

黄土丘陵沟壑区农林草地土壤热量状况及植被生长响应 ——以燕沟流域为例

王 力^{1,2,*}, 卫三平^{1,2,3}, 吴发启¹

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 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; 3. 山西省吕梁市水利局, 山西 离石 033001)

摘要:利用 CoupModel 模型模拟了黄土丘陵沟壑区燕沟流域刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林地、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 林地、荒草地、农地等 7 种土地类型的土壤热量状况, 分析了不同植被类型的潜热通量、感热通量、土壤热通量以及植被生长对土壤热量的响应。结果表明, 农地潜热通量较小, 林地和荒草地潜热通量较大, 各地类潜热通量季节变化规律基本一致。潜热通量是黄土丘陵区土壤-植被-大气系统能量的主要支出项, 占总净辐射的 72.1% ~ 81.4% 以上; 感热通量变化振幅相对较小, 占总净辐射的 16.4% ~ 26.4%; 土壤热通量仅占总净辐射的 1.4% ~ 2.4%, 但直接影响土壤温度的变化速度和变化时间。试验地各地类地表温度随季节的变化趋势均呈单峰曲线型。2 ~ 7 月份 0 ~ 20cm 平均土壤温度随累积土壤热通量的增大而升高, 9 月到翌年 1 月份 0 ~ 20cm 平均土壤温度随累积土壤热通量的减小而降低, 但累积土壤热通量的变化滞后于土壤温度变化。同一植被类型条件下, 阳坡土壤温度年变幅显著高于阴坡。在阴坡, 0cm、10cm、20cm 深土壤温度年变幅农地 > 阴坡荒草地 > 阴坡辽东栎林地 > 阴坡刺槐林地; 在阳坡, 阳坡荒草地 > 阳坡刺槐林地 > 阳坡辽东栎林地。阴坡刺槐林地、阴坡荒草地和农地 0 ~ 20cm 土壤温度达到 5℃ 以上的时间比阳坡刺槐林和阳坡荒草地推迟 1 周左右, 根系开始生长活动的时间也推迟 1 周左右; 而阴坡辽东栎林地则晚于阳坡辽东栎林地 5d 左右, 根系开始生长活动的时间也较阳坡辽东栎林晚 5d 左右。出叶时间阳坡刺槐林和阳坡荒草地植物比阴坡刺槐林、阴坡荒草地和阳坡辽东栎林的早 1 周左右, 比阴坡辽东栎林早 12d 左右。

关键词:黄土丘陵沟壑区; 土壤温度; 土壤热通量; 植被生长响应

文章编号: 1000-0933(2009)12-6578-11 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Soil heat and response of vegetation growth in the loess hilly and gully region : a case study of Yangou Catchment

WANG Li^{1,2,*}, WEI San-Ping^{1,2,3}, WU Fa-Qi¹

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China

3 Bureau of Water Conservancy in Lüliang City, Lishi 033001, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6578 ~ 6588.

Abstract: An energy balance was simulated under *Robinia pseudoacacia* woodlands, *Quercus liaotungensis* woodlands, grasslands and farmland with CoupModel in the Yangou Catchment of the hilly and gully region of the Loess Plateau. The impact of vegetation on latent heat flux, sensible heat flux and soil heat flux in sample-plots were studied. The results showed that latent heat fluxes in woodlands and grasslands were higher than in farmland, and the majority of energy released was by latent heat flux accounting for 72.1% — 81.4% of total net radiation. The changes in latent heat flux in all experimental plots were similar, revealing peak values between July to August and minimum values between November and the following April. Energy released by sensible heat flux accounted for 16.4% — 26.4% of net radiation, and sensible heat fluxes peaked between April and May and saw minimums between August and September. Soil heat flux accounted for only

基金项目:西北农林科技大学 2007 青年学术骨干支持计划资助项目; 国家自然科学基金资助项目(40501031/90502006); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-227)

收稿日期: 2009-06-02; 修订日期: 2009-08-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn; wangli5208@163.com

1.4%—2.4% of net radiation, but had a direct effect on the timing and speed of soil temperature changes. The change of soil temperature showed a unimodal curve for all experimental plots. Soil temperature rose from February to July and decreased from August to January. Soil temperature went down gradually with soil depth from February to September and increased with soil depth from October to the following January. The average annual amplitude of soil temperature down to a 20 cm depth in north-facing slopes decreased in the following order: farmland, grassland, *Q. liaotungensis* woodland, *R. pseudoacacia* woodland. On south-facing slopes, the amplitude in temperature decreased in the order of grassland, *R. pseudoacacia* woodland and *Q. liaotungensis* woodland. Vegetation growth was apparently affected by soil temperature. The date of leafing in grassland and *R. pseudoacacia* woodland on south-facing slopes occurred 1 week earlier than the same treatments in north-facing slopes as well as *Q. liaotungensis* woodland on the south-facing slope. Leafing in grassland and *R. pseudoacacia* woodland on south-facing slopes also preceded leaf out in *Q. liaotungensis* woodland on the north-facing slope by 12 days.

Key Words: loess hilly and gully region; soil heat; soil heat flux; response of vegetation growth

土壤热量是绿色植物生长所必需的最基本条件,土壤热状况影响植被的结构类型、分布特点以及群落的稳定性,反之,植物生长状况在一定程度上又对土壤温度具有适应性和反作用的特征^[1~3]。不同的植被类型土壤-植被-大气系统水分和能量的传输特征不同,形成不同的土壤热量环境。因此研究土壤热量状况对了解土壤能量流动和物质交换规律、促进退化生态系统植被恢复具有重要意义^[4,5]。在黄土高原地区,有关土壤水分与植被互动关系的研究很多,但土壤热量与植被生长响应方面的系统研究还少见报道。本文选择陕北黄土丘陵区天然辽东栎林、人工刺槐林、荒草地、农地 4 种植被类型为研究对象,研究土壤热量变化和植被生长的响应,分析植被、气象条件和土壤热量环境变化的互动规律,旨在为黄土丘陵区乃至类似地区林草植被建设提供科学依据。

1 研究地概况

试验地选在陕北延安市南部的燕沟流域。流域总面积 46.88 km²,位于 N36°28′~36°32′,E109°20′~109°35′,属黄土高原丘陵沟壑区第Ⅱ副区,地形主要以黄土梁状丘陵为主,沟壑密度 4.8 km·km⁻²,土壤侵蚀模数 6 000~9 000 t·km⁻²·a⁻¹,为强度水土流失类型区。流域处于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡带,多年平均降水量为 558.4 mm,年平均气温 9.8℃,≥10℃积温 3 268℃,年日照时数 2 472 h,无霜期约 170 d。成土母质为黄土,土壤以黄绵土为主,占 90%以上。流域内零星残存的天然次生林覆盖率不足 10%,现有人工林主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana Korshinskii*),经济林主要为苹果(*Malus pumila*)^[6]。

刺槐林是该区最主要的人工林植被,试验地刺槐林为 1979~1980 年栽植,后经过间伐。天然辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林为 25 林龄以上的成林,林下灌木生长茂密而草本稀疏。荒草地为天然生长的植被群落。农地 2006 年种植马铃薯(*Solanum tuberosum* L.),2007 年种植谷子(*Setaria italica* L.),常规大田管理。

2 研究方法

2.1 标准地调查

共选择 7 种地类,分别是阳坡刺槐林、阴坡刺槐林、阳坡辽东栎林、阴坡辽东栎林、阳坡荒草地、阴坡荒草地和农地。试验从 2006 年 5 月 27 日开始至 2007 年 10 月 31 日结束。每种地类布设 2 块标准地(林地 20 m×20 m,其他地类为 10 m×10 m),采用常规群落调查方法调查试验地基本情况(表 1)。

2.2 观测项目及观测方法

2.2.1 气象要素

在阴坡和阳坡刺槐林外荒草地上各安装 1 台美国 Davis 仪器设备公司生产的便携式小气候站(Vantage Pro Weather Station),连续观测记录气温、气压、相对湿度、风速、降水、太阳辐射,风速观测高度为 2 m,其他要素观测高度为 1.5 m。小气候站在出厂前已经和标准气象站观测数据进行了校正。小气候站降水量观测高

度为 1.5 m,气象站常规观测高度规定为 70 cm,用标准雨量筒观测值来校正小气候站的降水量观测值,同时在阴、阳坡荒草地上分别安装 1 台标准雨量筒观测降水。由于小气候站不能观测降雪量,试验地降雪量采用标准雨量筒观测的降雪量值。

表 1 试验地基本情况

Table 1 The basic conditions of experimental plots

地类 Land type	阳坡 刺槐林 RWSS	阴坡 刺槐林 RWNS	阳坡 辽东栎林 QWSS	阴坡 辽东栎林 QWNS	阳坡 荒草地 GSS	阴坡 荒草地 GNS	农地 Farmland
海拔 Elevation(m)	1195	1195	1317	1323	1195	1195	1235
坡度 Slope gradient(°)	34	25	21	23	34	17	24
坡向 Aspect(°)	130	70	120	320	130	70	80
纬度 Latitude	N36°30"	N36°30"	N36°28"	N36°28"	N36°30"	N36°30"	N36°30"
经度 Longitude	E109°30"	E109°30"	E109°34"	E109°34"	E109°30"	E109°30"	E109°30"
树高 Height(m)	6.91	11.85	6.07	6.83	—	—	—
胸径 DBH(cm)	10.16	14.02	18.83	21.75	—	—	—
密度(株·hm ⁻²) Density(Plant·hm ⁻²)	900	1025	931	987	—	—	25400 (马铃薯) 300000 (谷子)
有机质厚度(cm) Organic thickness	0.8	2.2	2.4	3.5	0	1.0	0
主要植物种类 Main plant species	刺槐、狼牙刺、杠柳、铁线莲、铁杆蒿、茼蒿、长芒草、紫苑、胡枝子、委陵菜等 16 种	刺槐、黄刺梅、杠柳、陕西茼蒿、悬钩子、野葡萄、铁杆蒿、茼蒿、野菊花、隐子草等 22 种	辽东栎、黄刺梅、虎榛子、丁香、山桃、荀子、铁杆蒿、胡枝子、苔草等	辽东栎、黄刺梅、虎榛子、丁香、中华绣线菊、小叶锦鸡儿、荀子、铁杆蒿、胡枝子、苔草等	狼牙刺、杠柳、蒿类、长芒草、胡枝子、紫苑、委陵菜、冰草等	杠柳、悬钩子、铁杆蒿、茼蒿、长芒草、胡枝子、紫苑、委陵菜等	马铃薯(2006 年) 谷子(2007 年)

阳坡刺槐林: *R. pseudoacacia* woodland in south-facing slope(RWSS); 阴坡刺槐林: *R. pseudoacacia* woodland in north-facing slope(RWNS); 阳坡辽东栎林: *Q. liaotungensis* woodland in south-facing slope(QWSS); 阴坡辽东栎林: *Q. liaotungensis* woodland in north-facing slope(QWNS); 阳坡荒草地 Grassland in south-facing slope(GSS); 阴坡荒草地 Grassland in north-facing slope(GNS); 狼牙刺 *Sophora davidii*; 杠柳 *Periploca sepium* Bge; 铁线莲 *Clematis heracleifolia*; 铁杆蒿 *Artemisia sacrorum*; 茼蒿 *Artemisia giraldii* Pamp.; 长芒草 *Stipa bungeana* Trin.; 紫苑 *Aster tataricus*; 委陵菜 *Potentilla chinensis*; 黄刺梅 *Rosa xanthina* Lindl.; 陕西茼蒿 *Viburnum dilatatum*; 悬钩子 *Rosa pungens* Camb; 野葡萄 *Vitis amurensis* Rupr.; 隐子草 *Cleistogenes chinensis*; 野菊花 *Flos Chrysanthemi Indici*; 虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decaisne; 丁香 *Syzygium aromaticum*; 山桃 *Prunus davidiana*; 荀子 *Cotoneaster horizontalis*; 中华绣线菊 *Spiraea chinensis* Maxim; 小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla* Lam; 胡枝子 *Lespedeza bicolor* Turcz.; 苔草 *Carex tristachya*; 冰草 *Agropyron cristatum*; 有机质厚度指枯枝落叶层和腐殖质层总厚度

2.2.2 土壤温度

在 7 种地类各埋设地温表 1 套(包括地面温度表、曲管地温表、地表最低地温表、地表最高地温表),土壤温度的测定深度分别为 0、5、10、15、20cm,每天 8:00、14:00、20:00 观测,地表最低、最高地温仅在 20:00 观测 1 次。0、5、10cm 地温按 4 次观测记录计算日合计,用算术平均法计算日平均值,2:00 0cm 地温用 1/2(当日地表最低地温 + 前一天 20:00 的地表温度)求得,2:00 5cm、10cm 地温分别用 8:00 记录值代替。其他地温按 3 次观测记录计算日合计,用算术平均法计算日平均值。

2.2.3 潜热、感热、土壤热通量

CoupModel(Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system)是一个沿用已久并经数次被修正的一维土壤-植被-大气传输模型(SVAT-models),主要用来模拟土壤-植被-大气系统水、热过程和碳氮的生物过程。本文利用观测的气象数据驱动 CoupModel 模型,模拟了 7 种地类 2006 年 5 月 27 日~2007 年 10 月 31 日的潜热、感热、土壤热通量,并用测定的土壤温度对模型参数进行了校正,对模拟结果进行了验证,模型的详细描述和模拟过程详见卫三平等^[7]和 Jansson 等^[8]。

3 结果与分析

3.1 潜热、感热、土壤热通量

3.1.1 潜热通量

输入土壤-植被-大气系统的总净辐射,主要以潜热、感热、土壤热通量、植被储热等形式耗散。潜热是土壤-植被-大气系统水分相变引起的能量转移,潜热通量的大小首先取决于净辐射通量的总量,但又与该系统的水分条件状况密切联系,如果系统缺水,“无水可蒸”,即使净辐射水平再高,潜热通量也会维持在较低的水平,所以潜热通量水平一定程度上反映系统水分蒸散量的大小。试验地潜热通量的变化见图 1 和图 2。

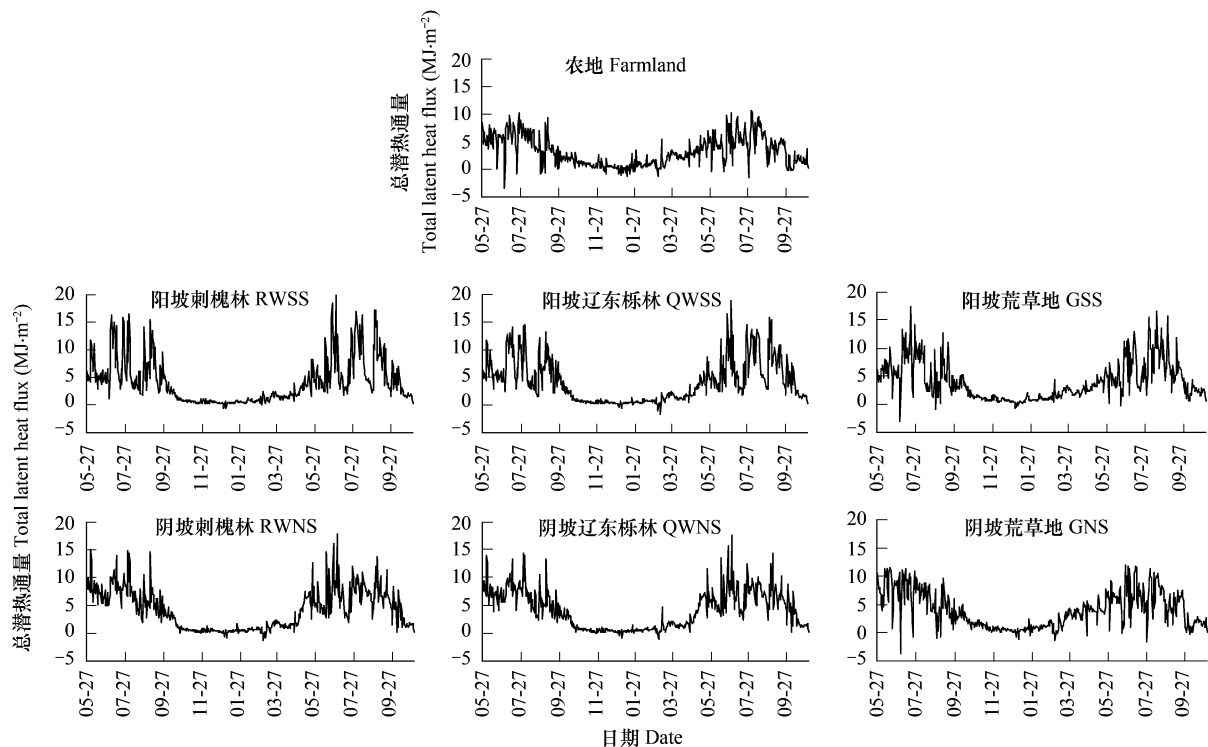


图 1 试验地逐日总潜热通量

Fig. 1 The daily total latent heat flux in experimental plots

由图 1 和图 2 可见,农地潜热通量较小,变化平缓;林地和荒草地潜热通量较大,变化剧烈;阳坡地类的潜热通量一般较阴坡的大 $2 \sim 5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。各地类潜热通量季节变化规律基本一致,11 月至翌年 4 月份最小,随着植被的生长和蒸散量的加大潜热通量也逐渐增大,7~8 月份达到峰值。黄土丘陵区气候干旱,蒸散量较大,因此潜热通量是土壤-植被-大气系统能量的主要支出项,农地、阳坡荒草地、阴坡荒草地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阳坡刺槐林地和阴坡刺槐林地的潜热通量分别占总净辐射的 75.8%、79.4%、81.4%、72.1%、76.3%、75.8% 和 77.7%,植被生长盛期(7~9 月份)各地类潜热通量可占总净辐射的 84% 以上。

3.1.2 感热通量

感热通量主要消耗于近地面层空气的湍流运动,引起周围环境气温的变化。试验期间,各地类感热通量从大到小依次为阳坡辽东栎林、阳坡刺槐林、阴坡辽东栎林、阴坡刺槐林、农地、阳坡荒草地、阴坡荒草地(图 2 和图 3)。与潜热通量的变化相比,感热通量变化振幅较小,而且农地、阳坡荒草地、阴坡荒草地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阳坡刺槐林地和阴坡刺槐林地的感热通量分别只占总净辐射的 21.8%、17.8%、16.4%、26.4%、22.3%、22.1% 和 20.7%。林地感热通量大于荒草地和农地,主要是因为林地粗糙度较大,乱流作用强烈的缘故。感热通量的大小决定于乱流交换系数和温度的垂直梯度,因此阳坡的感热通量大于阴坡,与阳坡气温高于阴坡的实际情况相符。感热通量的季节变化不显著,各地类的感热通量均在 4~5 月份最

大,8~9 月份最小。

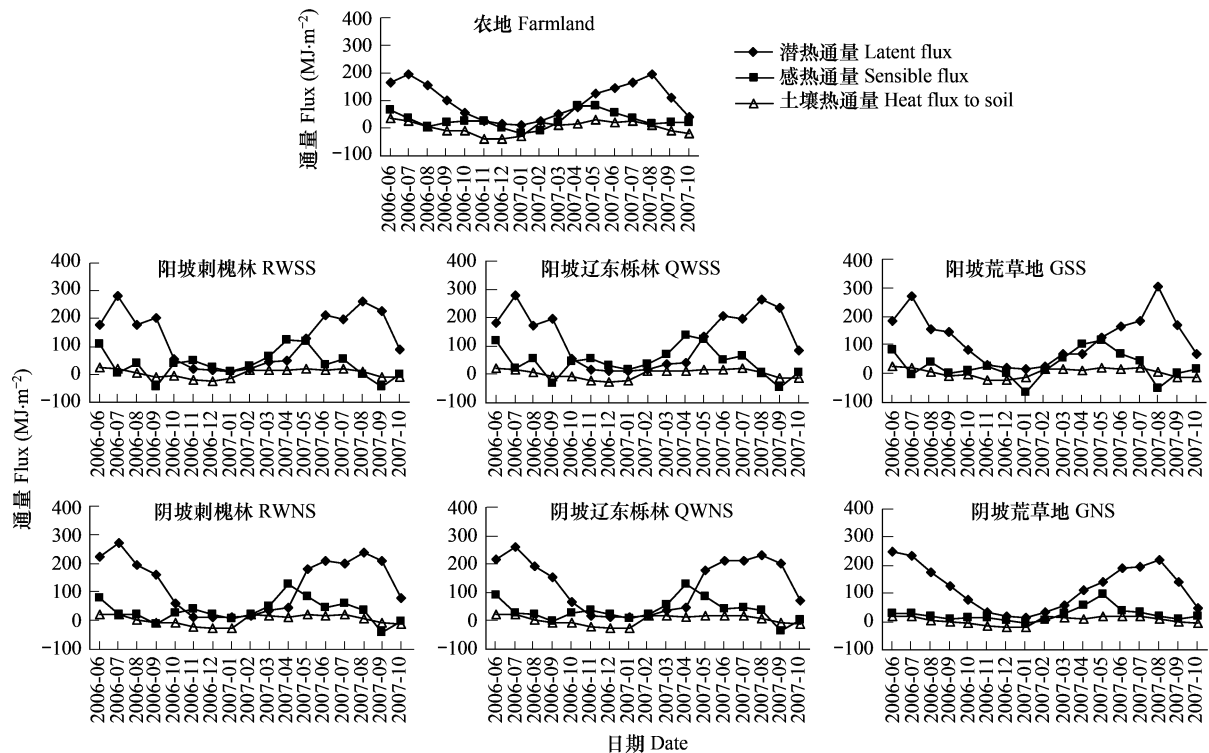


图2 试验地潜热、感热和土壤热通量季节变化

Fig. 2 The seasonal changes of latent heat, sensible heat and heat flux to the soil in experimental plots

3.1.3 土壤热通量

土壤净辐射本身就比较小,加之受植被层遮蔽的影响,土壤热通量占总净辐射的比重很小,农地、阳坡荒地、阴坡荒地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阳坡刺槐林地和阴坡刺槐林地的土壤热通量分别仅占总净辐射的2.4%、2.8%、2.2%、1.6%、1.4%、2.1%和1.6%。土壤热通量不是土壤-植被-大气系统能量的主要支出项,但直接影响土壤温度的变化速度和时间。因植被冠层遮挡太阳辐射,植被下土壤温度梯度以及温度的日变化不显著,所以土壤热交换值比裸地小,土壤热通量较小。林地和阴坡荒地比阳坡荒地和农地植被茂密,土壤热通量较小。各地类土壤热通量9月份开始转变为负值,2月份开始转为正值,但变化缓和,季节变化不明显(图2和图4)。

3.2 不同植被类型土壤热量的变化

3.2.1 土壤温度与土壤热通量的关系

土壤温度的变化主要决定于土壤表面热量的收支状况、土壤热特性以及植被覆盖因素等,土壤热特性基本相同时,土壤温度的升降决定于导入土壤热量的多少。土壤获得能量的多少可以用累积土壤热通量来表示。试验地0~20cm土壤的平均温度与累积土壤热通量的季节动态见图5。2~7月份0~20cm土壤的平均温度随累积土壤热通量的增大而升高,9月至翌年1月份0~20cm土壤的平均温度随累积土壤热通量的减小而降低,且土壤温度的变化超前于累积土壤热通量。1月份累积土壤热通量最低,为负值,土壤向外界释放能量,此时土壤温度也最低;之后随着累积土壤热通量的增加,土壤温度逐渐升高,7月份达到最高,而热通量在8月份才达到峰值,滞后于土壤温度的变化约1个月。2~7月份,土壤含水量相对较低,土壤热容量较小,土壤升温较快;8月份,土壤热通量为正,土壤仍然获得能量,但由于土壤含水量增加,土壤热容量增大,土壤温度并不升高,开始缓慢下降;9月至翌年1月份,土壤获得的能量一般小于释放出去的能量,土壤温度逐渐下降。

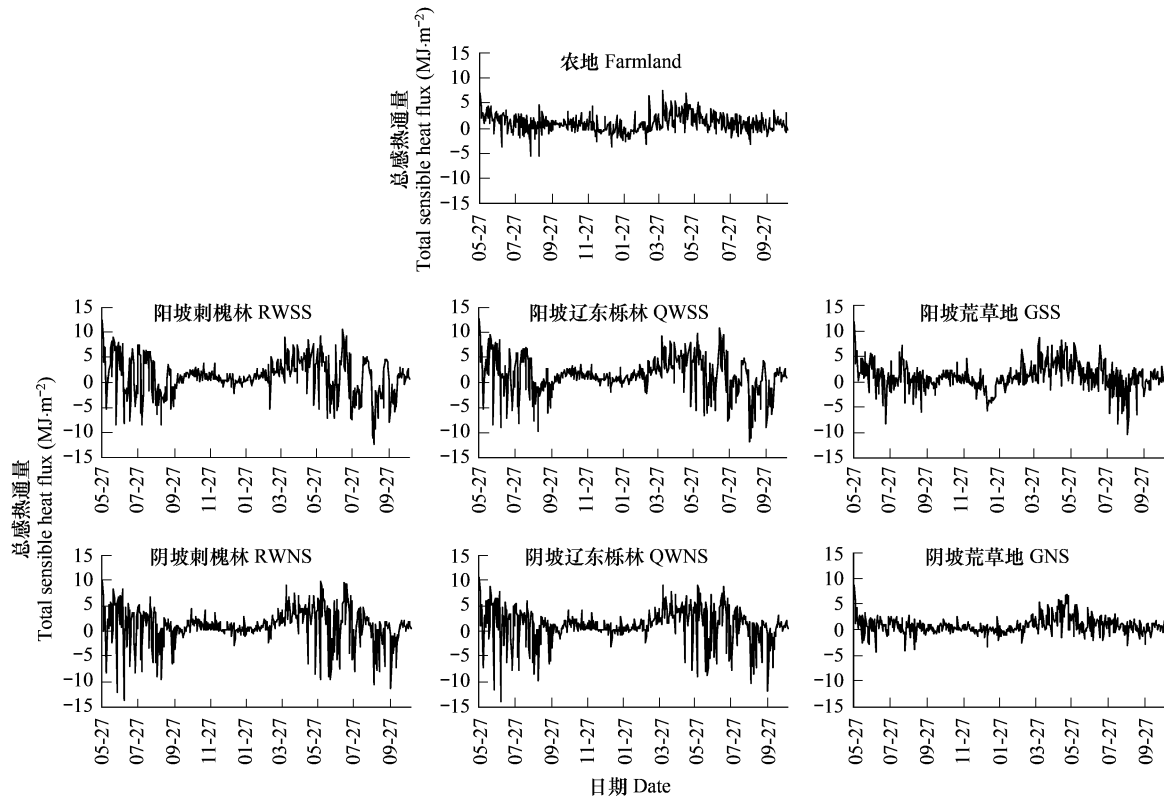


图3 试验地逐日总感热通量

Fig. 3 The daily total sensible heat flux in experimental plots

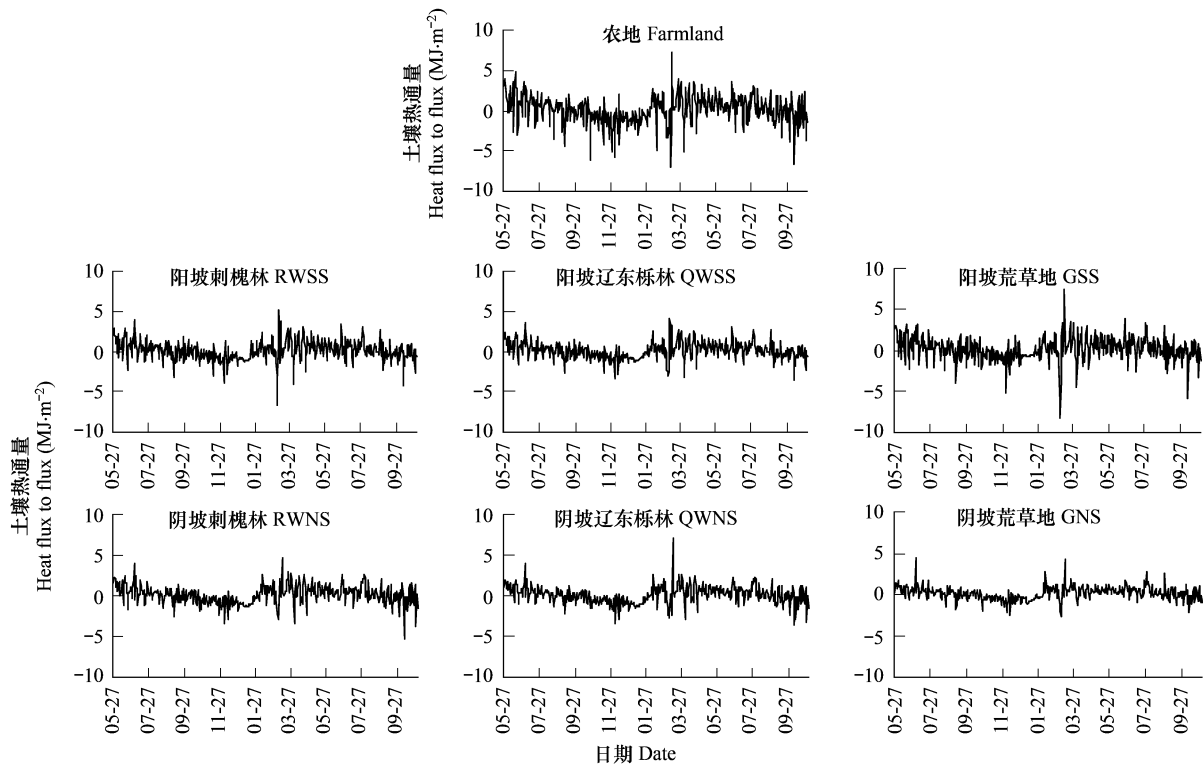


图4 试验地逐日土壤热通量

Fig. 4 The daily heat flux to the soil in experimental plots

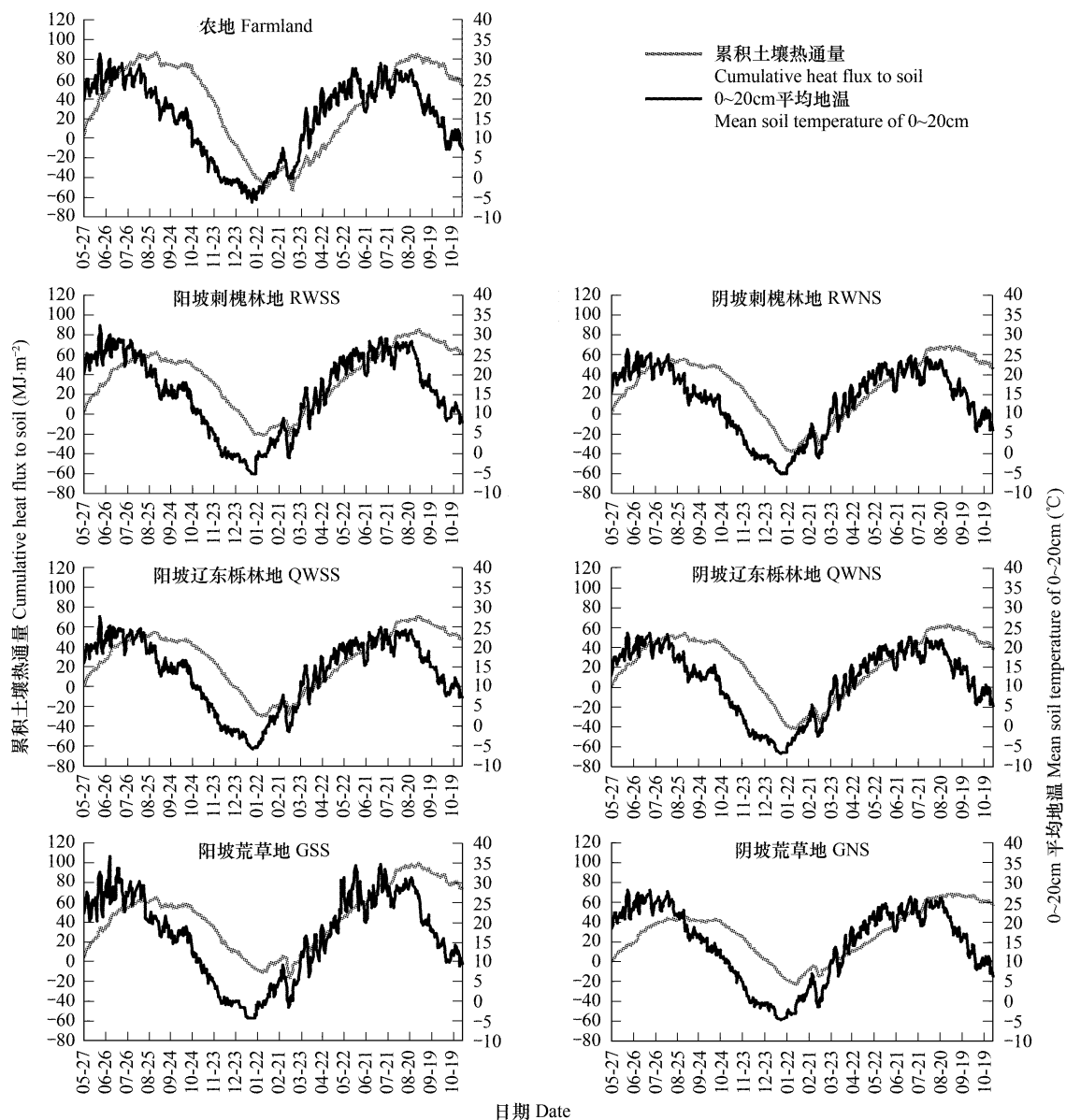


图5 试验地土壤温度和累积土壤热通量季节分布

Fig. 5 The seasonal prevalence of soil temperature and cumulative heat flux to soil in experimental plots

3.2.2 土壤温度的季节变化

由于太阳辐射和植被生长的周期性年变化,土壤温度也出现周期性的变化。试验地各地类地表温度的季节变化趋势均呈单峰曲线型(图6)。7月份达到峰值,1月份最低,分别落后于太阳辐射最高和最低峰值1~2个月。林地地表温度的变化较荒草地和农地缓和,变化振幅较小。各地类地表温度在10月至翌年4月份差异较小,5~9月份差异显著。由于植被覆盖对太阳辐射具有反射和吸收作用^[9,10],生长状况越好,盖度越大,由于遮蔽作用土壤获得的能量越少,土壤温度越低,因此5~9月份不同植被覆盖下土壤温度变化较大。阳坡刺槐林地、阳坡辽东栎林、阳坡荒草地的地表温度远高于阴坡刺槐林地、阴坡辽东栎林低、阴坡荒草地,阳坡地类的地表温度明显高于阴坡相同地类。辽东栎林地海拔较高,地表温度比同坡向的刺槐林地低2℃左右。

各地类0~20cm平均土壤温度的季节变化趋势与地表温度基本一致,1月份最低,7月份最高。2~7月份为升温阶段,8月至翌年1月份为降温阶段。2007年7月份降水多,阴天较多,土壤温度没有达到峰值,比8

月份的土壤温度还低(图7)。

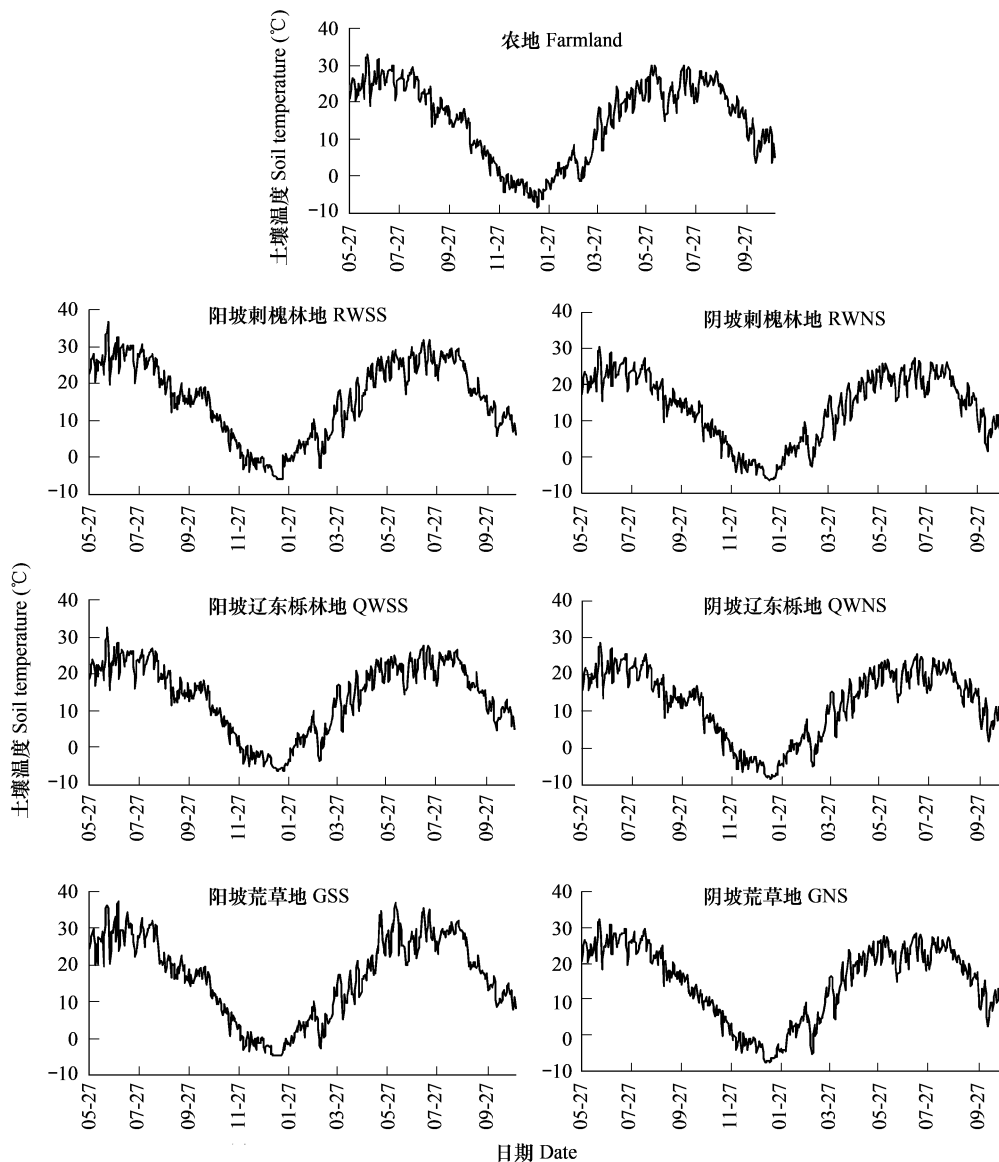


图6 试验地逐日地表温度

Fig. 6 The daily soil surface temperature in experimental plots

3.2.3 土壤温度的垂直变化

由于土壤的导热率小,温度在土壤中的传递较慢,土壤剖面温度具有明显的垂直梯度。受太阳辐射和地面有效辐射的作用,土壤温度随土层深度的变化规律在一年之中不尽相同。各地类土壤温度垂直变化规律大体相同,2~9月份,地表接收的能量多于消耗的能量,表土获得的能量高于底土,地表能量不断向深层传递,表层温度高于深层,土壤温度随土层深度增加逐渐降低(图8);10月至翌年1月份,土壤热通量为负值,土壤向外释放能量,为土壤的降温时期,表土降温快,底土降温慢,深层温度略高于表层,随土层深度增加温度逐渐升高(图9)。

3.2.4 土壤温度的年变幅

植被覆盖能隔断温度传导,缓和土壤温度的年变幅。裸露土壤直接接收太阳辐射,在天气最热的时候变得极热,在寒冷季节则很快丧失热量而变冷。与此相反,由于植被的遮挡,夏季土壤并不像裸地那样热;而冬季植被残茬减少了土壤热量的散失,土壤温度并不像裸地那样冷。试验地各地类土壤温度年变幅见表2。

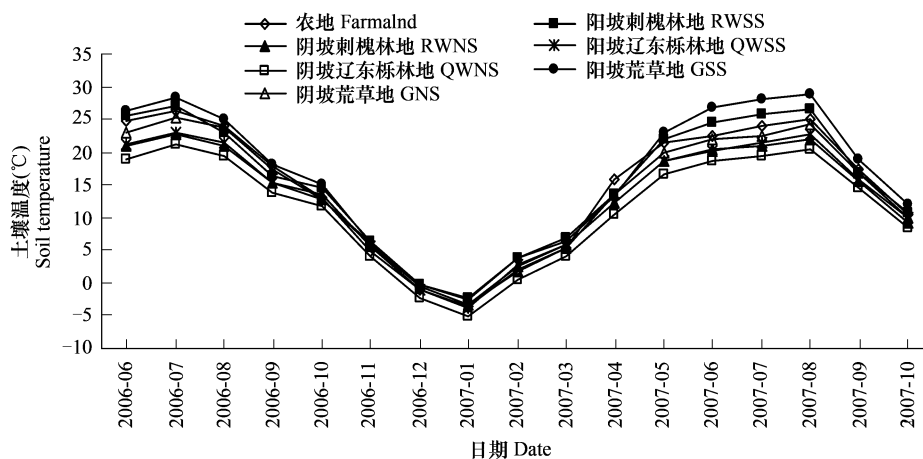


图7 试验地 0~20cm 平均土壤温度季节变化

Fig. 7 The seasonal changes of mean soil temperature from 0 to 20cm depth in experimental plots

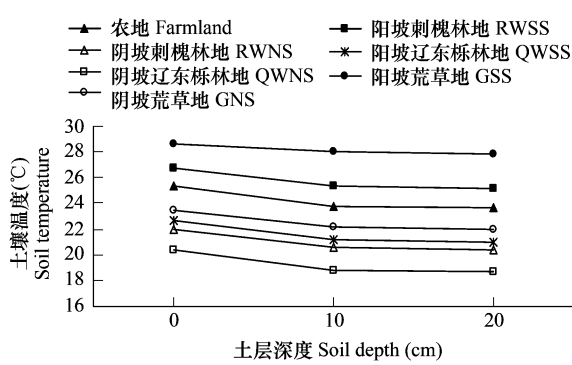


图8 7月份试验地土壤温度垂直变化

Fig. 8 The vertical change of soil temperature in experimental plots in July

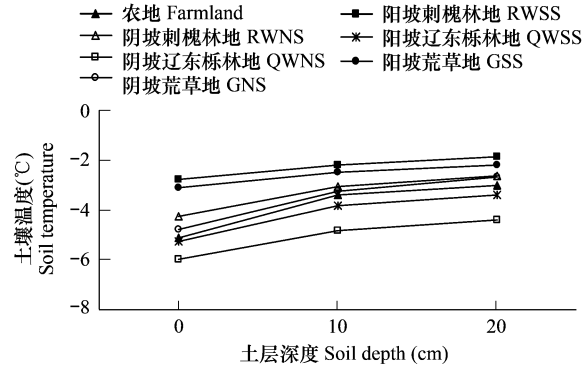


图9 1月份试验地土壤温度铅直变化

Fig. 9 The vertical change of soil temperature in experimental plots in January

表2 试验地土壤温度年变幅

Table 2 The annual amplitude of soil temperature in experiment plots

地类 Land type	0cm			10cm			20cm		
	最低 Min. (℃)	最高 Max. (℃)	年变幅 Annual amplitude (℃)	最低 Min. (℃)	最高 Max. (℃)	年变幅 Annual amplitude (℃)	最低 Min. (℃)	最高 Max. (℃)	年变幅 Annual amplitude (℃)
阳坡刺槐林 RWSS	-5.98	34.45	40.43	-4.87	31.13	36.00	-4.06	30.56	34.62
阴坡刺槐林 RWNS	-6.46	30.20	36.66	-5.36	24.85	30.21	-4.37	24.07	28.44
阳坡辽东栎林 QWSS	-6.26	32.37	38.63	-5.22	27.70	32.92	-4.29	24.58	28.87
阴坡辽东栎林 QWNS	-8.42	28.48	36.90	-6.11	23.05	29.16	-5.59	22.79	28.38
阳坡荒草地 GSS	-6.04	37.42	43.46	-5.09	33.42	38.51	-4.12	32.33	36.45
阴坡荒草地 GNS	-7.71	32.20	39.91	-5.76	27.33	33.09	-4.98	26.80	31.78
农地 Farmland	-8.37	33.03	41.40	-5.87	30.77	36.64	-5.47	29.80	35.27

由表2 不难看出植被覆盖对土壤温度年变幅的影响。0、10、20cm 深土壤温度年变幅在阴坡,农地>阴坡荒草地>阴坡辽东栎林地>阴坡刺槐林地;在阳坡,阳坡荒草地>阳坡刺槐林地>阳坡辽东栎林地。阴坡土壤含水量一般高于阳坡^[11],土壤热容量较大,升温 and 降温均较慢,温度变化幅度较小,因此,0、10、20cm 深土

壤温度年变幅阳坡地类显著高于阴坡同地类。在降温阶段,底土温度降幅小;升温阶段,底土温度的升幅也较小,所以随着深度的增加,各地类土壤温度的年变幅逐渐减小,深层土壤温度的变化幅度小于表层。各地类土壤温度的年变幅地表为 36.66 ~ 43.46℃,10cm 深为 29.16 ~ 38.51℃,20cm 深为 28.38 ~ 36.45℃。

3.3 植被生长对土壤热量的响应

植被对大气的响应是直接的,气候变化将直接影响植物的生长过程和生产力。植被可以截留大部分太阳辐射,同时也能减小地表向大气散热的强度^[12]。黄土丘陵区土壤温度基本能满足当地植被生长的需要,不是植被生长的限制性因子,但土壤温度直接影响种子的萌发和植物的生长发育,特别是对土壤水分运动、根系的水分和养分吸收、以及微生物的活动等有较大影响。林木根系一般在 5℃ 以上就能生长,但当土壤温度升高到 35℃ 时,生长开始停滞,甚至完全停止。根系的吸水率在一定的土壤温度范围内随土壤温度的升高而相应增大,土壤温度降低时根系吸水会受到限制,而升高到一定限度根系吸水也会受到抑制^[13]。试验地阴坡刺槐林地、阴坡荒草地和农地(阴坡)0 ~ 20cm 土壤温度达到 5℃ 以上的时间比阳坡刺槐林和阳坡荒草地推迟 1 周左右,相应地根系开始生长活动的时间也推迟 1 周左右。辽东栎林地海拔较高,阳坡辽东栎林地土壤温度回升到 5℃ 以上的时间和阴坡刺槐林地基本同步,阴坡辽东栎林地则晚于阳坡辽东栎林地 5d 左右,根系开始生长活动的时间也较阳坡辽东栎林晚 5d 左右。相应于植物根系的活动,阳坡刺槐林和阳坡荒草地植物的出叶时间比阴坡刺槐林、阴坡荒草地和阳坡辽东栎林的早 1 周左右,比阴坡辽东栎林早 12d 左右。阳坡比阴坡的土壤温度高,土壤微生物也较阴坡活跃,枯枝落叶分解快,有机质积累少。据调查,试验地阴坡刺槐林地和阴坡荒草地的枯枝落叶和腐殖质层厚度(有机质)明显大于阳坡刺槐林地和阳坡荒草地;辽东栎林地的枯枝落叶和腐殖质层厚度明显大于刺槐林地和荒草地(表 1)。土壤温度也影响土壤蒸发量,土壤温度越高水分越容易蒸发。在黄土丘陵区,坡向是划分立地条件类型的重要指标,土壤温度阳坡荒草地和阳坡刺槐林地 > 阴坡荒草地 > 阴坡刺槐林地和辽东栎林地,土壤蒸发量相应地阳坡荒草地和阳坡刺槐林地 > 阴坡荒草地 > 阴坡刺槐林地和辽东栎林地。蒸发增加了土壤水分的消耗,势必减少土壤储水量,导致阳坡土壤含水量显著低于阴坡,进而影响植被的生长发育以及生物量^[11,14]。研究表明^[7,11],黄土丘陵区阳坡刺槐林地枯梢现象严重,有整株枯死的林木,而阴坡刺槐林地则没有整株枯死林木现象发生;阴坡荒草地的灌木高度、冠幅、地径以及草本植物的生物量明显大于阳坡荒草地。

另外,在黄土丘陵沟壑区热量状况直接影响植物种类分布,对植物生长量的影响主要通过对土壤水分的调节而间接表现出来。在热量能满足植物生长发育的情况下,土壤水分条件较好的阴坡植被生物量较高^[11]、物种较为丰富,阳坡土壤水分条件较差,只有耐干旱的植物才能生长,物种较少,且生物量低。如狼牙刺、铁线莲等喜阳植物仅能在阳坡刺槐林下生长,而陕西莨苳、中华绣线菊等喜阴植物则只能在阴坡刺槐林下生长。同时,阴阳坡物种数量也有差异,阴坡植被种类显著多于阳坡,如阴坡刺槐林下有物种 22 种,而阳坡刺槐林下仅有物种 16 种(表 1)。因此,植被对土壤热量的响应主要反映在植物种类的分布差异、物候等方面,而植被生物量则是对土壤热量和水分交互作用的一种共同响应。

4 结论

(1) 潜热通量是黄土丘陵区土壤-植被-大气系统能量的主要支出项,占总净辐射的 72.1% ~ 81.4%;感热通量次之,占总净辐射的 16.4% ~ 26.4%;土壤热通量仅占总净辐射的 1.4% ~ 2.8%,不是土壤-植被-大气系统能量的主要支出项,但直接影响土壤温度的变化速度和时间。

(2) 试验地各地类土壤温度和累积土壤热通量具有显著相关性。2 ~ 7 月份,各地类 0 ~ 20cm 土壤的平均温度均随累积土壤热通量的增大而升高,9 月至翌年 1 月份 0 ~ 20cm 土壤的平均温度随累积土壤热通量的减小而降低,土壤温度的变化超前于累积土壤热通量变化 1 个月左右。

(3) 试验地各地类地表温度随季节的变化趋势均呈单峰曲线型,2 ~ 7 月份为升温阶段,8 月到翌年 1 月份为降温阶段,峰值出现在 7 月末或 8 月初。受太阳辐射和地面有效辐射的作用,土壤温度随深度的变化规律在一年之中不尽相同,2 ~ 9 月份,土壤温度随土层深度增加逐渐降低;10 月至翌年 1 月份,随土层深度增加

温度逐渐升高。0cm、10cm、20cm 深土壤温度年变幅在阴坡,农地 > 阴坡荒草地 > 阴坡辽东栎林地 > 阴坡刺槐林地;在阳坡,阳坡荒草地 > 阳坡刺槐林地 > 阳坡辽东栎林地;同一植被类型条件下,阳坡土壤温度年变幅显著高于阴坡。

(4) 植被生长发育与土壤热量状况具有一定的响应关系。受土壤温度的影响,阴坡刺槐林地、阴坡荒草地和农地根系开始生长活动的时间比阳坡刺槐林地和阳坡荒草地推迟 1 周左右,阴坡辽东栎林地则晚于阳坡辽东栎林地 5d 左右;阳坡刺槐林和阳坡荒草地植物的出叶时间比阴坡刺槐林、阴坡荒草地和阳坡辽东栎林的早 1 周左右,比阴坡辽东栎林早 12d 左右。在黄土丘陵区,坡向是划分立地条件类型的重要指标,阳坡土壤温度明显高于阴坡,土壤含水量阳坡则显著低于阴坡,进而导致植被产生明显不同的反应。

(5) 在黄土丘陵区土壤热量基本能满足当地植被生长的需要,相对于土壤水分而言土壤热量对植被生长的影响处于次要地位,不是植被生长的限制性因子。植被对土壤热量的响应主要表现在植物种类的分布差异、物候等方面,植被生物量则是对土壤热量和水分交互作用的共同响应。

References:

- [1] Zhu Z X. Soil science. Beijing: Agriculture Press, 1984.
- [2] Li K R, Chen Y F, Huang M, Li X B, Ye Z J. Model studies of the impacts of climate change on land cover and its feedback. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(S): 57—62.
- [3] Decker K L, Wang D, Waite C, *et al.* Snow removal and ambient air temperature effects on forest soil temperatures in Northern Vermont. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (4): 1234—1242.
- [4] Chen X D, Li X G. The successional law of the community microclimate in the involution ecosystem in Jinyun Mountain. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 1997, 22(4): 405—410.
- [5] Zhang S Q, Chen X D, Li Y X, Xiao H J. Effect of plant communities on the change of soil temperature in Jinyun Mountain. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2007, 29(5): 162—167.
- [6] Xu Y, Sidle R C. Land use change and its regulation of Yangou Watershed in Loess Hilly-gully Region. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 657—666.
- [7] Wei S P. Study on Simulation of Water and Energy Transfer of Soil-Vegetation-Atmosphere System in the Loess Hilly Region. Yangling: Northwest A & F University, 2008.
- [8] Jansson P E, David S M. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality. *Environmental Modeling & Software*, 2001, 16: 37—46.
- [9] Henry N. Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 1996, 34: 133—185.
- [10] Wang B, Cui X H, Bao Y H. Characteristics of radiation and heat balance in transitional region between oasis and desert. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(3): 26—32.
- [11] Wang L, Wei S P, Wu F Q. Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: a case study of Yangou Catchment. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1543—1553.
- [12] Li Y N. The corresponding analysis between soil moisture and main vegetation types of the mat-cryic cambisols at different topographic position in Haibei Area. *Journal of Mountain Research*, 2001, 19(3): 220—225.
- [13] Saho M A, Wang Q J, Huan M B. Soil Physics. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [14] Wang L, Wang Q J, Wei S P, Shao M, Li Y. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2467—2477.

参考文献:

- [1] 朱祖祥. 土壤学. 北京: 农业出版社, 1984.
- [2] 李克让, 陈育峰, 黄玫, 李晓兵, 叶卓佳. 气候变化对土地覆被变化的影响及其反馈模型. *地理学报*, 2000, 55(S): 57—62.
- [4] 陈晓德, 李旭光. 缙云山退化生态系统不同恢复阶段群落小气候的演替变化. *西南师范大学学报*, 1997, 22(4): 405—410.
- [5] 张淑琴, 陈晓德, 李艳霞, 肖海军. 缙云山植被群落对土壤温度变化的影响研究. *西南大学学报(自然科学版)*, 2007, 29(5): 162—167.
- [6] 徐勇, Roy C Sidle. 黄土丘陵区燕沟流域土地利用变化与优化调控. *地理学报*, 2001, 56(6): 657—666.
- [7] 卫三平. 黄土丘陵区土壤-植物-大气系统水能传输模拟研究[博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [10] 王兵, 崔向慧, 包永红. 民勤绿洲荒漠过渡区辐射特征与热量平衡规律研究. *林业科学*, 2004, 40(3): 26—32.
- [11] 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应——以燕沟流域为例. *生态学报*, 2009, 29(3): 1543—1553.
- [12] 李英年. 寒冻锥形土不同地形部位土壤湿度及其与主要植被类型的对应关系. *山地学报*, 2001, 19(3): 220—225.
- [13] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006.