

半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征

刘辉志, 涂钢, 董文杰

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;

中高纬度环流系统与东亚季风研究实验室, 长春 130062;

吉林省气象科学研究所, 长春 130062;

国家气候中心, 北京 100081

E-mail: huizhil@mail.iap.ac.cn

2007-10-11 收稿, 2008-02-01 接受

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB400501)和中国科学院知识创新重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-219)资助

摘要 分析了通榆半干旱区退化草地和农田下垫面 2003~2005 三年来地表反照率的日、季和年变化特征, 并讨论了地表反照率与太阳高度角及土壤湿度的关系. 发现退化草地和农田下垫面的地表反照率具有相似的日变化和季节变化, 冬季较大, 夏季较小; 地表反照率的日变化随天气条件的不同而不同, 晴天日变化曲线形如“U”形, 雨后晴天地表反照率的日变化是先低后高, 雪后晴天是先高后低, 多云天日变化波动较大, 阴天几乎没有日变化. 两下垫面地表反照率的差异在冬季主要受降雪影响, 最大为 0.04; 在夏季受降雨的影响较大, 但地表反照率差异不大, 只有 0.01; 秋季由于下垫面植被的差异, 地表反照率差异最大可达 0.04. 对于三年平均地表反照率, 退化草地在春、夏、秋和冬季分别为 0.25, 0.22, 0.24 和 0.32, 农田春、夏、秋、冬季分别为 0.25, 0.21, 0.22 和 0.33. 地表反照率随着太阳高度角增大而减小; 当太阳高度角大于 40° 时, 地表反照率基本上趋于不变. 在生长季地表反照率与表层土壤湿度存在负指数关系.

关键词

半干旱区

地表反照率

土壤湿度

太阳高度角

干旱、半干旱地区占世界陆地面积的 40% 左右^[1], 与其他下垫面相比, 该地区对气候变化的响应更为敏感. 已有的研究表明, 半干旱区人类活动引起的自然植被破坏可以影响夏季风的强度, 减少水汽向内陆的输送, 使干旱化进一步加剧, 导致那里的沙尘暴发生的频率和强度增加^[2~4]. 不过到目前为止我们对干旱/半干旱地区陆面过程还缺乏较为深刻的认识, 过去的许多陆面过程试验大多是在湿润地区和半湿润区进行的. 开展干旱、半干旱区陆面过程长期野外观测试验, 研究该地区的地气相互作用特征, 对于改进干旱区陆面过程参数化方案, 研究全球陆地能量和水汽循环及全球变化具有十分重要的现实意义.

影响地表反照率 α 的因素主要有下垫面的状况(颜色、湿度、粗糙度、植被覆盖、土壤干湿等)、太阳高度角和天气状况等^[5]. 地表反照率决定了地表

和大气间的辐射能量分配, 进而影响生态系统的物理、生理、生物化学过程(地表温度、蒸腾、能量平衡、光合和呼吸等), 从而直接或间接地影响全球及区域气候^[6]. 长期以来, 地表反照率是天气预报和气候模式中十分重要的参数^[7~9], 研究干旱半干旱区不同下垫面地表反照率的日、季变化研究对于改进干旱、半干旱区陆面过程的描述有重要意义. Charney 等人^[10]就利用 GCM 模式讨论了地表反照率的改变对于撒哈拉地区干旱的影响. Wang 等人^[11]利用自动气象站的观测资料分析了青藏高原改则半沙漠下垫面的地表反照率的季节变化以及和土壤湿度的关系; Zhang 等人^[12]给出敦煌干旱区戈壁下垫面地表反照率在夏季的日变化特征. 不过在地表反照率的季节和年际变化以及地表反照率与植被生长参数的关系研究有待深入. 本文主要分析吉林通榆长期观测实

验站退化草地和农田下垫面 2003~2005 连续三年的观测资料, 研究了地表反照率的日、季和年际变化特征, 讨论了地表反照率与土壤湿度和太阳高度角的关系. 本研究结果对于改进和校验模式中半干旱地区不同下垫面的地表反照率有一定的参考价值.

1 观测场地和资料

吉林“通榆地表过程长期观测实验站”位于吉林省白城市通榆县新华乡境内, 本实验站也是国际协同加强观测计划(CEOP, www.ceop.net)的地面观测基准站. 该站自 2002 年 10 月正式建成, 目前一直在连续进行地气间物质和能量通量交换过程的观测. 该实验站地理位置为(44°25'N, 122°52'E), 实验区地形非常平坦, 平均海拔 184 m, 无长年流水的河流, 1971~2000 年的年平均气压 996.8 hPa, 年气温 5.7℃, 湿度 57%, 平均年总降水量 388.2 mm, 年平均盛行风 SSW, 年平均风速为 4.2 m·s⁻¹. 实验站分别在退化草地和农田下垫面设置 2 个观测点. 退化草地草的覆盖度大约在 60%左右; 夏季草的高度一般在 10 cm 以下, 冬春季在 5 cm 以下, 属严重退化的草地. 农田下垫面在非生长季为裸土覆盖; 生长季主要作物为玉米, 最高可达 1.8 m 左右. 实验区的土壤主要由风沙土、淡黑钙土、盐碱土和草甸土组成; 其中风沙土是最主要的土壤, 土壤质地粗糙, 有机质含量低, 风蚀严重. 2 个下垫面的观测项目基本一致. 观测项目主要包括近地面层基本气象要素、辐射、土壤温度、土壤湿度、土壤热通量以及近地面湍流通量, 具体仪器型号、架设高度等参见文献[13]. 其中近地面风、温、湿设有分 5 层观测(2, 4, 8, 12, 17 m), 湍流观测系统由超声风速温度仪和湿度和 CO₂ 脉动仪组成, 主要测量动量、热量、水汽及 CO₂ 湍流通量. 每个样本采用 30 min 的平均. 除因为电源、采集器等故障外, 2003~2005 年每年有效资料达 75%以上.

2 结果分析和讨论

2.1 典型天气条件下的地表反照率日变化

图 1 给出了 2003 年 3 月 9~16 日退化草地下垫面一场降雪前后地表反照率日变化, 3 月 11 日有降雪(4.7 mm), 12 日有少量降雪(0.4 mm), 其他各日为晴天. 从图中可以看出, 雪前晴天(9, 10 日)地表反照率典型日变化曲线如“U”形, 中午低, 早晨和傍晚稍高, 太阳高度角较低时, 地表反照率变化大些, 随着太阳高度角的增大地表反照率减小并趋于稳定, 且

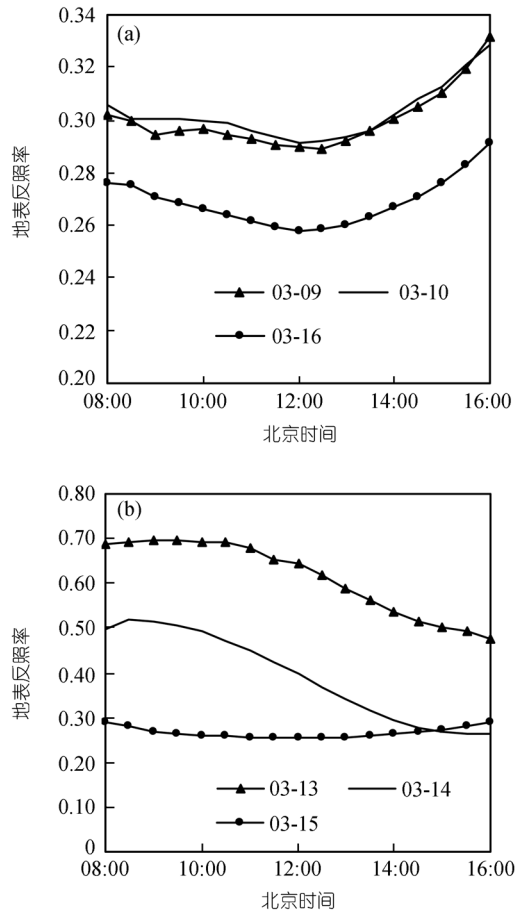


图 1 2003 年 3 月 9~16 日(降雪过程)退化草地下垫面地表反照率的日变化

3 月 11 日降雪量为 4.7 mm, 3 月 12 日降雪量为 0.4 mm

由于云的影响日变化曲线有一定波动; 雪覆盖的地表反照率(11, 12 日)最高可达 0.79(图略); 雪没有完全融化前(13, 14 日)呈现早上高, 傍晚低的特点. 其原因是由于早上太阳刚刚升起, 地表雪还未融化, 地表反照率比较高, 随着太阳高度角的减小, 地表获得的热量不断增加, 雪慢慢开始融化, 表层土壤湿度增加, 地表反照率随之下降, 而且明显看到 14 日的日变化整体低于 13 日, 验证了雪面的地表反照率随时间的衰减很快. 到了 15, 16 日地表反照率的日变化形态逐渐恢复到了雪前晴天的形态“U”, 其值低于雪前, 这是由于雪融化土壤湿度增大的缘故. 晴天地表反照率的日变化特征与过去在黑河实验区得到的结果基本一致 [14,15].

图 2 给出了 2003 年 6 月 30 日~7 月 5 日退化草地测站一场降雨前后地表反照率的日变化曲线. 7 月

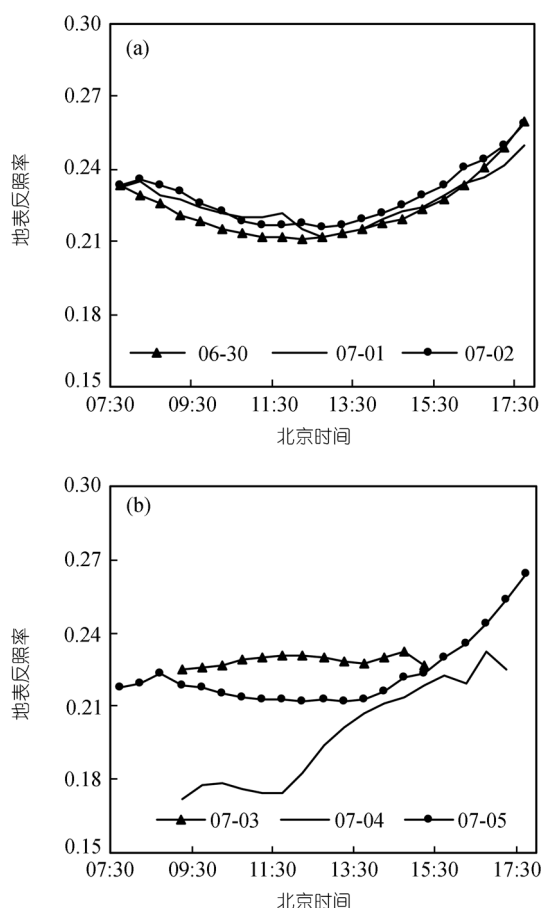


图2 2003年6月30~7月5日(降水过程)退化草地下垫面地表反照率的日变化

7月3日降水量为6.3 mm, 7月4日降水量为1.4 mm

3, 4日有降雨(降水量分别为6.3和1.4 mm), 由于这两天的降水都是发生在傍晚和夜间, 因此除6月30日晴

天外, 1~5日白天都可以视为多云或阴天。可以看到, 夏季晴天地表反照率日变化曲线同样为“U”; 多云天的日变化曲线受云的影响而有一定波动(7月1, 2, 4日); 阴天的地表反照率日变化幅度很小(7月3日); 同样也可以看出雨后地表反照率回升的趋势, 并恢复到晴天或多云的日变化曲线。由于降水量不大, 半干旱区蒸发潜力很大, 地表反照率很快恢复到雨前晴天的状态。与降雪过程最大的不同是降水后, 地表反照率日变化是先低后高(7月4日), 没有类似于因融雪过程引起的先高后低的日变化。其原因是因为降水使得表层土壤湿度升高, 从而导致地表反照率降低。随着太阳高度角的升高地表温度上升, 蒸发增大, 表层土壤湿度开始下降, 这样使地表反照率升高, 恢复到晴天的状态。

2.2 地表反照率月平均的日变化

图3给出了退化草地2003~2005年1~12月地表反照率月平均的日变化。地表反照率平均状况下的日变化形态近似于晴天状况下的日变化, 呈“U”形; 地表反照率日变化的季节变化也较明显, 夏季低, 冬季高。平均日变化受当年的气候条件的影响各月表现不同, 平均来看地表反照率夏季7, 8月年际差异最小, 整个生长季年际差异最大为0.02; 在春冬季1, 2, 3, 11, 12月年际差异比较大, 原因可能是由于该半干旱实验区每年的降雪次数、强度相差较大造成的。

利用月平均的日变化分别统计农田和退化草地逐月的月平均地表反照率, 结果如表1。可以看到两种下垫面地表反照率的月平均值差异不大, 只有 ± 0.02 , 从三年的平均结果来看, 7~10月草地的地表反照率总是大于农田。

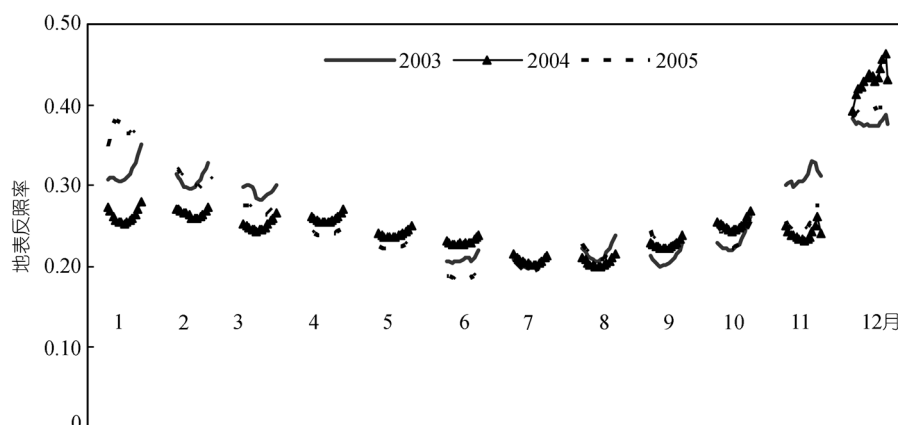


图3 退化草地2003~2005年1~12月地表反照率月平均的日变化

表 1 农田和退化草地各月的平均地表反照率^{a)}

月份	cy2003	nt2003	cy2004	nt2004	cy2005	nt2005
1	0.31	—	0.26	0.3	0.37	0.36
2	0.31	—	0.27	0.29	0.31	0.27
3	0.3	0.31	0.25	0.26	0.27	0.26
4	—	—	0.26	0.26	0.24	0.26
5	—	—	0.24	0.25	0.22	0.25
6	0.21	0.21	0.23	0.23	0.19	0.19
7	0.2	0.2	0.21	0.2	0.2	0.18
8	0.22	0.2	0.2	0.19	0.22	0.18
9	0.21	0.2	0.23	0.19	0.23	0.21
10	0.23	0.23	0.25	0.21	—	0.21
11	0.31	0.33	0.23	0.22	0.25	0.26
12	0.37	0.32	0.43	0.42	0.39	—

a) “—”代表由于传感器、采集器及天气等原因,数据缺测(一个月有效资料数小于 25 d). nt 示农田, cy 示退化草地,下同

2.3 地表反照率的年变化

图 4 给出 2003~2005 年退化草地和农田地表反照率日均值和日总降水的变化(图中空缺是由于传感器、采集器以及太阳能电池的故障或天气所导致的缺测),图 5 为 2003~2005 年退化草地和农田下垫面归一化植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI)(16 d 间隔)的时间变化序列(取自 NASA EOS MODIS 数据产品).

两下垫面地表反照率日均值存在明显的季节变化,夏季小,冬季大;在冬季,图中清楚可见由于降雪而引起地表反照率的跳跃,有积雪覆盖时地表反照率日均值最高可达 0.85;同时可以看到在夏季,每次降水都对应于地表反照率的下降,其原因是降水使得土壤湿度增加,从而导致地表反照率减小.

从植被指数的变化趋势(图 5)可以看到两种下垫面植被指数出现明显差异是从 5 月底开始,此时草早已进入生长期,而农田处于出苗期,因此退化草地的 NDVI 和 EVI 均大于农田,与此同时地表反照率表现为农田大于退化草地;直到 7 月上旬,农田的 NDVI 和 EVI 开始大于退化草地,农作物进入生长旺盛期,而此时的地表反照率表现为退化草地大于农田;至 10 月中旬农作物完全成熟,进入收割期,两种下垫面的植被指数差别很小.在非生长季,尤其是冬季,两种下垫面 NDVI 和 EVI 相差很小,此时地表反照率的差异主要是受降雪强度和次数影响.本结果与过去在黑河实验区得到的结果基本一致 [16].

由于当地降雪主要集中在 1 月 1 日~3 月 15 日和 11 月 1 日~12 月 31 日,因此把全年分为如下 4 个时段来代表春、夏、秋和冬四季,分别统计 2003~2005

年退化草地和农田四季的地表平均地表反照率和季降水量,结果列于表 2.比较各时段的均值可见,由于降雪的影响,冬季地表反照率差异最大可达 0.04,秋季由于下垫面植被的差异使得地表反照率差异最大可达 0.04,而春和夏季只有 0.01;对于地表反照率年际间的差异,冬季最大可达 0.04,春、夏和秋季差异最大 0.02.另外,夏季降水在全年中的最大值对应于地表反照率的全年最低值;但是季节降水总量和季节的平均地表反照率的关系不明显.表 2 与月平均的日变化得到的表 1 结果一致.

与黑河地区张掖(麦地)和沙漠 [17] 测量结果相比,张掖麦地下垫面 4, 8, 10, 12 月的平均地表反照率分别为 0.162, 0.133, 0.175, 0.277;同期沙漠的观测结果为 0.269, 0.257, 0.298, 0.369,退化草地观测结果(表 1 和 2)介于麦地和沙漠之间,比较合理.从月平均地表反照率比较可以发现,3 种下垫面均表现为冬季地表反照率最大,夏季最小,即植被覆盖率低地表反照率高.

2.4 地表反照率与土壤湿度和太阳高度角的关系

图 6 给出了 2004 年退化草地和农田地表反照率和太阳高度角的关系图,同样剔除了雪和降雨的影响.可以看到地表反照率随着太阳高度角增加而减小;农田地表反照率的变化范围要高于草地,并且当太阳高度角大于 40°时地表反照率基本上趋于不变.

图 7 给出了 2003~2005 年生长季(5~9 月)退化草地和农田下垫面土壤体积含水量日均值和地表反照率日均值的关系,并给出了指数衰减的拟合曲线.剔除雪和降雨的影响后,农田的拟合结果要好于退化

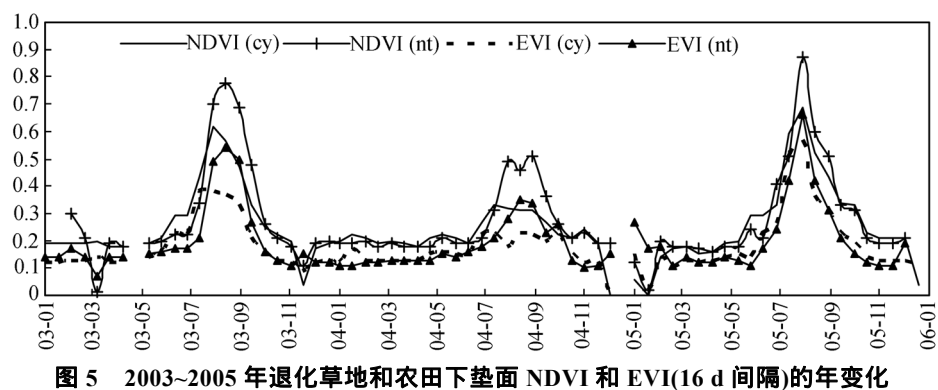
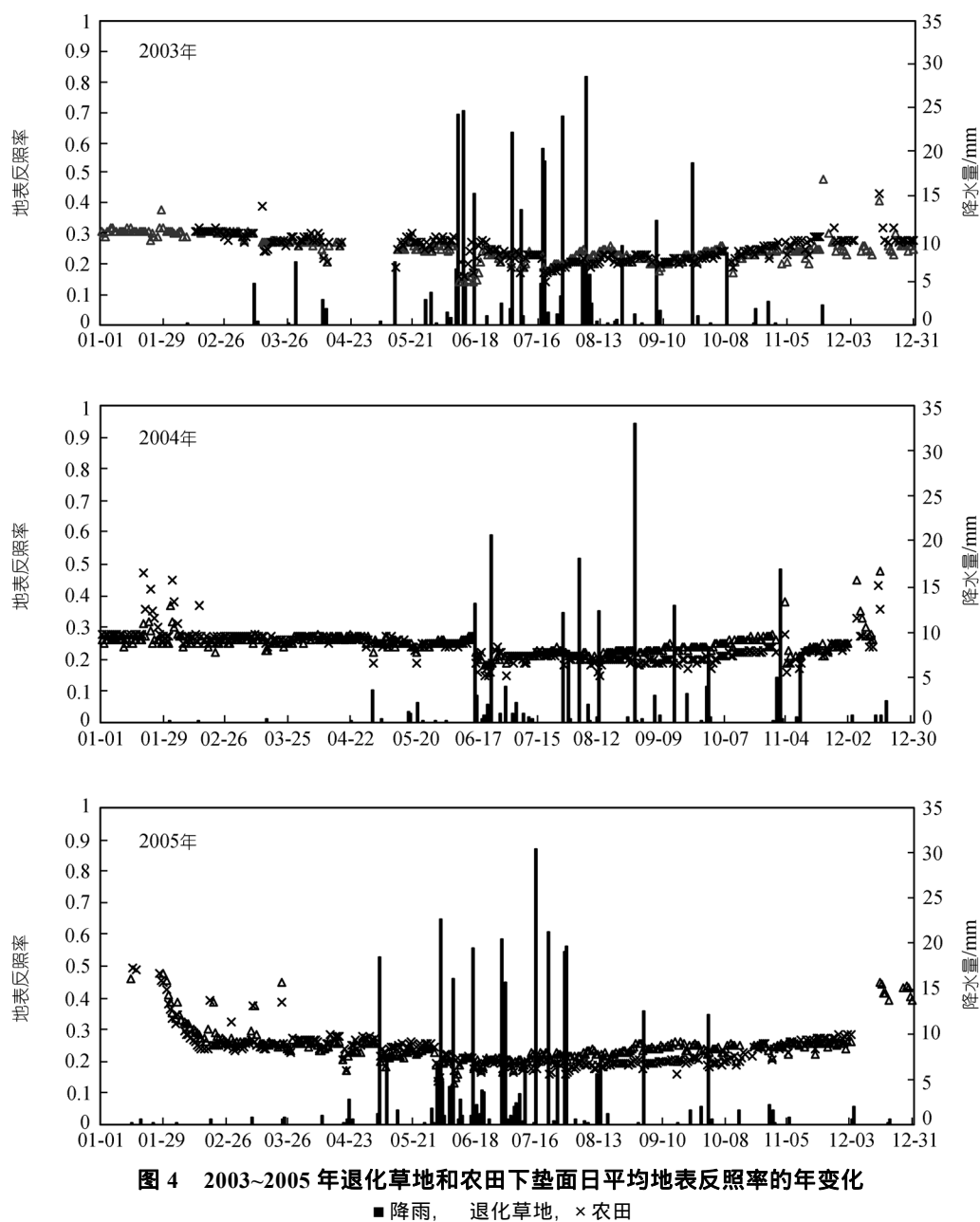


表 2 2003~2005 年退化草地和农田下垫面不同季节地表平均地表反照率和季总降水量

统计时段	2003 年			2004 年			2005 年		
	降雨量 /mm	退化草地反 照率(样本数)	农田反照率 (样本数)	降雨量 /mm	退化草地反 照率(样本数)	农田反照率 (样本数)	降雨量 /mm	退化草地反 照率(样本数)	农田反照率 (样本数)
01-01~03-15	8	0.29 ± 0.03 (93)	0.29 ± 0.02 (55)	30.6	0.25 ± 0.02 (100)	0.27 ± 0.03 (96)	6	0.26 ± 0.14 (60)	0.26 ± 0.02 (63)
11-01~12-31		0.57 ± 0.12 (34)	0.54 ± 0.13 (32)		0.55 ± 0.15 (29)	0.55 ± 0.16 (32)		0.49 ± 0.10 (75)	0.52 ± 0.10 (40)
03-15~05-31	26.7	0.26 ± 0.02 (50)	0.27 ± 0.02 (49)	8.5	0.26 ± 0.01 (77)	0.25 ± 0.01 (77)	37.1	0.24 ± 0.03 (76)	0.25 ± 0.03 (76)
06-01~08-31	250.9	0.22 ± 0.03 (88)	0.22 ± 0.03 (88)	137.9	0.22 ± 0.02 (91)	0.21 ± 0.02 (91)	256.6	0.21 ± 0.02 (92)	0.19 ± 0.01 (92)
09-01~10-31	47	0.23 ± 0.02 (58)	0.23 ± 0.02 (58)	38	0.25 ± 0.01 (58)	0.21 ± 0.02 (58)	34.4	0.25 ± 0.05 (55)	0.21 ± 0.02 (54)

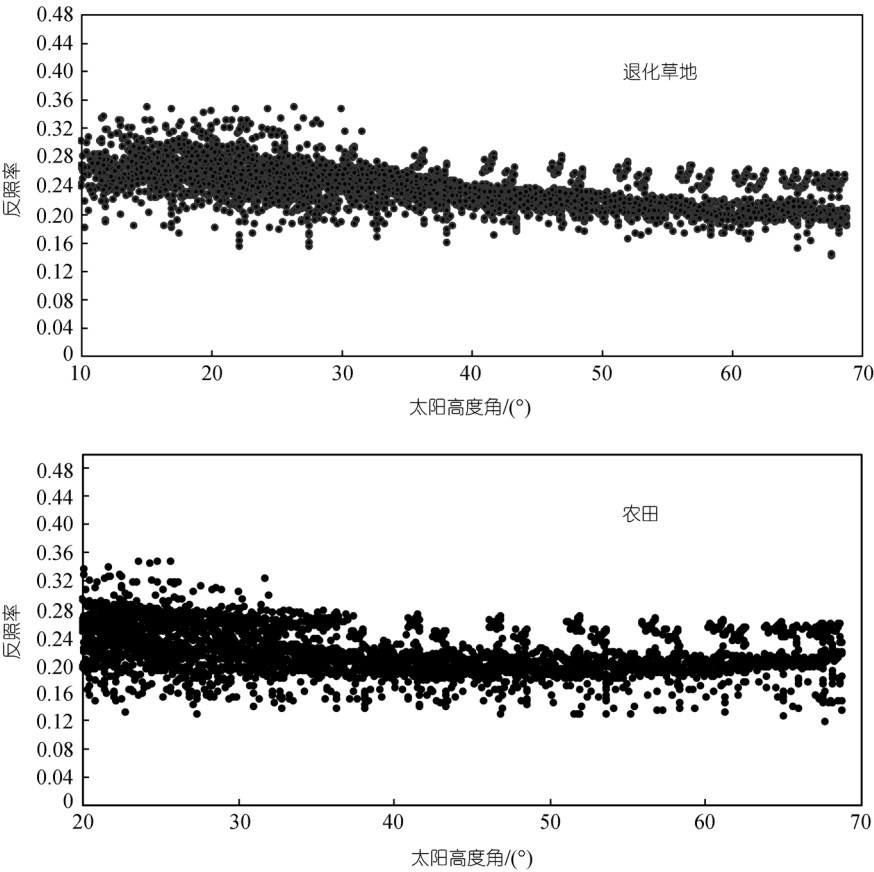


图 6 2004 年农田和退化草地下垫面地表反照率和太阳高度角的关系图

草地，其中退化草地 $\alpha = 0.256 \times e^{\left(\frac{-W_s}{0.049}\right)} + 0.222$ ，农田 $\alpha = 0.637 \times e^{\left(\frac{-W_s}{0.036}\right)} + 0.207$ (α 为地表反照率， W_s 为 5 cm 土壤湿度)。在半干旱区，土壤湿度对地表反照率影响较湿润地区明显。

3 结论

本文分析了通榆半干旱区退化草地和农田下垫面地表反照率 2003~2005 连续三年的日、季和年变化特征，并讨论了地表反射率与太阳高度角及土壤湿度的关系。发现退化草地和农田下垫面的地表反照

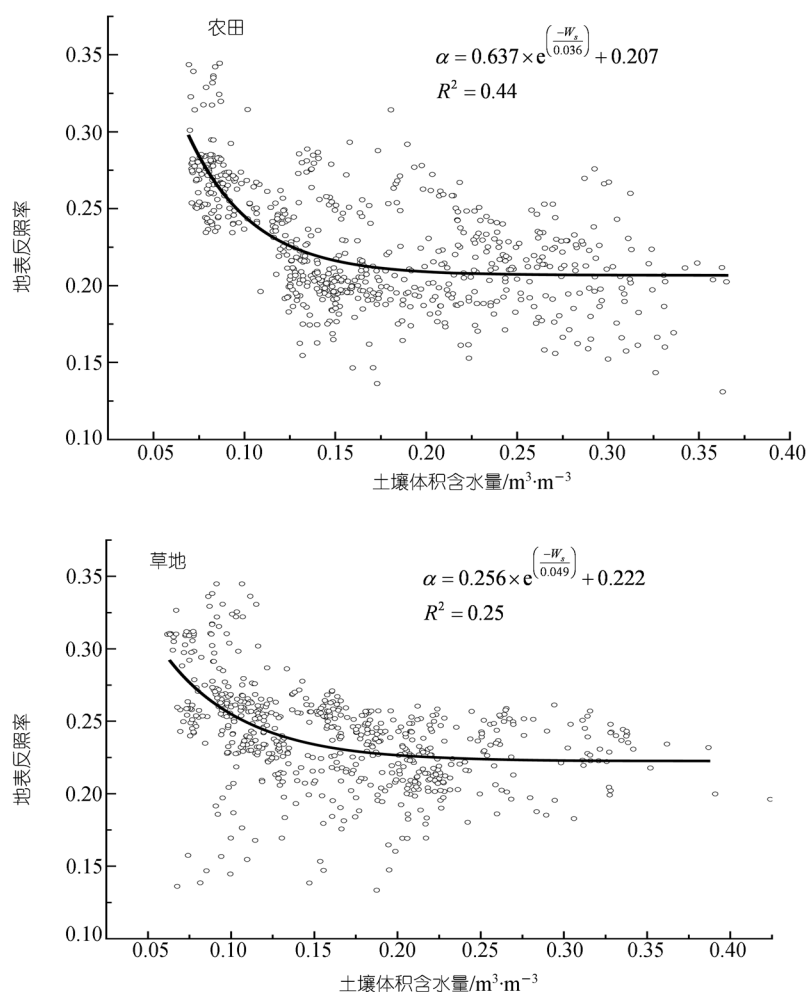


图 7 2003~2005 年生长季农田和退化草地土壤体积含水量日均值和地表反照率日均值的关系图

率具有相似的日变化和季节变化, 地表反照率雨后晴天地表反照率的日变化是先低后高, 雪后晴天是先高后低, 多云天日变化波动较大, 阴天几乎没有日变化. 两下垫面地表反照率的差异在冬季主要受降雪影响, 最大为 0.04; 在夏季受降雨的影响较大, 但地表反照率差异不大, 只有 0.01; 秋季由于下垫面植被的差异, 地表反照率差异最大可达 0.04. 三年平均的地表反照率, 退化草地下垫面在春、夏、秋和冬季分别为 0.25, 0.22, 0.24 和 0.32, 农田下垫面在春、夏、秋和冬季分别为 0.25, 0.21, 0.22 和 0.33. 地表反照率随着太阳高度角增加而减小, 当太阳高度角大于 40°

时地表反照率基本上趋于不变. 在生长季地表反照率与表层土壤湿度成负指数关系.

另外本文还讨论了地表反照率与植被指数 (NDVI 和 EVI) 的关系. NDVI 和 EVI 与叶面积指数 (LAI) 存在函数关系, 如果能够在实验中实际同步测量叶面积指数 (LAI), 这样可以定量给出地表反照率与叶面积指数 (LAI) 的函数关系; 可以为遥感资料反演地表反照率提供验证和效验, 从而可以利用遥感资料为气候模式提供较精确与动态植被模型相适应的地表反照率, 更好的提高模式的可靠性. 这将是下一步的研究方向.

参考文献

- 1 Verhoef A, Allen S J, Lloyd C R. Seasonal variation of surface energy balance over two Sahelian surface. *Int J Clim*, 1999, (19): 1267—1277

- 2 符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题. 地学前缘, 2002, 9(2): 271—275
- 3 符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. 气候与环境研究, 2002, 7(1): 22—29
- 4 符淙斌, 叶笃正. 全球变化和我国未来的生存环境. 大气科学, 1995, 19(1): 116—126
- 5 左大康, 周允华, 著. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991. 37—39
- 6 孙菽芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型. 北京: 气象出版社, 2005. 1—356
- 7 Betts A K, Ball J H. Albedo over the boreal forest. J Geophys Res, 1997, (102): 28901—28909
- 8 Dickinson R E. Changes in land use. In: Trenberth K E, ed. Climate System Modeling. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 149—172
- 9 McCaughey J H, Lafleur P M, Joiner D W, et al. Magnitudes and seasonal patterns of energy, water and carbon exchanges at a boreal young jack pine forest in the BOREAS northern study area. J Geophys Res, 1997, (102): 28997—29007
- 10 Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. Quart J Roy Meteor Soc, 1975, 101(428): 193—202
- 11 Wang K C, Wang P C, Liu J M, et al. Variation of surface albedo and soil thermal parameters with soil moisture content at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau. Bound Layer Meteor, 2005, 116: 117—129 [DOI](#)
- 12 Zhang Q, Huang R H. Parameters of land-surface processes for Gobi in North-west China. Bound Layer Met, 2004, 110: 471—478 [DOI](#)
- 13 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 378—389
- 14 Wang J M, Gao Y X, Hu Y Q, et al. An overview of the HEIFE experiment in the People's Republic of China: Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales. IAHS Publ, 1993, (212): 397—403
- 15 胡隐樵, 高由禧. 黑河试验(HEIFE)——对干旱地区陆面过程的一些新认识. 气象学报, 1994, 52(3): 285—296
- 16 吴艾笙, 钟强. 黑河实验区地表反射率与植被指数的季节变化. 高原气象, 1992, 11(4): 440—450
- 17 季国良, 马晓燕, 邹基玲, 等. 黑河地区绿洲和沙漠地面辐射收支的若干特征. 干旱气象, 2003, 21(3): 29—33