, and soil moisture dynamics is controlled by the air temperature, saturated vapor pressure differences (VPD), and net solar radiation. Better statistical relationships between soil temperature and meteorological factors was observed at month-scale rather than a daily time scale, and as a result, the relationships built at monthly time scale can be used to get a better prediction of temperature in the top soil layers, i.e. 20 cm, 40 cm and 60 cm. The results derived from this study clearly indicate that precipitation and air temperature are among the most important environmental factors that affect soil heat and water dynamics in Qilian Mountains. More modeling efforts are needed to quantify and qualify these effects for the fragile alpine ecosystem in the arid northwest China, especially under future climate scenarios and under regional disturbance regimes.

Key Words: Qilian Mountains; forest-grassland ecotone; soil water and temperature characteristics; meteorological factors

地表土壤的水热动态过程和变化机制是陆面过程的重要研究内容^[1-3],越来越多的研究侧重于大气过程和地表过程的耦合模拟研究^[1,4-7],但土壤水热变化仍缺乏长期观测资料,与气象要素间的关系及相互影响机理理解不够^[1,8-9]。Porporato 等^[10]的研究认为土壤水分即是气候-植被-土壤属性等综合因素的影响结果,也是决定植被水分供给的关键因素,是生态水文过程研究的重要切入点;Edorado 和 Porporato^[11]就影响土壤水分的动态变化的各种物理与生态过程的前期研究作了详细的综述;同时研究表明^[12-14]土壤水分与降水在大尺度上存在强烈的耦合关系,Randal 等^[5]利用 12 种地表-大气耦合模型对全球进行模拟的结果表明土壤水分对降水存在显著的反馈作用,是季节性降水预报的重要指标。

近年来,关于祁连山林地、草地土壤水热特征已有较多研究,对山区土壤水热变化过程有了一定认识。如刘鹄等^[15]研究了祁连山浅山区不同植被类型的土壤水分在典型生长季期间的时间异质性,发现山区土壤水分时间变异系数最大值并不在表层;党宏忠等^[16]就青海云杉林土壤水分特征进行了探讨,根据土壤水分的动态变化将其分为活跃-调节-传输-蓄水 4 个层次;王金叶等^[17]对排露沟流域不同土壤类型分析了其土壤水分状况,认为亚高山灌丛草甸土持水能力最强,水文特性最好。康尔泗等^[4]对西北内陆河流域山区水文过程进行了综述,提出了后续研究的重点和难点在于研究山区森林草地生态系统在山区水文循环中的作用以及在维持和保护山区生态和环境中的作用和意义。虽然在区域或全球尺度上对地表土壤水热与大气的相互关系已有较多的模拟结果,但是相关结果并不适合气象要素变化剧烈的山区。其次祁连山虽有较多的土壤水热研究成果,但长期定点观测资料较少,主要以人工观测为主,观测密度低、观测时间短,同时缺乏土壤水热与气象要素的综合同步观测,这些都制约了对土壤水热特征及其与气象要素间的关系的深入理解。

综上,利用山区综合环境观测仪(ENVIS)长期定点实验可以弥补区域地表-大气模型的相关不足,探讨点尺度上大气要素对土壤水热的强迫过程。本文通过对 2002-06-01—2008-05-31 共 6a 的土壤水分和气象数据进行诊断分析,试图就以下问题做出分析:1) 土壤水分和温度的年内、年际变化特征;2) 降水和温度变化对不同深度土壤水热强迫过程的差异;3) 控制土壤水热变化的主要气象要素。

1 研究区概况

中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站——祁连山森林生态系统观测点位于黑河上游排露沟流域($38^{\circ}24'N, 100^{\circ}17'E$),流域总面积 2.91 km^2 ,长 4.25 km ,纵坡比降 $1:4.19$;海拔 $2650\text{--}3800\text{ m}$ 。该流域阳坡为山地干草原,阴坡为斑块森林和草地景观,森林总面积 1.12 km^2 ,覆盖率 38.5% 。年均气温 $-0.6\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$,年降水量 $200\text{--}300\text{ mm}$,年积雪厚度 $0.5\text{--}1.5\text{ m}$ 。

2.0 °C, 年降水量435.5 mm, Ø20 cm 蒸发器年蒸发量1051.7 mm, 年平均相对湿度为60%。研究区内植被因地形和气候的差异而形成明显的垂直分布带, 以青海云杉林(*Picea crassifolia*)为主的建群种呈斑块状分布于阴坡、半阴坡, 灌木主要以金露梅(*Potentilla fruticosa* Linn.)、银露梅(*Potentilla glabra* Lodd.)、高山柳(*Salix cupularis* Rehd.)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum* (Linn.) Wahl.)等为建群种, 林下植被主要以山羽藓、珠芽蓼(*Polygonum viviparum* Linn.)、木贼(*Ephedra equisetina* Bunge)等为主。阴坡草地主要分布珠芽蓼(*Polygonum viviparum* Linn.)黑穗苔(*Carex atrata*)针茅(*Stipa*)等, 阳坡草地主要为红砂(*Reaumuria soongorica*)、合头草(*Sympetrum regelii*)、驼绒藜(*Ceratoides Latens*)、芨芨草(*Achnatherum*)等。土壤主要是山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土和山地草原栗钙土, 平均厚度0.8—2.2 m, 土层较薄, 以粉沙块为主, 成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色沙页岩等, pH值7.0—8.0。其中, 仪器观测点的海拔2700 m, 位于林草交错带。

2 研究方法

2.1 实验仪器

在排露沟阴坡林草交错带布设1套ENVIS(德国, IMKO)综合环境观测系统, 海拔2700 m, 从2002年5月起至今连续监测1.5 m和3 m处的气象要素和深度为20, 40, 60, 80, 120 cm和160 cm的土壤要素, 传感器类型: 入射辐射与反射辐射(CM7B, KIPP&ZOEN, 荷兰)、净辐射(TYPE 8110, Wein GmbH & Co. KG, 奥地利)、气压(PTB100, Vaisala, 芬兰)、空气温度与湿度(HMP45D, Vaisala, 芬兰)、土壤热通量(HFT-3与HFP01, Campbell, 英国)、风向与风速(RITA and LISA, Siggelkow Geratebau, 德国), 降水(RG50, SEBA Hydrometrie, 德国), 土壤体积含水量(TRIME-EZ, IMKO, 德国), 土壤温度与水势(T8, IMKO, 德国)。数据采集步长均为30 min。本文选取数据连续性较好的时间段2002-06-01—2008-05-31进行分析。

2.2 数据处理及分析

本文所用的观测数据为气象要素和土壤水分、温度要素。其中气象要素为1.5 m高度的气温(*T_a*)、相对湿度(*RH*)、风速(*W*), 1.2 m高度的降水(*P*), 3 m高度的向下总辐射(*R_d*)、向上净辐射(*R_u*)和净辐射(*R_n*), 饱和水汽压差(*VPD*)根据下式计算:

$$VPD = 0.611 \exp \frac{17.27T}{T + 237.3} (1 - RH) \quad (1)$$

式中, *T*(°C)为空气温度, *RH*(%)为相对湿度。

土壤要素: 仪器观测的6个深度的土壤体积含水量(soil volumetric water content, 简称为SW20, SW40, SW60, SW80, SW120, SW160)和土壤温度(soil temperature, 简称为ST20, ST40, ST60, ST80, ST120, ST160)。

在分析季节性冻土的冻融过程时, 本文以土壤温度0 °C作为土壤水分的冻融起始温度, 进而计算了各土层的冻融时间差:

$$\Delta t_i = t_u - t_d \quad (2)$$

式中, *t*(d)为土壤日均温度到达0 °C的时间, *i*取值1—5, 分别对应土壤深度差20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—120 cm和120—160 cm; *u*, *d*分别表示上、下相邻2土层深度。

对数据进行修订校正后将各要素的30 min步长观测数据整理为逐日平均和逐月平均。

$$\bar{A}_{\text{day}} = \frac{\sum a}{48} \quad (3)$$

$$\bar{A}_{\text{month}} = \frac{\sum a}{48M} \quad (4)$$

式中, \bar{A}_{day} 和 \bar{A}_{month} 分别为逐日、逐月处理后的观测因子; *a*为变量的观测值; *M*为变量观测时段所处月份的天数。

在分析气象要素与土壤水热的统计关系时为了避免不同量纲的影响, 在SPSS中对全部要素进行了标准化处理。本文所用软件为: 数据整理excel2007, 统计分析及画图SPSS13.0、origin8.0。

3 结果分析

3.1 排露沟流域降水和气温变化

图1为6a内(2002-06-01—2008-05-31)综合环境观测仪ENVIS记录的降水和气温日平均数据。降水量表现为减少的趋势,趋势线斜率为-0.0004,其中2006-07-12单次降雨量37.7 mm为观测时段最大值;同一时段气温也表现为降低趋势,趋势线斜率为-0.0012,2005-07-12为观测时段气温最大值20.8 °C,2008-01-28为气温最小值-21.9 °C。图2为2002-06-01—2008-05-31气温和降水的6a逐月平均值,气温和降水曲线的年内变化过程相似,在5—9月期间气温和降水均属于全年的极大值阶段。

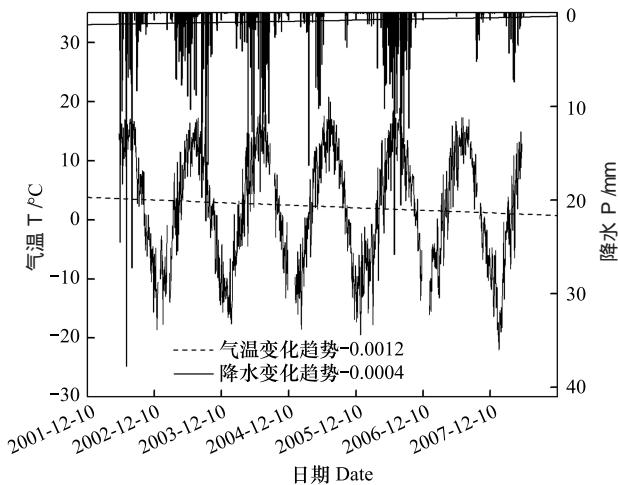


图1 排露沟流域降水与气温变化日变化

Fig. 1 Precipitation and temperature daily change in Pailugou catchment

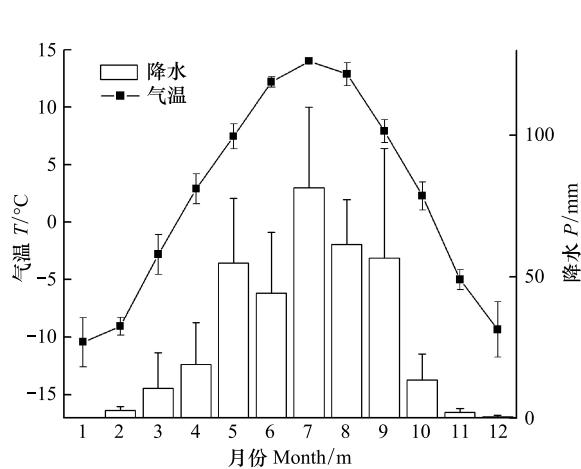


图2 2002-06-01—2008-05-31间气温和降水6a逐月平均

Fig. 2 Precipitation and temperature monthly mean change in 2002-06-01—2008-05-31

3.2 土壤水热变化特征

图3和图4分别给出了土壤水热的日变化格局,结合图2可知浅层土壤水热值在每年的5—9月期间处于全年的极大值过程,由于山区雨季主要出现在夏季,所以土壤水热曲线在夏季的波动显著,同时受气温影响,土壤水热变化在春季、秋季和冬季相对稳定。

土壤温度的年内变化特征与气温一致(图3),呈“单峰型”,在年内表现为明显的波峰与波谷的交替变化过程,同时各层次土壤温度年内的变化幅度随深度增加而减小,但120 cm与160 cm的年内变化中波谷形状相对波峰稍有差异,在出现极小值后会出现一个转折,波形在一段时间内趋于较为平缓的变化。随着深度增加土壤温度的变化周期与空气温度存在滞后期,滞后时间随深度增加而增加;不同层次的土壤温度变化趋势与气温一致,如20—160 cm的趋势线斜率分别为-0.0021,-0.0021,-0.0021,-0.0018,-0.0012,-0.0009。其中20—60 cm的土壤温度趋势线斜率近似相等,从80—160 cm趋势线斜率逐步减小,结合各土层间的温度滞后时间,20—60 cm属于土壤温度变化相似层,即相互间土壤热传导性质差异较小。其次土壤温度趋势线斜率随深度加深而减小,说明在0—160 cm深度内气温对土壤温度影响随深度加深而降低。

对6a的土壤温度进行统计分析表明:土壤温度6a日平均最低值为80 cm的1.32 °C,最高值为表层20 cm的1.95 °C。土壤温度的年平均变异系数CV最大值为60 cm的0.556,最小值为160 cm的0.314(此处土壤温度的年变异系数以土壤年平均温度的标准偏差与6a年平均值之比计算)。其次不同月份的分析结果表明受温度滞后效应的影响,不同深度土壤温度和变异系数的极值发生顺序在不同月份有所差异。

土壤水分年内变化特征较为复杂(图4),从20—80 cm深度的土壤水分年内变化易受外界降水过程的影响,土壤水分曲线呈“多峰型”变化,土壤水分极值的大小和出现频率随深度增加而减小。120 cm和160 cm深度土壤水分变化平缓,曲线为“单谷型”,即年内变化周期没有明显的极值变化过程,但在每年的3—6月期

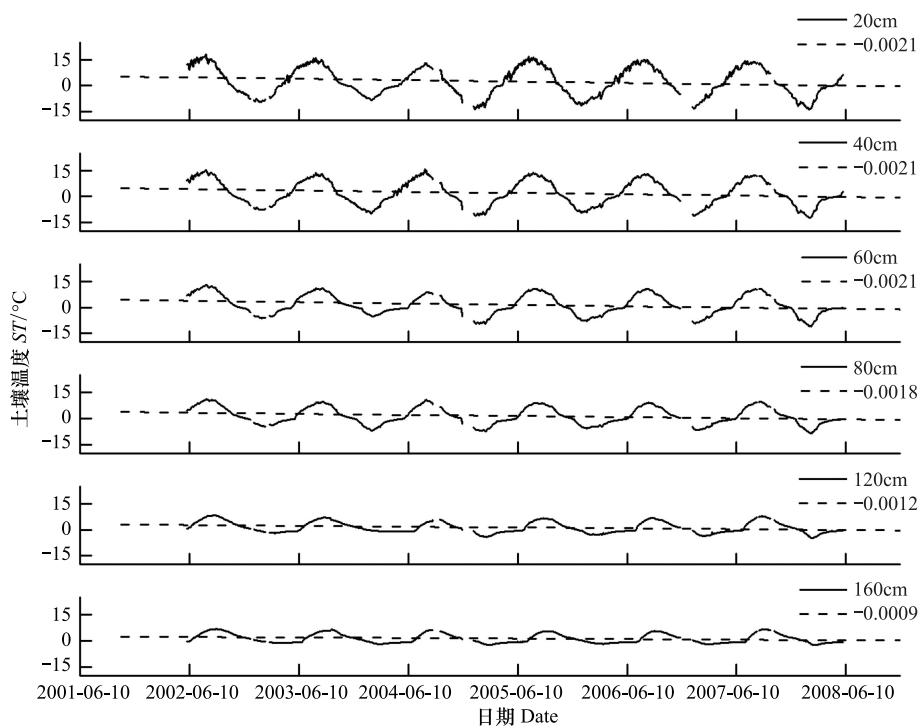


图3 土壤温度日变化特征,虚线为趋势线

Fig. 3 Soil temperature daily variation features, dashed line is trend line

间土壤水分会处于一个变化平缓的低谷期。

与土壤温度不同的是各层土壤水分的变化趋势与降水趋势并不一致,如20—160 cm土壤水分趋势线斜率分别为0.0021,-0.0001,0.0025,-0.0003,0.0018,0.0014。其中除40 cm和80 cm土壤水分表现为减少外,其它层次土壤水分均表现为增加趋势。由于土壤蒸散发是表层土壤主要的土壤水分损失过程,表层土壤水分的损失会增加对深层土壤水分的上升吸力,进而导致深层土壤水分的减少,因此气温减低趋势对土壤温度的影响有助于减少土壤蒸发量,但是对于40 cm和80 cm深度的土壤水分变化不仅需要考虑土壤温度对土壤水分的影响,还存在植被根系的吸水作用的影响。

测点土壤水分6a平均最大值出现在20 cm土层(17.1%),最小值为120 cm(11.7%)。日平均的最大值为20 cm(35.1%),最小值为80 cm(5.4%)。变异系数CV最大值出现在40 cm(0.468),极小值为160 cm(0.142)。

3.3 季节性冻融过程

山区土壤水热特征表明存在季节性冻土(图3,图4),其冻融过程随深度表现为:先由浅层土壤开始冻结(融化),逐渐向深层发展,土壤水分表现为随深度增加而逐步减少(增加)的特点。土壤的冻融过程均在一定温度范围内进行,但各土层冻融的起始和结束温度存在差异,这可能与不同深度土壤水分的溶质浓度不同有关。此外,土壤水分在冻结和融化过程对气象要素的响应不同:处于冻结阶段时,土壤表层先冻结,此时的降水过程表现为固态雪,对深层土壤水分没有影响,仅有温度要素成为影响土壤水分的主要因子;但在融化阶段,20—80 cm深度的土壤水分变化不仅与本层次土壤温度上升致使冻土消融有关,还受上一层次土壤融化时水分下渗和降雨下渗的共同作用,不过土壤融化和降雨下渗仅对浅层20—80 cm的土壤水分产生影响,而120 cm和160 cm深度的土壤冻结和融化过程主要受温度变化控制。进一步分析不同土壤层次间冻融时间差(图5)可知,不同深度土层的冻融时间存在较大差异。从20 cm土壤温度到达0 °C开始,依次计算其它深度土壤温度到达0 °C时的时间与前一土层的差值 Δt_i ,可知80—120 cm的土壤冻结和融化时间差均为最大值,分别为25d和22d。冻结时间差的最小值为20—40cm的12d,融化时间差的最小值为60—80cm的13d。

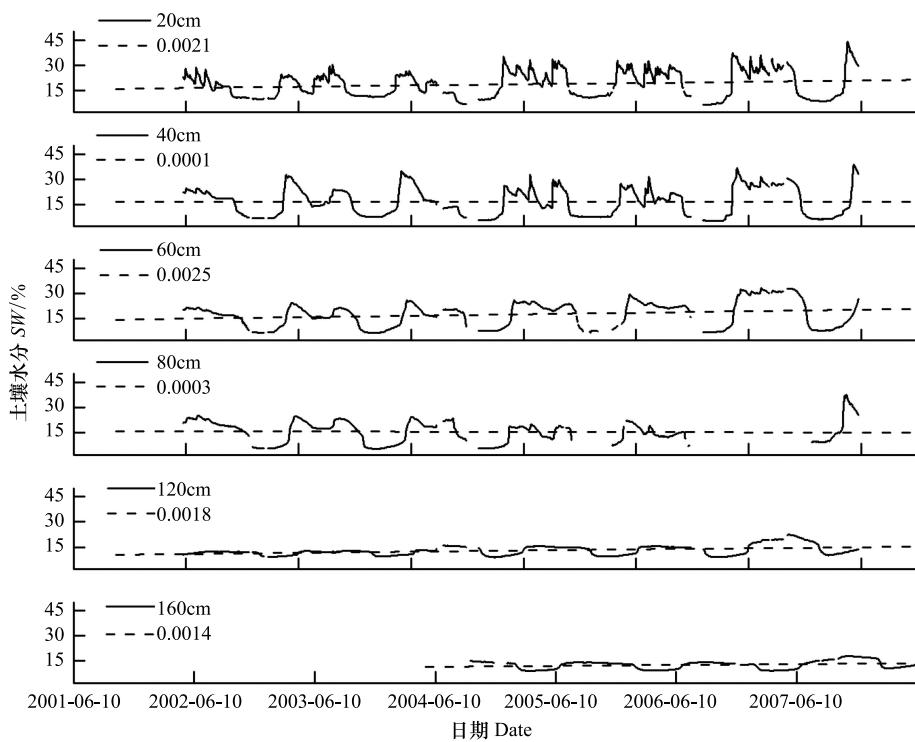


图4 土壤水分日变化特征,虚线为趋势线

Fig. 4 Soil volume water content variation features, dashed line is trend line

3.4 土壤水热对气象要素的响应

多元逐步回归过程可以较好的解释不同自变量对因变量的作用大小,故以不同层次的土壤水分和温度作为因变量,将气温、降水、辐射、饱和水汽压差和风速等气象要素作为自变量进行多远逐步线形回归,可找出影响土壤水分和温度的主要气象因子,同时还可以根据最后的回归结果建立气象要素对土壤水分和温度的经验预报方程。

基于观测数据的逐日平均结果,分析了土壤水热与外界气象要素的统计关系。图6给出了主要的气象控制因子与土壤温度的关系。土层20—160 cm土壤温度的主要气象控制因子均为气温T,与气温的相关系数R随深度逐步减小,表层20 cm土壤温度与气温的相关性最好为0.903,深层160 cm的相关性最小为0.278,进一步证明土壤温度随深度变化与气温存在的滞后时间越来越长。

图7为土壤水分的主要气象控制因子,其结果与土壤温度相比更复杂。如20—80 cm的主要气象因子为气温T成正相关,其中20 cm土壤水分与气温的相关性最好为0.643。但120 cm和160 cm却为向上净辐射Ru成负相关,其中160 cm土壤水分与向上净辐射的相关性最差为-0.117。

气象要素中降水因子与土壤水分的统计结果不显著,可能是由于降水数据为非连续型数据,而土壤水分和其它气象要素为连续型数据,这影响了其统计结果。同时在日变化过程中降水只是作为土壤水分来源的输入参量,其雨后变化过程主要受其它气象要素以及土壤属性、地形和植被的综合作用。

由于气象要素的日变化远比土壤水分和温度变化剧烈,在日尺度上的主要气象控制因子随时间尺度的变

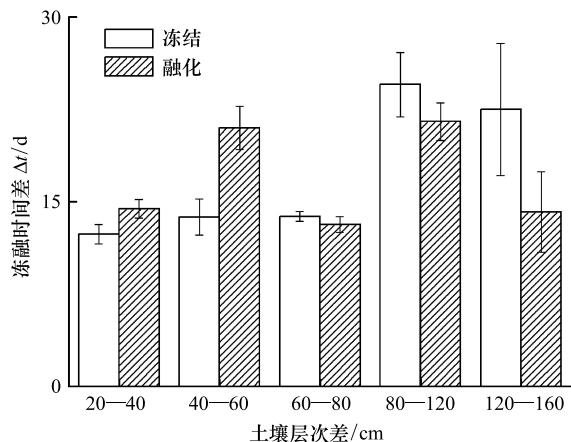


图5 土壤冻融滞后时间

Fig. 5 Lag time between different soil depth at freezing and melting phase

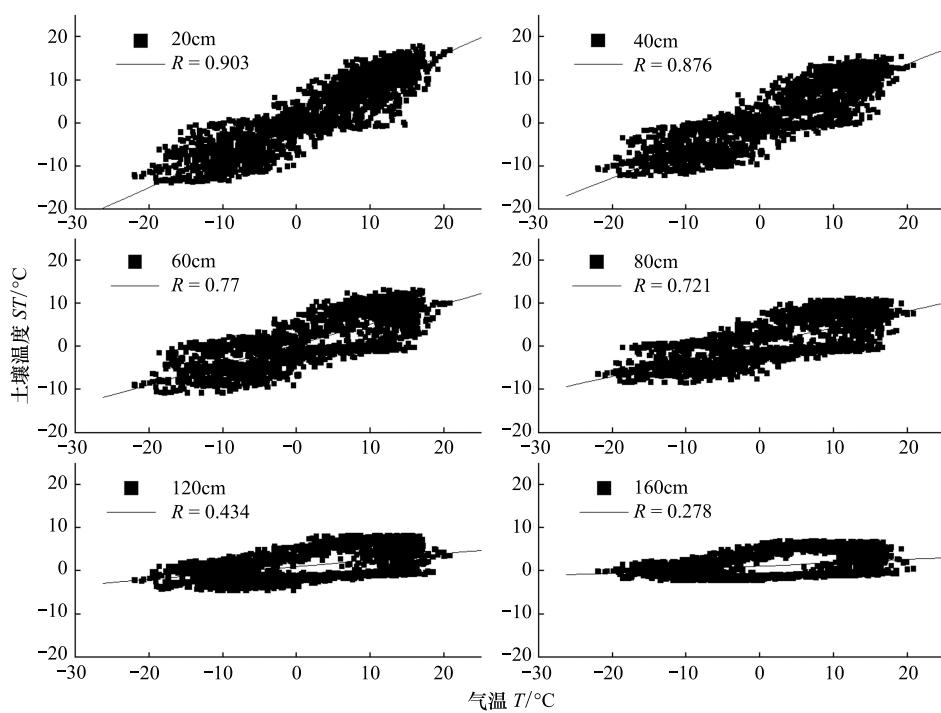


图 6 土壤温度对气象要素的响应

Fig. 6 Soil temperature control facts of meteorological

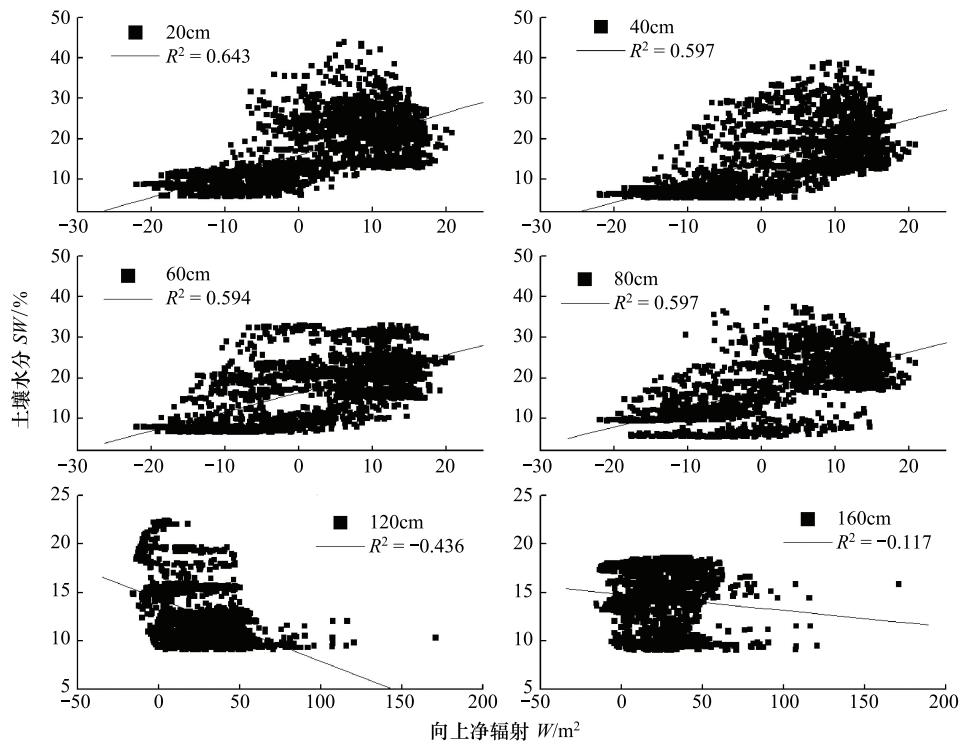


图 7 土壤水分对气象要素的响应

Fig. 7 Soil moisture control facts of meteorological

化而产生差异,如月平均的结果表明饱和水汽压差和空气相对湿度对土壤水分和温度也有一定影响,表1,2给出了统计结果。土壤温度月尺度上的气象控制因子为气温 T 和空气相对湿度 RH ,而日尺度的控制因子仅

为气温 T ; 土壤水分月尺度的气象控制因子为气温 T 、饱和水汽压差 VPD 和向上净辐射 Ru , 日尺度为气温 T 和向上净辐射 Ru 。其次月尺度上主要气象控制因子对土壤水分和温度的影响更加明显, 其判定系数 R^2 除 60 cm 深度的土壤水分外, 均优于日平均结果, 如 20 cm 土壤温度 R^2 为 0.938, 明显高于日尺度的 0.789。

表 1 土壤温度与主要气象因子的统计关系

Table 1 Statistical relationship of soil temperature and mainly meteorological factor

时间 Time	指标 Index	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	120 cm	160 cm
日平均	气象因子 meteorological factor	T	T	T	T	T	T
Daily average	判定系数 R^2	0.789	0.779	0.539	0.51	0.139	0.082
月平均	气象因子 meteorological factor	T	T	T	T	RH	RH
Monthly average	判定系数 R^2	0.938	0.848	0.716	0.573	0.355	0.26

结果均通过显著性水平 0.01 检验, 表中 T, RH 分别表示气温(℃)和空气相对湿度(%)

表 2 土壤水分与主要气象因子的统计关系

Table 2 Statistical relationship of soil moisture and mainly meteorological factor

时间 Time	指标 Index	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	120 cm	160 cm
日平均	气象因子 meteorological factor	T	T	T	T	Ru	Ru
Daily average	判定系数 R^2	0.394	0.434	0.38	0.349	0.218	0.567
月平均	气象因子 meteorological factor	T	VPD	VPD	VPD	Ru	Ru
Monthly average	判定系数 R^2	0.457	0.468	0.302	0.401	0.529	0.642

结果均通过显著性水平 0.01 检验, 表中 T, Ru, VPD 分别表示气温(℃)、向上净辐射(W/m^2)和饱和水汽压差(hPa)

最后给出了 20、40 cm 和 60 cm 的月尺度土壤温度与气象要素的统计方程:

$$ST_{20} = -15.497 + 0.767T - 0.039Rd + 0.145RH + 21.502VPD \quad R^2 = 0.981$$

$$ST_{40} = 0.91 + 1.037T - 0.05Rd + 0.116RH \quad R^2 = 0.955$$

$$ST_{60} = 1.872 + 0.935T - 0.05Rd + 0.12RH \quad R^2 = 0.915$$

式中, ST 为土壤温度(℃), 20, 40, 60 分别代表土壤深度(cm); T 为气温; Rd 为向下总辐射(W/m^2); RH 为空气相对湿度(%); VPD 为饱和水汽压差(hPa)。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过 6a 的连续观测数据, 分析了阴坡草地不同深度土壤水分和温度的年内变化特征和年际变化趋势以及与气象要素的统计关系, 其主要结论如下:

1) 土壤温度年内变化与气温一致, 但存在滞后期, 滞后时间随深度增加而增加; 土壤温度年际变化与气温相似, 呈逐渐降低趋势。

2) 土壤水分年内变化复杂。浅层土壤水分年内变化易受外界降水过程的影响, 深层 120 cm 和 160 cm 深度土壤水分变化平缓。不同深度土壤水分变化趋势与降水存在差异, 40 cm 和 80 cm 表现为减少外, 20、60、120 cm 和 160 cm 均表现为增加。

3) 土壤的季节性冻融过程中主要控制因子为温度, 但 20—80cm 深度的融化阶段除温度外还受上层土壤融化和降雨下渗影响。

4) 土壤水热与气象要素在月尺度上的统计关系好于日尺度。日尺度上控制土壤温度的主要气象因子为气温; 土壤水分为气温、向上净辐射。月尺度土壤温度的气象控制因子为气温、空气相对湿度; 土壤水分为气温、饱和水汽压差和向上净辐射。表层土壤的水热变化对气象因子更敏感, 利用气象要素在月尺度上对 20、40 cm 和 60 cm 土壤温度进行估算的效果最好。

4.2 讨论

(1) 本文的结果主要基于实测数据的统计结果进行分析, 但深层土壤的水热的变化在物理机制上考虑主

要受上下层土壤水热平衡影响。本文从统计上分析了气象要素与深层土壤水分和温度的关系,试图理解气象要素与深层土壤水分和温度的相关关系,进而判断其影响力大小,但两者间的物理机制还需要进一步研究。

(2)结果表明土壤水热的变异系数最大值均不发生在表层,土壤温度的变异系数最大值为60 cm深度,土壤水分最大值为40 cm深度。土壤温度可能是60 cm土层相比浅层20 cm和40 cm容易受深层土壤温度的影响,同时与深层80—160 cm土壤温度相比又属于对外界气温变化敏感层次,故60 cm具有最大的变异系数;土壤水分可能是40 cm土层与深层土壤相比容易受降水入渗影响,且草类根系深度主要位于40 cm^[15],根系吸水的提升作用导致40 cm土壤水分产生剧烈变化。需要注意的是此结论是与排露沟流域的气候特征和植被格局相适应的,对于不存在季节性冻土和不同植被的区域需要重新考虑。

(3)降水是影响土壤水热特征的重要气象因子,本文的统计结果表明降水在日平均和月平均时间尺度上都没进入土壤水热预报方程。有关降水与土壤水分相关关系的结论主要来自大尺度的模拟和实测,同时考虑了前期降水过程对土壤水分的影响,本文是点尺度上的观测结果,重点在于分析日、月2个较短时间尺度下气象要素对土壤水热影响,也没考虑前期降水作用,这可能弱化了降水在土壤水热变化过程中的作用。但本文的结果也表明在点尺度上土壤水热与除降水外的其它气象要素也存在较好的耦合关系。

(4)在6a间山区气温和降水都为降低趋势,但土壤水分除40 cm和80 cm有所减少外,其它层次表现为增加,可能是植物在生长过程耗水量增加,研究区草类和青海云杉根系在40 cm和80 cm深度较为密集。考虑到降水和温度对土壤水分作用的复杂性^[18],杨永辉等^[19]利用实验和模型结合的方法探讨了温度与降水变化对土壤水分的影响,结果表明温度升高3℃将抵消降水增加10%的增益效果。故进一步利用土壤水热模型细化模拟未来温度和降水不同变化幅度对不同深度土层的作用非常重要,可以提高预测山区水文过程的准确性。

(5)在排露沟流域存在放牧现象,从土壤水热的年内变化可知6—9月期间是植被的生长季,此时降水和气温均有利于植被的自我修复,其它时间段水热条件较差,植被状况脆弱,建议山区放牧在6—9月期间,其它时间可以选择圈养,维持草类生长和放牧活动的平衡。

References:

- [1] Brubaker K L, Entekhabi D. Analysis of feedback mechanisms in land-atmosphere interaction. *Water Resources Research*, 1996, 32(5): 1343-1357.
- [2] Sun G, Noormets A, Gavazzi M J, McNulty S G, Chen J, Domec J C, King J S, Amatya D M, Shaggs R W. Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1299-1310.
- [3] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Zhang X L, Meng Q H. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 100-107.
- [4] Kang E S, Chen R S, Zhang Z H, Ji X B, Jin B W. Some problems facing hydrological and ecological researches in the mountain watershed at the upper stream of an inland river basin. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 675-681.
- [5] Brooks J R, Meinzer F C, Coulombe R, Gregg J. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests. *Tree Physiology*, 2002, 22: 1107-1117.
- [6] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, Bonan G, Chan E, Cox P, Gordon C T, Kanae S, Kowalczyk E, Lawrence D, Liu P, Lu C H, Malyshev S, McAvaney B, Mitchell K, Mocko D, Oki T, Oleson K, Pitman A, Sud Y C, Taylor C M, Verseghy D, Vasic R, Xue Y K, Yamada T. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305: 1138.
- [7] Kang E S, Cheng G D, Song K C, Jin B W, Liu X D, Wang J Y. Simulation of energy and water balance in Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer system in the mountain area of Heihe River Basin at Hexi Corridor of northwest China. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2005, 48(4): 538-548.
- [8] Huang Z H, Zhou G Y, Morris J, Chu G W, Zhang N N, Yin G C. Effects of canopy meteorological factors on soil moisture content during rainy seasons in an eucalypt plantation. *Journal of Typical And Subtropical Botany*, 2003, 11(3): 197-204.
- [9] He Z B, Zhao W Z. Variability of soil moisture of shifting sandy land and its dependence on precipitation in semi-arid region. *Journal of Desert*

- Research, 2002, 22(4) : 359-362.
- [10] Porporato A, D'Odorico P, Laio F, Ridolfi L, Rodriguez-Iturbe. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. Advance Water Research, 2002, 25 (8/12) : 1335-1348.
- [11] Daly E, Porporato A. A review of soil moisture dynamics: from rainfall infiltration to ecosystem response. Environmental Engineering Science, 2005, 22(1) : 9-24.
- [12] Koster R D, Suarez M J, Higgins R W, van den Dool H M. Observational evidence that soil moisture variations affect precipitation. Geophysical Research Letters, 2003, 30(5) : 1241.
- [13] Schär C, Lüthi D, Beyerle U, Heise E. The soil-precipitation feedback: a process study with a regional climate model. Journal of climate, 1999, 12(4) : 722-741.
- [14] Zuo Z Y, Zhang R H. The spring soil moisture and the summer rainfall in eastern China. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14) : 1722-1724.
- [15] Liu H, Zhao W Z, He Z B, Zhang L Z. Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian Mountain Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5) : 2389-2394.
- [16] Dang H Z, Zhao Y S, Chen X W, Li J J, Da G W, Zhu Y W. Soil water characteristics in *Picea crassifolia* forestry lands in Qilian Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7) : 1148-1152.
- [17] Wang J Y, Tian D L, Wang Y H, Wang X L. Study on soil moisture content status of forest and grass complex watershed in Qilian Mountains. Journal of Central South Forestry University, 2006, 26(1) : 1-5.
- [18] Camargo, J L C, Kapos V. Complex edge effects on soil moisture and microclimate in central Amazonian forest. Journal of Tropical Ecology, 1995, 11(2) : 205-221.
- [19] Yang Y H, Masataka W, Wang Z P, Wang Q X, Liu C M, Zhang W J. Impacts of temperature and precipitation changes on soil moisture of Taihang Mountains. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(1) : 56-63.

参考文献:

- [3] 邱扬,傅伯杰,王军,张希来,孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2007, 26(1) : 100-107.
- [4] 康尔泗,陈仁升,张智慧,吉喜斌,金博文. 内陆河流域山区水文与生态研究. 地球科学进展, 2008, 23(7) : 675-681.
- [7] 康尔泗,程国栋,宋克超,金博文,刘贤德,王金叶. 河西走廊黑河山区土壤-植被-大气系统能水平衡模拟研究. 中国科学(D辑:地球科学), 2004, 34(6) : 544-551.
- [8] 黄志宏,周国逸,Morris J,褚国伟,张宁南,尹光彩. 桉树人工林冠层气象因子对雨季土壤水分的影响. 热带亚热带植物学报, 2003, 11 (3) : 197-204.
- [9] 何志斌,赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖. 中国沙漠, 2002, 22(4) : 359-362.
- [14] 左志燕,张人禾. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系. 科学通报, 2007, 52(14) : 1722-1724.
- [15] 刘鹄,赵文智,何志斌,张立杰. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性. 生态学报, 2008, 28(5) : 2389-2394.
- [16] 党宏忠,赵雨森,陈祥伟,李进军,达光文,朱有文. 祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究. 应用生态学报, 2004, 15(7) : 1148-1155.
- [17] 王金叶,田大伦,王彦辉,王顺利. 祁连山林草复合流域土壤水分状况研究. 中南林学院学报, 2006, 26(1) : 1-5.
- [19] 杨永辉,渡边正孝,王智平,王勤学,刘昌明,张万军. 气候变化对太行山土壤水分及植被的影响. 地理学报, 2004, 59(1) : 56-63.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat	MA Chang'an, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)
Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique	SUN Caizhi, YANG Lei (1016)
Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing	HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)
The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy	GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)
Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes	SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)
Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors	TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)
Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (<i>Picea crassifolia</i>) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains	TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)
Response of tree-ring width of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> to climate change in Hulunbuir sand land, China	SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)
Analysis of a dust case using lidar in Shanghai	MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)
Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses	TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)
Phenotypic traits of both larvae and juvenile <i>Crasstrea hongkongensis</i> and <i>C. gigas</i>	ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)
Inter-specific competition between <i>Prorocentrum donghaiense</i> and <i>Skeletonema costatum</i>	LI Hui, WANG Jiangtao (1115)
Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species	WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)
On the ecological amplitude of nitrate of <i>Alexandrium tamarensis</i> at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures	WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)
Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary <i>Pinus tabulaeformis</i> on precipitation in the Qinling Mountains, China	CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)
The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern	TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jiangui (1151)
Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant <i>Tetraena mongolica</i> Maxim. and the closely related <i>Zygophyllum xanthoxylon</i> (Bunge) Maxim.	SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)
Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress	SHAN Changjuan, HAN Ruilan, LIANG Zongsuo (1174)
The effects of the addition of <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (<i>Citrullus lanatus</i>) site in China	XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)
Suitable habitat for the <i>Achnatherum splendens</i> community in typical steppe region of Inner Mongolia	ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)
Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district	GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)
Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau	LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)
Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt	ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)
The evaluation system of strength of winterness in wheat	WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)
A comparison of summer habitats selected by sympatric <i>Apodemus chevrieri</i> and <i>Apodemus draco</i> in Tiangjiahe Nature Reserve, China	LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)
Life tables for experimental populations of <i>Frankliniella occidentalis</i> on 6 vegetable host plants	CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)
Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach	ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)
Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing	XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)
Seasonal characteristics of CO ₂ fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China	SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)
Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of Tuocheng County	WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)
Review and Monograph	
Recent advances in wetland degradation research	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)
A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis	YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)
Discussion	
The diversity of the radio-resistant bacteria <i>Deinococcus radiodurans</i>	TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)
Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of <i>Caragana korshinskii</i>	YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)
Scientific Note	
Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain	LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)
Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild <i>Cryptotaenia japonica</i>	YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:1000717

印 刷 北京北林印刷厂
行 销 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563

订 购 国外发行
E-mail:journal@cspg.net
全国各地邮局
中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营
许 可 证
京海工商广字第 8013 号

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

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933
9 771000093125
0 4 >