

基于地形因子的土壤水分反演研究 ——以延河流域为例

刘晓婧¹, 李新平¹, 杨勤科², 刘先龙¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710069)

摘 要: 以延河流域为研究区域, 应用 Landsat5/TM 遥感数据和 DEM 数据进行归一化植被指数和地表温度的反演, 并对气温参数进行了高程、坡度、坡向、地形遮蔽等地形因子的订正, 更为精细地表达局地温度的空间分布差异。运用 ERDAS 的空间建模工具, 反演得到温度植被干旱指数分布图。结果表明, 此方法较好地反映了延河流域土壤的相对于干旱状况, 是一种比较有效和充分考虑地形因子影响的监测土壤水分的方法。

关键词: DEM; 地表温度; 温度植被干旱指数; 土壤水分

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)05-0218-05

土壤水分是土壤的重要组成部分, 是监测土地退化和干旱的重要指标, 同时也是水文学、气象学、土壤学、生态学以及农业科学等研究领域中的一个重要参数^[1]。使用遥感手段反演土壤水分, 能够克服传统监测方法费时、费力、以点带面等缺点, 而且能够实现快速、及时、动态的监测与评估。

温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 是目前可见光和热红外波段遥感监测土壤水分理论相对成熟, 应用比较广泛的一种方法^[2]。此方法结合了植被指数 (NDVI) 和地表温度 (Ts) 这两个描述地球表面特征十分重要的参数, 二者的融合可以清晰地表达地表植被覆盖和土壤水分含量等变化信息, 有助于更准确地认知土壤水分时空动态演变规律。

目前, 应用 TM6 数据反演地表温度有 3 种算法: 辐射传导方程法、单窗算法和单通道算法^[3]。其中覃志豪等提出的单窗算法^[4]适用于仅有一个热波段的遥感数据和地表比辐射率、大气水分含量和近地表气温等参数。其中地表比辐射率可通过 NDVI 求出。但若将该方法应用于地形较复杂的丘陵地区, 近地表气温将不是一个常量, 而是有很多的因素影响其分布与变化, 如测点地形 (海拔高度、坡度、坡向、地形遮蔽度等) 和其它下垫面性质, 其中尤以地形的影响最显著^[5]。关于气温随海拔高度的变化, 一般认为气温随海拔高度增大呈线性递减。而坡度对气温的影响, 主要是由于坡度方向和倾斜程度下太阳辐射的差异而引起的。本研究利用遥感图像处理软件 ERDAS IMAGINE 反演的数据结合 GIS 技术,

对单窗算法中的近地表气温这一参数进行 DEM 校正, 然后计算其温度植被干旱指数, 从而提出一种比较有效的和充分考虑地形因子影响的监测土壤水分的方法。

1 研究方法

1.1 研究区概况和数据资料

1.1.1 研究区概况 研究区域为延河流域, 位于 36°10'40" ~ 37°19'41"N, 108°39'42" ~ 110°30'E 之间, 全长 286.9 km, 流域总面积 7 684 km², 地形复杂, 海拔在 495 ~ 1 794 m 之间, 地势西北高东南低。如图 1, 图 2。本流域属大陆性气候, 年降雨量 500 mm 左右, 年平均气温 9℃, 土壤侵蚀和水土流失现象严重。

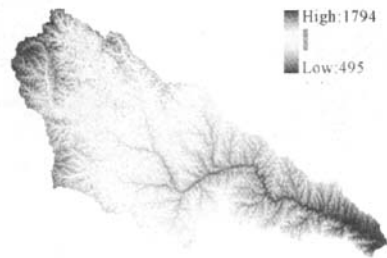


图 1 延河流域地势

Fig.1 Topographic map of Yanhe Basin

1.1.2 数据资料

(1) 遥感数据: 所用的延河流域影像是 2006 年 9 月 10 日的 Landsat5 TM 数据, 根据实际需要做了相应的裁剪, 并利用地形图对影像进行几何精确纠正,

收稿日期: 2009-12-25

基金项目: 国家自然科学基金 (40971173); “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAD09B05)

作者简介: 刘晓婧 (1984—), 女, 山西忻州人, 在读硕士, 主要研究方向为遥感与地理信息系统。E-mail: xiaojingliu007@Yahoo.cn。

通讯作者: 李新平 (1961—), 男, 陕西武功人, 副教授, 主要从事土壤与生态研究。

平均误差在 0.5 像元以内。



图2 延河流域遥感影像

Fig. 2 Remote Sensing image of Yanhe Basin

(2) DEM 数据:来自国家基础地理信息中心,水平分辨率为 25 m, ablers 投影(第一标准纬线 36.5°N, 第二标准纬线 37.17°N, 中央经线 109.5°E, krassvosky 椭球体)。

(3) 气象资料:气温数据来源于延河流域及其周围地区 15 个气象站的日平均气温。

1.2 温度植被干旱指数(TVDI)

Carlson^[6]和 Sandholt^[7]等人研究并提出了温度植被干旱指数 TVDI:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}}$$

式中, T_s 为地表温度; $T_{s_{\min}}$ 为相同 NDVI 值的最小地表温度, 对应的是 $T_s - NDVI$ 特征空间的湿边; $T_{s_{\max}}$ 为相同 NDVI 值的最大地表温度, 对应的是 $T_s - NDVI$ 特征空间的干边。通过对 NDVI - T_s 特征空间的干边及湿边进行模拟可得:

$$T_{s_{\max}} = a_1 + b_1 \times NDVI$$

$$T_{s_{\min}} = a_2 + b_2 \times NDVI$$

其中: a_1, b_1, a_2 和 b_2 分别是旱边和湿边拟合方程的系数。干边对应 TVDI 值为 1, 湿边为 0, 计算得到任一点 TVDI 值介于 0 和 1 之间, TVDI 值越大, 对应的土壤水分越低; TVDI 值越小, 对应的土壤水分越高。

1.3 单窗算法反演地表温度

覃志豪的单窗算法^[4]是一种根据地表热辐射传导方程直接反演地表温度的方法, 该算法计算公式如下:

$$T_s = \{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D]T_b - DTa\} / C$$

式中, T_s 是地表实际温度; T_b 是亮度温度; Ta 为大气平均作用温度; a 和 b 是参考系数, 取 $a = -67.355351$, $b = 0.458606$; C 和 D 是中间变量, 可用下面两式计算: $C = \epsilon \times \tau$; $D = (1 - \tau)[1 + (1 - \epsilon)\tau]$ 。其中, ϵ 为地表比辐射率; τ 为大气透射率。对

于 Landsat TM 数据, $T_b = 1260.56 / \ln[1 + 60.776 / (0.1238 + 0.0056 \times DN)]$, 其中 DN 为 TM6 的像元灰度值。当自然地表的 NDVI 值在 0.157 ~ 0.727 之间时, 地表比辐射率 ϵ 可根据公式 $\epsilon = 1.0094 + 0.047 \times \ln(NDVI)$ 计算。因为本研究区位于中纬度且成像时间为 9 月, 因此, 当大气水分含量 w 在 0.4 ~ 1.6 之间时, 大气透射率 $\tau = 0.974290 - 0.08007w$; 当大气水分含量 w 在 1.6 ~ 3.0 之间时, $\tau = 1.031412 - 0.11536w$ 。对于大气平均作用温度, 采用中纬度夏季平均大气近似推算, $Ta = 16.0110 + 0.92621T_0$, 其中 T_0 为近地表气温, 单位为 K ^[4]。

2 基于 DEM 的气温地形修正模型

2.1 气温影响因子分析

单窗算法中的近地表气温 (T_0), 影响其分布与变化的因素很多, 主要包括: 宏观地理条件, 地形(测点海拔高度、地形类别、坡向、坡度、地平遮蔽度等), 下垫面性质(土壤、植被状况等)。其中尤以地形的影响最显著。气温对地表温度的作用直接影响着 TVDI 与土壤水分的关系。

气温数据源于各地的气象站点。因为气象站选址时, 一般选择在山顶或平坦宽阔的地方, 观测场地坡度为零, 并且在一定距离内没有遮蔽物的影响。此处采集的气温数据难以反映在不同坡面的局地地形条件下温度的差异变化。因此对气温进行地形校正十分必要的。

众所周知, 不同方位坡地上的温度差异主要是由于太阳辐射的差异而引起的。由于坡地位置不同, 坡地上每天的日照时间和一天中所接受的太阳辐射总量大有差异。凡是接受太阳辐射多的坡地, 其温度一般也高, 反之, 亦然。因此, 坡地上温度分布随坡向、坡度及季节和纬度而变化的特点和规律性, 一般与坡地上的辐射相类似^[8]。

综上所述, 以延河流域的 DEM 数据为基础数据源, 得到研究区高程、坡度、坡向等地貌要素, 结合气象站气温统计数据, 通过气温直减率法以及对平面和坡面的天文辐射模拟得到实际地形下的气温分布模型。

2.2 实际地形下的气温模型

研究表明, 月平均温度与天文辐射之间的相关系数极高^[9], 坡地与平地的气温差异可以通过坡地与平地的天文辐射差异表示。实际地形下的气温模型综合了海拔高度、坡度、坡向、地形遮蔽等小地形因子的影响, 提出如下改进模型:

$$T = Th + r \times \Delta S$$

其中, T 为实际地形下的温度; Th 实际高度上平面的温度; ΔS 为坡地与平地天文辐射只差; r 为订正系数。关于订正系数 r , 文献[10]以 105°E 以东全国 422 站 1971 ~ 2000 年 30 年年平均气温, 与各站年平均天文辐射量进行回归分析, 得到回归系数 $r = 0.0734^{\circ}\text{C}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^2)$ 。这一结果具有较好的可扩展性, 因此本文用此订正系数进行模拟。

2.3 气象站温度内插

首先将用来内插的气象站的气温数据按照气温直减率法订正到同一海拔高度上, 内插成此平面上的气温分布趋势图。然后与 DEM 图层按照气温直减率法进行栅格运算, 得到不同高程的平面上的气温分布。栅格运算的公式为:

$$Th = T_0 - 0.006 \times \Delta h$$

2.4 天文辐射模拟

天文辐射是地表实际入射太阳辐射的基础背景, 也是辐射计算、太阳能资源评估及其他相关研究领域重要的起始参量。本文对天文辐射的模拟, 结合遥感影像的资料, 只限于计算从日出时间到成像时间之间的辐射量。

2.4.1 太阳天文辐射模型^[11]

$$S_0 = \frac{T}{2\pi} E_0 I_0 (w_i \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin w_i + w_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin w_0) \quad (1)$$

$$S_{0a,\beta} = \frac{T}{2\pi} E_0 I_0 \times$$

$$\left\{ U \sin \delta \left[\sum_{l=1}^m (w_{isl} - w_{srl}) \right] + V \cos \delta \left[\sum_{l=1}^m (\sin w_{isl} - \sin w_{srl}) \right] - W \cos \delta \left[\sum_{l=1}^m (\cos w_{isl} - \cos w_{srl}) \right] \right\} \quad (2)$$

其中: $U = \sin \phi \cos \alpha - \cos \phi \sin \alpha \cos \beta$

$$V = \sin \phi \sin \alpha \cos \beta + \cos \phi \cos \alpha$$

$$W = \sin \alpha \sin \beta$$

式中, S_0 为平地的太阳天文辐射量; $S_{0a,\beta}$ 坡地天文辐射量; E_0 为地球轨道修正因子; δ 为赤纬; T 为日长; Φ 为地理纬度; α 为坡度; β 为坡向; I_0 为太阳常数 $4.9212 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; m 为可照时角的离散数目。 w_{sr} 和 w_{ss} 为倾斜面可照时段对应的起始和终止太阳时角; W_0 为水平面日落时角; W_i 为遥感影像成像时刻时角(本文成像时间为上午 11 点 15 分)。

2.4.2 太阳天文辐射计算 在 ArcGIS 软件的支持下, 利用其提供的宏语言功能编写了 AML 程序。

(1) 平面天文辐射

通过输入模拟日期以及 DEM 提取的纬度信息, 代入公式 1, 逐栅格的计算天文辐射。

(2) 起伏地形下坡面天文辐射

利用 DEM 提取坡度、坡向模型, 将可照时间离散化(这里取 m 为 30), 即划分成一系列微分单元, 模拟每一单元时间内的辐射量。依据计算出的每一微分时段内的太阳高度角、太阳方位角及周围地形遮蔽条件, 逐点计算每一微分时段内的可照时间, 利用 GIS 多层次复合分析方法累加求和得到坡面天文辐射量。

3 结果与分析

3.1 气温模拟结果及分析

根据上述方法, 模拟了延河流域 2006 年 9 月 10 日上午 11:15(遥感影像成像时间)时的气温。模拟结果如图 3, 右边部分为气温空间分布的局部放大。从图中可知, 气温分布图不仅反映温度随海拔高度的增加而逐渐降低的大趋势, 而且辐射的订正使得温度的分布更加精细, 主要表现为阳坡高于阴坡、山谷高于山脊的分布特点, 具有很强的地形相关性。因此, 在地表温度的反演过程中, 近地表气温这个参数不能简单的用一常数表示, 经过模拟, 气温随海拔、坡度、坡向等地形条件的不同呈现出显著的差异性。

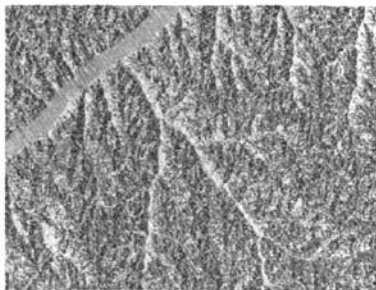
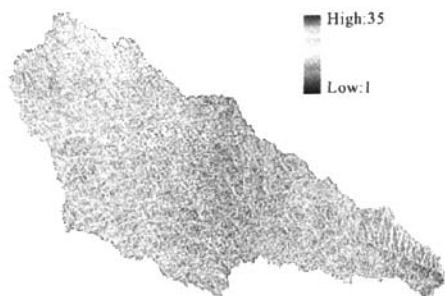


图 3 地形修正后气温分布

Fig.3 Temperature map after terrain revision

3.2 地表温度反演

为了实现对研究区的地表温度的反演,我们应用 ERDAS 软件的空间建模模块 (Spatial Modeler),根据单窗算法建立起了一系列空间模型。应用这些可

视化的空间模型,可方便地实现遥感影像数据按照设计好的算法进行自动运算,并将目标影像输出在指定目录中^[3]。地表温度反演模型流程图如图 4。

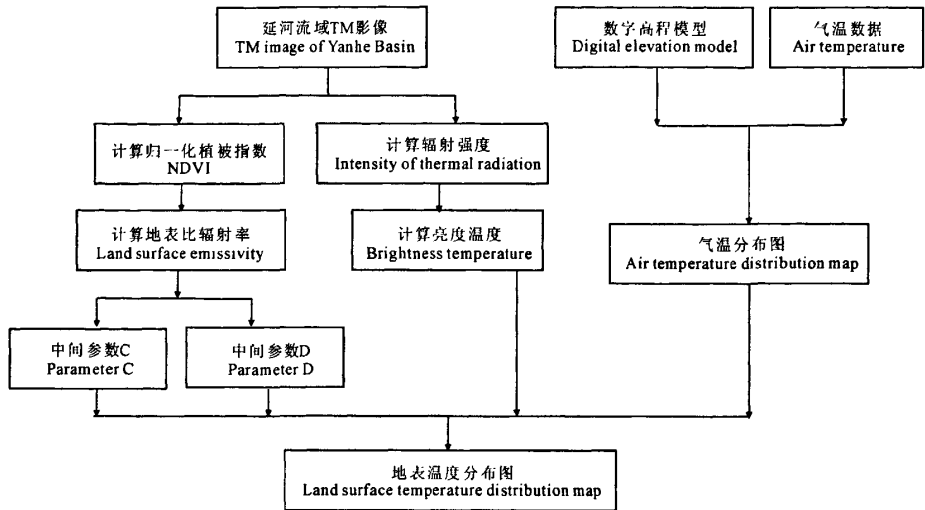


图 4 地表温度反演模型流程

Fig.4 The flow chart of retriving land surface temperature

3.3 TVDI 模型在延河流域的应用

利用反演得到的地表温度数据和植被指数数据,通过 ZONAL MAX 和 ZONAL MIN 函数提取某一 NDVI 对应的所有地表温度中的最大值和最小值,将不同 NDVI 下的最大和最小陆地表面温度以表格 TBL 的形式保存。此时对应表格中只有 1 列数据,行数为乘以 1000 后的 NDVI 值,值为其对应的 T_s 最大或最小值。分别把最大值,最小值表格导入 EXCEL,去掉异常值(包括 T_s 为 0 的值),并对 NDVI 值进行除以 1000 的还原计算,生成 2 列数据,即 $T_{s_{max}}$ / $T_{s_{min}}$ 和真实的 NDVI 值。在 Excel 中对 NDVI 和最大和最小陆地表面温度进行线性拟合,生成干边与湿边方程。回归的数据趋势线如图 5。

将回归后的 $T_{s_{min}}$ 和 $T_{s_{max}}$ 代入 TVDI 方程,得到 TVDI 分布图,如图 6。以 TVDI 作为旱情分级指标,将旱情划分 5 级,详细信息如表 1。

从温度植被干旱指数分布图及上述图表信息可以看出:

(1) 2006 年 9 月延河流域的土壤水分分布具有与地形起伏相一致的分布趋势, TVDI 值随海拔高度的降低而减小,反映出土壤含水量的逐渐增加。从局部来看,阳坡和阴坡 TVDI 值有显著差异,阳坡值大多在 0.5~0.8 之间,局部达到 0.8 以上,处于干

旱和重旱状态。而阴坡 TVDI 值大多在 0.2~0.5 之间,处于正常和相对湿润状态。这与阳坡接受太阳辐射多而相对干旱,背阴坡相对湿润的实际情况相符。

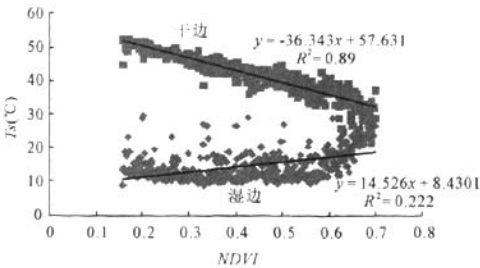


图 5 T_s /NDVI 趋势线拟合图

Fig.5 The trendline of T_s /NDVI

表 1 温度植被干旱指数图像信息

Table 1 The image information of TVDI

TVDI 值 TVDI value	直方图 Map	所占百分比(%) Proportion	土壤水分状况 Soil moisture
0~0.2	67712	0.796	湿润 Wet
0.2~0.4	444360	5.222	正常 Normal
0.4~0.6	3961152	46.555	微旱 Slightly dry
0.6~0.8	3724160	43.770	干旱 Dry
0.8~1.0	311052	3.660	重旱 Severely dry

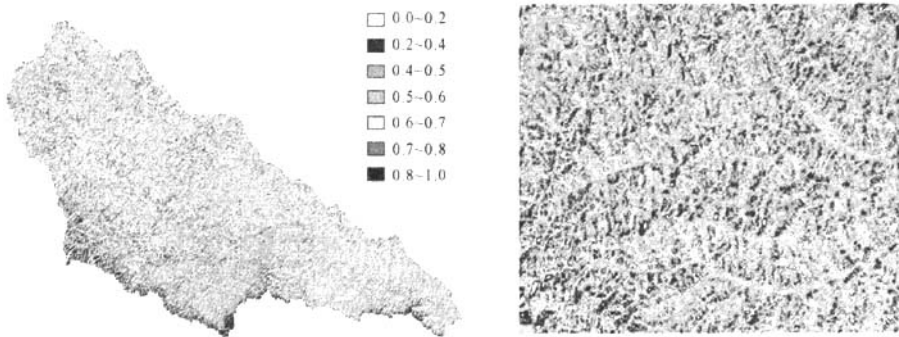


图 6 温度植被干旱指数 (TVDI) 图

Fig.6 The map of TVDI

(2) 从宏观上, $TVDI$ 分布符合研究区域的下垫面性质。在植被覆盖率低与裸岩地区, $TVDI$ 值偏高, 在 $0.5 \sim 0.8$ 之间, 反映出土壤含水量偏低, 土壤干旱。在植被覆盖率较高地区, $TVDI$ 值较低, 在 $0.2 \sim 0.4$ 之间, 土壤水分状况正常。

(3) 河流沿岸的沟谷地区 $TVDI$ 值在 $0 \sim 0.3$ 之间, 土壤相对湿润。

由此可看出, 基于遥感影像与 DEM 数据反演得到的 $TVDI$ 分布图, 可较好的反映出研究区域的土壤水分状况, 是一种较好的考虑地形因子检测土壤水分的方法。

4 结 语

文中采用 2006 年 9 月 15 日的 TM 影像获得植被指数 ($NDVI$) 和地表温度 (T_s), 并利用延河流域的 DEM 数据对近地表气温进行了地形校正, 运用 $ERDAS$ 软件的空间建模功能, 构建 $NDVI/T_s$ 特征空间, 设计了反映土壤水分空间分布状况的植被温度干旱指数 ($TVDI$), 并利用旱情指标对其进行了评价。结果表明, $TVDI$ 与土壤水分分布状况的实际情况相符。

在研究前人地表温度及土壤水分反演模型的基础上, 提出了对气温的地形修正模型, 主要涉及海拔高度、坡度、坡向、地形遮蔽等小地形因子对气温空间的影响, 较为精细地表达了局地温度的空间分布差异, 使 $TVDI$ 更为精确的反映了该区域的相对干旱程度, 并且呈现出显著的地形相关性。

由于卫星视角影响传感器接受到的信息量, 从而影响了图像反映的植被生长状况信息, 这样本研究

中没有考虑视角对 $NDVI$ 和 T_s 影响会给结果带来一些误差。此外, 影响土壤水分变化的因素很多, 因此 $TVDI$ 与土壤水分的定量关系及其它因素对监测土壤水分的影响还需要作进一步的研究。

参 考 文 献:

- [1] 何 玲, 汪志农, 莫兴国. 基于遥感信息预测土壤水分研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 168—170.
- [2] 汪 萧, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 157—163.
- [3] 丁 凤, 徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. 地球信息科学, 2006, 8(3): 125—130.
- [4] 覃志豪, Zhang Minghua, A mon Kamieli, 等. 用陆地卫星 $TM6$ 数据推算地表温度的单窗法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456—466.
- [5] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 144.
- [6] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and $NDVI$ measurements to infer surface soil water content and fractional vegetational cover[J]. Remote Sensing Review, 1994, 52: 45—59.
- [7] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 213—224.
- [8] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 94.
- [9] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 220.
- [10] 李 新, 程国栋, 陈贤章, 等. 任意条件下太阳辐射模型的改进[J]. 科学通报, 1999, 44(9): 993—998.
- [11] 杨 昕, 汤国安, 王 春, 等. 基于 DEM 的山区气温地形修正模型——以陕西省耀县为例[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 525—530.

Bank[J]. The Bryologist, 2001, 104(1): 92—97.

[23] Hock Z, Száványi P, Tóth Z. Seasonal variation in the bryophyte di-

aspore bank of open grasslands on dolomite rock[J]. Journal of Bryology, 2004, 26: 285—292.

Study on bryophyte communities in planted pastures of valley area of Tibet

LI Rong¹, YU Cheng-qun², JIANG Yan-bin¹, LIU Xin-chao¹, SHAO Xiao-ming¹

(1. College of Biological Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: 28 plots of 6 sites were investigated to identify the bryophytes communities on planted pastures in valley area of Tibet, China. 3 ~ 5 quadrates of 25 cm × 25 cm with 100 grids were selected to count the coverage of bryophytes in each plot. The result showed that there were 13 species of bryophytes (including 2 varieties), belonging to 6 genera and 2 families, and *Bryum argenteum* was widely distributed in the whole research area. The bryophytes communities were obviously different on species richness among the plots, but on species evenness. The similarity between any two communities was higher if their niches were more similar to each other. Based on Canonical Correspondence Analysis (CCA) of relationship between bryophytes and environmental factors, it indicated that the distribution of bryophytes was more affected by temperature and relative humidity of the niche. The highest species diversity was located around planted pastures and the lowest (almost no bryophyte) was located inside the planted pastures which were planted this year. As time went on, the bryophyte communities, dominated by genera *Bryum*, would be formed in the new planted pastures with decrease of the disturbances and stabilization of the topsoil. It consented that the results above can be applied for avoiding soil and water erosion, and reducing the possibility of desertification as well if the planted pasture will be cut instead of being grazed around the first planted year.

Keywords: planted pasture; bryophyte community; species diversity; CCA; Tibet

(上接第 222 页)

Retrieving soil moisture based on terrain factors

—A case study in Yanhe River Basin

LIU Xiao-jing¹, LI Xin-ping¹, YANG Qin-ke², LIU Xian-long¹

(1. College of Resources and Environment; Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Department of Urban and Resources; Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Landsat Thematic Mapper image and DEM data are used to retrieve Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) of Yanhe River Basin. And air temperature is corrected by terrain factors, such as elevation, slope, aspect and terrain shadings, which reveals temperature diversity with terrain in detail. A spatial model designed with ERDAS software can be used to retrieve Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI). And TVDI is a method of monitoring soil moisture based on terrain factors, which is proved to reflect soil moisture status efficiently.

Keywords: DEM; land surface temperature; temperature vegetation dryness index; soil moisture