

基于 TVDI 的黄土高原地表干燥度与土地利用的关系研究

李正国¹, 王仰麟^{1*}, 吴健生^{1,2}, 张小飞²

(1. 北京大学 环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学 深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 基于地表温度和植被指数的经验关系构建地表干燥度指数。该指数对 $T_s/NDVI$ 特征空间的生态特征的解释, 对土壤和作物的水分含量具有一定的指示意义。通过对地表干燥度进行分级, 分析陕北黄土高原区地表含水状况的空间差异, 进而结合该地区的主要土地利用类型, 探讨各类型的干燥度情况, 并对不同地表干燥度条件下各土地利用类型对地表水分的保持能力差异进行分析, 结果表明, 在该区相对湿润环境中, 林地以及疏林地的水分保持能力优于农地和草地, 但在干旱的环境下, 草地则好于林地及疏林地。建议根据不同土地利用类型的保水能力, 在湿润区域增加林地的面积比例, 在偏湿润区域增加疏林地的面积, 在干旱区域增加草地的比例, 减少农地开垦。

关键词: TVDI; 土地利用; 黄土高原

文章编号: 1000 0585(2006) 05 0913 09

1 引言

土壤水分状况与植被覆盖和土地利用密切相关^[1~3]。一方面, 地表土壤水分影响到植物和作物的生长; 另一方面, 土地利用和植被覆盖也影响地表土壤水分的含量与分布^[4]。因此, 如何在干旱及半干旱区保持地表土壤水分显得尤为重要^[2]。目前的相关研究多围绕流域尺度上土壤水分与土地利用的时空分布关系展开讨论^[3~7], 对于宏观区域尺度上两者关系研究尚较为缺乏。

植被状态和压力可以通过热红外波段和可见光/近红外比值之间的互补性得到很好的反映, 尤其是水分的压力^[8]。大量相关研究表明像元在地表温度 (Surface temperature, 简称 T_s) /植被指数 (NDVI) 空间中的位置受很多因素影响, 其中有从理论分析出发^[9], 但更多的是基于土壤-植被-大气传输模型 (SVAT) 的模拟结果^[10, 11], 利用 SVAT 模型估算用于定义地表温度/植被指数的梯形, 分析地表温度和大气温度的差值和植被指数之间的关系, 提取 $T_s/NDVI$ 特征空间的形状, 并对该概念给出理论证明。一般来说, 采用 SVAT 模型, 可以通过对地表温度/植被指数空间分析来获取地表有效土壤水分^[12], 结合对 $T_s/NDVI$ 特征空间的生态特征的解释构建地表干燥度指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI), 其对土壤和作物的水分含量具有一定的指示意义^[8, 13]。与分布式水文模型提取的土壤水分比较可以发现 TVDI 所反映的土壤水分空间变化细节更为明

收稿日期: 2005 11 14; 修订日期: 2006 03 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40471002); 中国博士后科学基金项目 (2005038293)

作者简介: 李正国 (1980), 男, 江西上饶人, 博士研究生。自然地理学专业。E-mail: lzg_123@263.net

*通讯作者: 王仰麟, E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn, 电话: (010) 62759374

显^[6,7]。

本文选择陕北黄土高原地区, 利用 TVDI 算法评价区域地表干燥度状况, 结合林地、疏林地、草地和坡耕地等 4 种典型的黄土高原土地利用类型, 评价土地利用类型对土壤水分分布的影响和不同土地利用类型的土壤水分状况, 并从改善区域地表土壤水分的角度, 提出土地利用结构调整建议。

2 研究区概况

研究区地处陕西省北部, 东经 $107^{\circ}28'$ 至 $111^{\circ}15'$, 北纬 $35^{\circ}21'$ 至 $39^{\circ}34'$, 东隔黄河, 与山西省相望; 西以子午岭为界, 与宁夏、甘肃接壤; 北邻内蒙古; 南接渭南、铜川、咸阳三市。境内主要为窟野河、无定河、清涧河、延河、汾川河以及部分洛河等流域 (图 1)。全区属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候, 四季分明。全区总面积 80606km^2 , 分属延安和榆林两市, 下辖 25 个县、385 个乡镇、9110 个行政村。至 2003 年底, 总人口达 5.39×10^6 人, 其中农业人口 4.43×10^6 人。区内沟壑纵横, 地形条件复杂, 为重点水土流失区^[14~16]。由于长时间水土流失, 贫瘠的土壤产生了广种薄收的问题, 大量耕地不但破坏了生态植被, 亦严重限制了劳动力和土地资源的开发潜力。



图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

3 数据及处理方法

3.1 数据预处理

本研究的数据分析处理是在遥感图像处理软件 ENVI 4.0、地理信息系统软件 ArcGIS 9.0 的支持下共同完成的。

为了精确评价研究区植被地表水分状况的空间分布, 本研究使用中国农科院农业自然资源与农业区划研究所提供的 Terra/MODIS 数据产品, 包括 Mod13 (地表温度) 和 Mod11 (植被指数) 两种产品格式, 空间分辨率分别为 500m 和 250m, 影像时间为 2003 年 9 月的下旬合成数据。通过与陕北黄土高原区行政边界掩膜 (MASKING) 处理, 得到研究区范围地表温度 (见图版 2, 图 2b) 和植被指数 (见图版 2, 图 2a)。

土地利用类型数据源于 2003 年的 Landsat 卫星的 TM 系列影像, 包括 Landsat-7 的 ETM+6 个波段影像 (除全色波段和两个热红外波段)。轨道号为分别为 126-32~36、127-33~36 和 128-34~35, 合计 11 景影像。经过大气辐射校正和初步几何纠正, 对照 1:50000 地形图选取控制点。采用最大似然分类法对研究区进行土地利用分类, 为简化研究过程, 重点分析了林地、疏林地、草地和坡耕地等 4 种主要土地利用方式。

3.2 TVDI 的计算原理

稀疏植被地区的地表温度的解译由于同时受到土壤和植被的影响而变得更为复杂, 对于具有相对固定辐射率的裸土, 地表温度主要取决于土壤水分含量、蒸发控制以及地表热属性等^[8], 但上述影响因素并不是线性叠加的^[17]。相关研究表明, 对于水分条件良好的

地表，地表温度和 $NDVI$ 的关系与地表土壤水分（土壤水分增加可以加大土壤的热通量）更为直接相关，而不是作为对潜在热能的限制性控制^[13]。通过地表温度和植被指数散点图分析，可以发现其散点分布呈三角形^[18, 19]或梯形^[11]。在相同大气和地表湿度状况下，不同的地表类型有着不同的 $T_s/NDVI$ 斜率和截距^[20]。

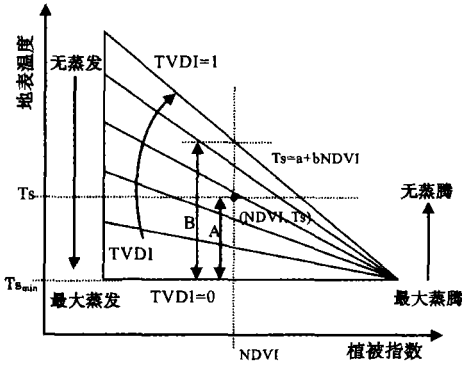


图 3 TVDI 原理示意^[8]（对于某给定像元的 TVDI 估算值为线段 A 与 B 的比值）

Fig. 3 Definition of the TVDI^[8] (TVDI for a given pixel estimated as the proportion between lines A and B)

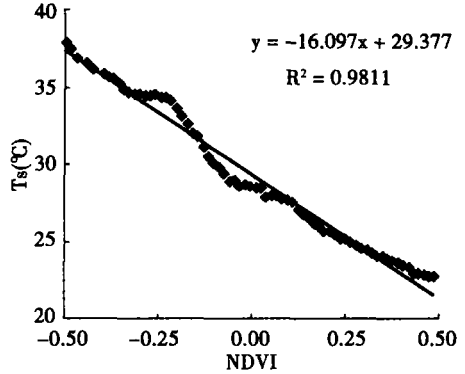


图 4 TVDI 干边的线性方程拟合

Fig. 4 Dry edge values used for estimation of TVDI

图 3 展示了 $T_s/NDVI$ 特征空间的概念框架，主要体现了 T_s 与 $NDVI$ 的关系。左侧边代表了不同湿度的裸土的温度变化，横轴代表随着植被绿度的上升，最大地表温度下降。斜边表示在干旱条件下，对于某一给定的地表类型和气候条件，地表温度所能达到的极限，可通过在 $T_s/NDVI$ 特征空间中定义等值线来代表不同的干旱程度。例如， $TVDI$ 值为 1 是干边（Dry edge），代表有限的水分供应； $TVDI$ 值为 0 则是湿边（Wet edge），具有最大的土壤蒸发蒸腾总量和无限的水分供应。 $TVDI$ 的计算公式为：

$$TVDI = \frac{T_s - T_{Smin}}{a + bNDVI - T_{Smin}} \quad (1)$$

其中， T_{Smin} 为三角形中最小的地表温度，定义了相应的湿边， T_s 为给定像元的观测温度， $NDVI$ 为观测的归一化植被指数值， a 和 b 分别为定义干边的线性拟合方程 ($T_{Smax} = a + bNDVI$) 中的参数， T_{Smax} 为给定 $NDVI$ 值下的最大地表温度。通过从湿到干、从裸土到全植被覆盖的各种条件下，在大范围区域进行像元采样估算参数 a 和 b (图 4)。

需要指出的是，像元在 $T_s/NDVI$ 特征空间位置受到诸多因素的影响。首先， $TVDI$ 的计算主要取决于地表温度和植被覆盖率，而稀疏植被地区的地表温度的解译同时受到土壤和植被的影响而变得更为复杂^[8, 21]。其次，由于植被覆盖率是通过 $NDVI$ 的简单转换来实现，而植被覆盖率影响着传感器接受的裸土和植被信息的总量，并造成不同地表类型温度的差异^[22]。

4 结果与分析

4.1 TVDI 分布特征及其影响因子

通过对 $TVDI$ 计算结果按密度分级，共划分为 10 级（见图版 2，图 2c）。然后统计不同等级 $TVDI$ 的地表温度和 $NDVI$ 的均值与方差（表 1）。结果表明，随着 $TVDI$ 值增

加, 地表干燥度随之升高, 表现为地表温度从 22.86°C 持续上升到 37.03°C , 且空间变异加剧; $NDVI$ 均值则从 0.29 持续下降至 -0.10 。结合研究区多年平均降雨量 (Annual mean precipitation, 简称 Amp) 的空间分布, 可见, 年降雨量从 556.93mm 下降至 349.35mm , 反映了地表干燥程度的增强。该结果证实, $TVDI$ 能有效地反映研究区地表温度、降水以及植被覆盖对地表土壤水分空间分布的综合影响。

表 1 $TVDI$ 及其主要影响因子的关系

Tab 1 Relationship between $TVDI$ and its influencing factors

$TVDI$ 分级	$TVDI$		T_s		$NDVI$		Amp	
	均值	方差	均值 ($^{\circ}\text{C}$)	方差	均值	方差	均值 (mm)	方差
1	0.18	0.03	22.86	0.81	0.29	0.20	556.93	0.45
2	0.25	0.02	24.43	0.95	0.17	0.21	529.48	0.59
3	0.30	0.01	25.86	0.89	0.08	0.17	515.51	0.56
4	0.35	0.02	27.12	0.93	0.03	0.15	491.50	0.60
5	0.41	0.02	28.77	0.88	-0.04	0.12	457.63	0.50
6	0.47	0.02	30.41	0.84	-0.07	0.09	434.35	0.38
7	0.53	0.02	32.19	0.94	-0.12	0.09	407.39	0.28
8	0.60	0.02	34.07	1.01	-0.15	0.09	390.24	0.22
9	0.66	0.02	35.55	0.96	-0.15	0.08	375.86	0.26
10	0.75	0.05	37.03	1.10	-0.10	0.10	349.35	0.33

4.2 不同土地利用类型的 $TVDI$ 分布

通过统计研究区主要土地利用类型的地表干燥度分布状况, 可以了解年内土地利用类型及其结构的土壤水分分布特点。研究结果表明, 林地的 $TVDI$ 值主要集中在 1~4 级 (图 5a), 其中有超过 40% 的面积位于 2 级, 总体来说, 林地所处区域的地表水分状况良好; 疏林地的情况类似林地 (图 5b), 但其分布区域较林地要广, 其典型 $TVDI$ 值处于 1~5 级, 且分布较均匀, 可见疏林地对地表土壤水分要求偏低, 其所处区域水分状况略差; 草地的 $TVDI$ 值则相对广泛的分布 (图 5c), 可见其对地表水分的要求很低, 多处于 $TVDI$ 值 3~5 级的区域; 农地因其植被覆盖以及温度特征与草地类似 (图 5d), 其 $TVDI$ 值分布特征与草地非常接近, 差别在于其 3~5 级区域的分布略多于草地。

总体来看, 研究区林地和疏林地主要分布于 $TVDI$ 值较低的区域, 其对所处区域地表水分状况要求较高, 而农地、草地则分布较广, 对地表土壤水分状况相对不敏感,

4.3 不同土地利用类型对 $TVDI$ 的影响

基于上文分析, 可知 $TVDI$ 的总体分布主要取决于多年平均降水量的空间分布, 而 $TVDI$ 的内部变化则和土地利用类型的分布相关。通过计算各土地利用类型的 $TVDI$ 距平值可以定量评估地表土壤水分受土地利用类型的影响程度, 其中, 正值表示对地表干燥度具有正面作用, 亦代表其地表土壤水分的保持能力较差, 负值相反。从分析结果可见, 林地在 $TVDI$ 值处于 1~8 级的区域时 (图 6a), 距平值为负值, 代表其具有一定地表土壤水分保持能力, 尤其是在较湿润的区域其保水能力更强, 而在最干旱区域 ($TVDI$ 9~10 级) 林地的存在反而会加剧地表水分的蒸散, 导致 $TVDI$ 值升高; 疏林地的情况类似于林地 (图 6b), 区别在于其在偏湿润区域 ($TVDI$ 1~3 级) 的保水能力差于林地, 但在干旱区域的保水能力则好于林地; 草地的情况和林地则完全相反 (图 6c), 其在 $TVDI$ 值

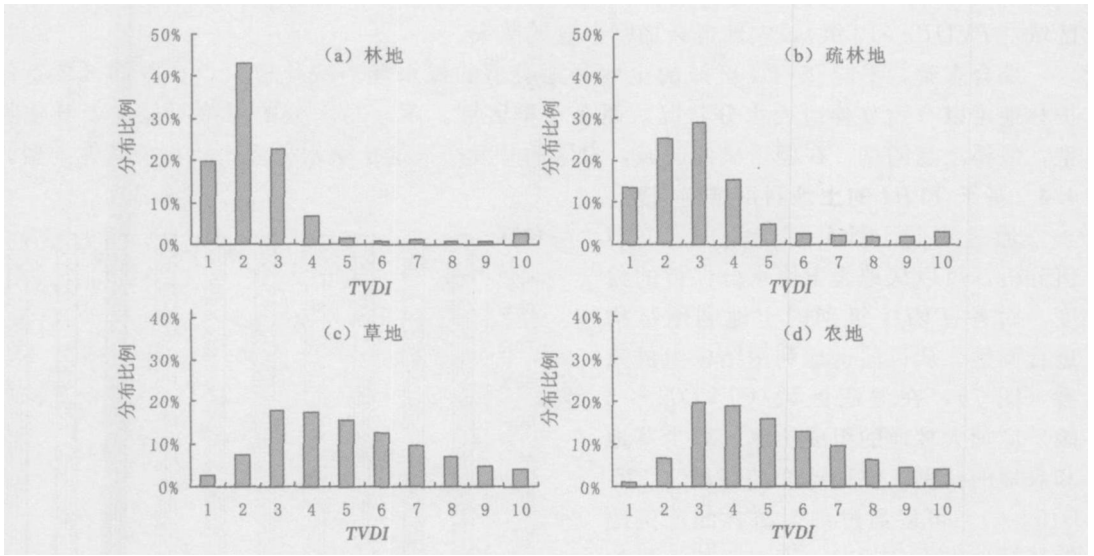


图 5 不同土地利用类型的 TVDI 分布特征

Fig 5 Distribution characteristics of TVDI in different landuse types

处于 1~6 级的湿润区域对水分保持均为负面影响,而在 7~10 级的干旱区域则有较好的保水性;农地的情况相对比较特殊(图 6d),其在 1~6 级区域对地表干燥度的影响类似草地,对应的水分散失较强,但其 7~8 级的保水能力要好于草地甚至林地,可在最干旱的

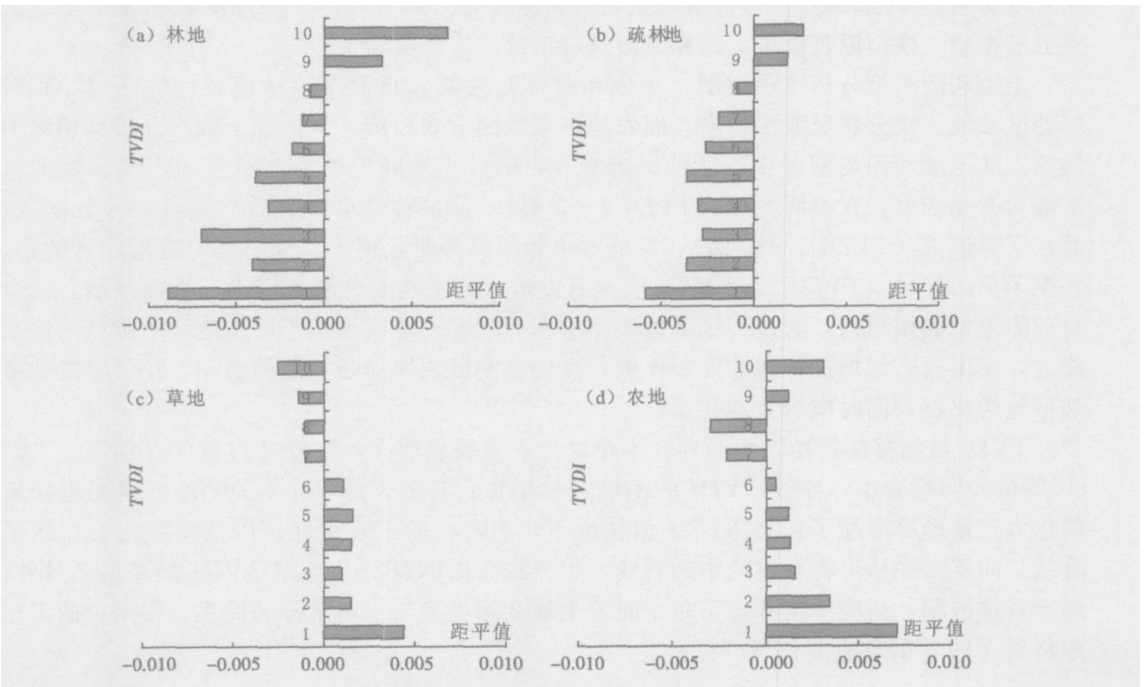


图 6 不同土地利用类型对 TVDI 的影响

Fig 6 Influence on TVDI of different landuse types

区域 ($TVDI9 \sim 10$ 级), 农地也会加剧水分的散失。

综合来看, 不同 $TVDI$ 区域的土地利用类型的保水能力变化较大, 在湿润区域, 保护林地可以有效改善地表水分状况, 而在干旱区域, 草地对水分的保持明显优于其他类型, 值得注意的是, 在偏干旱的区域, 农地的开发造成的土壤水分散失要小于其他类型。

4.4 基于 $TVDI$ 的土地利用结构调整

通过不同土地利用类型的 $TVDI$ 值分析, 可以从地表土壤水分保持的角度, 对各 $TVDI$ 级别的土地利用结构进行调整。从目前土地利用结构组成来看 (图 7), 在湿润区域 ($TVDI1 \sim 3$ 级) 应加大林地的组成比例, 减少草地和农地的比例; 在偏湿润的区域 ($TVDI5 \sim 6$), 可以通过加大疏林的比例改善区域地表水分状况; 而对于偏干旱的区域 ($TVDI7 \sim 8$ 级), 则需要适当压缩草地比例, 提升农地比例, 在最干旱的区域 ($TVDI9 \sim 10$ 级), 应该进一步加大草地比例, 减少农地开垦。

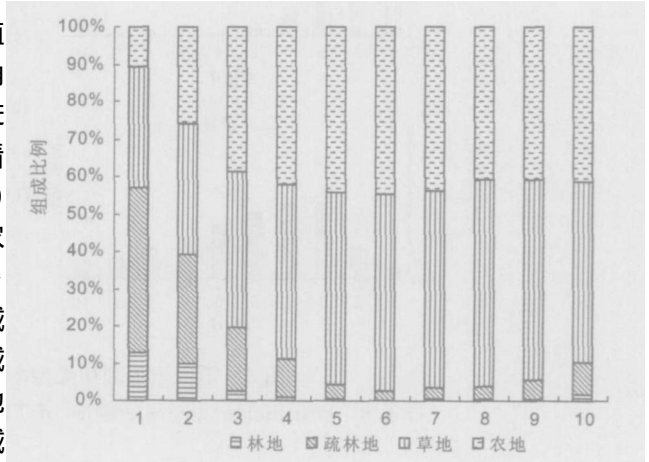


图 7 不同 $TVDI$ 级别的土地利用组成

Fig 7 Landuse composition of different $TVDI$ levels

5 结论与讨论

本文通过对地表温度/植被指数空间分析来获取 $TVDI$, 由于采用的数据完全基于遥感卫星影像, 模型原理简单、计算方便具有广泛的应用潜力。

土地利用类型分析结果表明, 林地和疏林地主要分布于 $TVDI$ 值较低的区域, 其所处区域地表水分状况要求较高, 而农地、草地则分布较广, 对地表土壤水分状况相对不敏感。从土地利用类型对 $TVDI$ 的影响来看, 同一土地利用类型在不同 $TVDI$ 区域的保水能力变化较大, 在湿润区域 ($TVDI 1 \sim 3$ 级), 保护林地可以有效改善地表水分状况, 而在干旱区域 ($TVDI 9 \sim 10$ 级), 草地对水分的保持明显优于其他类型, 值得注意的是, 在偏干旱的区域 ($TVDI 7 \sim 8$ 级), 农地开发造成的土壤水分散失要小于其他类型。结合目前的土地利用结构, 为改善区域地表土壤水分状况, 建议根据不同土地利用类型的保水能力, 在湿润区域增加林地的面积比例, 在偏湿润区域增加疏林地的面积, 在干旱区域增加草地的比例, 同时减少农地开垦。

$TVDI$ 虽然算法简单, 但尚存在不足之处, 主要表现在: 在较高的 $NDVI$ 值下, $TVDI$ 等值线间距变小, 导致 $TVDI$ 的不确定性增加; 另外, 将 $T_s/NDVI$ 特征空间由梯形简化为三角形更增加了在高 $NDVI$ 值情况下, $TVDI$ 的不确定性; 以及将湿边看作水平直线, 而不是在梯形特征空间中的斜线, 也导致在低 $NDVI$ 值区对 $TVDI$ 的高估。另外, 由于数据限制, 研究中仅考虑了单个时段土地利用类型与土壤水分的关系, 在未来的工作中将对 $TVDI$ 的动态变化展开分析。

致谢: 感谢中国农业科学院农业自然资源与农业区划研究所提供 TERRA/MODIS 数据

参考文献:

- [1] 傅伯杰, 王军, 马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响. 中国自然科学基金, 1999, 13(4): 225 ~ 227.
- [2] Fu B J, Chen L D. Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi arid hill area of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environment*, 2000, 44(3): 291 ~ 303
- [3] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素. *自然资源学报*, 2005, 20(4): 483 ~ 492
- [4] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al*. Geostatistical analysis of soil moisture variability on Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Environment Geology*, 2001, 41: 113 ~ 120
- [5] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al*. Soil moisture in relation topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2001, 240: 243 ~ 263
- [6] 王纲胜, 夏军, 牛存稳. 分布式水文模拟汇流方法及应用. *地理研究*, 2004, 23(2): 175 ~ 182
- [7] 郑红星, 刘昌明, 王中根. 黄河典型流域分布式水文过程模拟. *地理研究*, 2004, 23(4): 447 ~ 454
- [8] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79: 213 ~ 224
- [9] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, *et al*. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49: 246 ~ 263
- [10] Gillies R R, Carlson T N, Gui J, *et al*. A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15): 3145 ~ 3166
- [11] Moran M S, Clarke T, Kustas W P, *et al*. An evaluation of hydrologic parameters in a semiarid rangeland using remotely sensed spectral data. *Water Resources Research*, 1994, 30(5): 1287 ~ 1297.
- [12] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 77: 191 ~ 205.
- [13] Friedl M A, Davis F W. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48: 1 ~ 17.
- [14] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析. *生态学报*, 1995, 15(2): 113 ~ 120
- [15] 王占礼, 邵明安. 黄土高原典型地区土壤侵蚀共性与特点. *山地学报*, 2001, 19(1): 87 ~ 91.
- [16] 刘黎明, 林培. 黄土高原持续土地利用研究. *资源科学*, 1998, 20(6): 54 ~ 61.
- [17] Sandholt I, Andersen J, Dybkjaer G, *et al*. Use of remote sensing data in distributed hydrological models: applications in the Senegal River basin. *Danish Journal of Geography*, 1999, 99: 47 ~ 57.
- [18] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28: 940 ~ 948
- [19] 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 vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9: 161 ~ 173
- [20] Goetz S J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15): 71 ~ 94
- [21] Smith R C G, Choudhury B J. Analysis of normalized difference and surface temperature observations over south eastern Australia. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(10): 2021 ~ 2044
- [22] Nemani R R, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28: 276 ~ 284

Relationship between surface dryness degree and landuse types based on TVDI on Loess Plateau

LI Zheng guo¹, WANG Yang lin^{1,2}, WU Jian sheng^{1,2}, CHANG Hsiao fei²

(1. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2 Graduate School of Shenzhen, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Vegetation coverage and surface temperature (T_s) are important parameters to describe characters of land covers. More useful information will be created by integrated analyses of these two kinds of data together, which will help us to find out main principles of the temporal and spatial variation of surface soil moisture. The present paper aims at demonstrating how Terra/MODIS data may be used to estimate spatial patterns of soil moisture, a key variable in distributed hydrological models. The basic approach is to interpret the so called T_s /NDVI space in terms of surface soil moisture status. To understand the relationship between them and landuse types on the Loess Plateau, a simplified land surface dryness index (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) based on an empirical parameterization of the relationship between surface temperature and vegetation index is suggested.

Based on examination of Terra/MODIS image of the Loess Plateau, acquired in September, 2003, NDVI (MOD11) and T_s (MOD13) are investigated as an alternative indicator of vegetation abundance and land surface temperature. Based on Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) image, the landscape classification map is conducted on supervised classification and interactive modification. To examine soil moisture conditions at the surface, TVDI is conducted with T_s and NDVI. Then, we evaluate change of TVDI under different landuse types formed by both natural and human activities. First, TVDI was divided into 10 levels to describe the spatial variability of surface soil moisture on the Loess Plateau. Second, we evaluated the water holding capacity of each landuse type to different dryness degrees.

The results are as follows: (1) Based on satellite derived information only, TVDI is conceptually and computationally straightforward, and the potential for operational application of the index is therefore large. (2) The spatial variation in TVDI reflects the variation in moisture on a finer scale than can be derived from the hydrological model in this case. (3) It can be inferred that the water holding capacity in forestland and sparse woodland is better than farmland and grassland in relatively wet condition, and grassland is better than forestland and sparse woodland in relatively dry condition. (4) From the aspect of vegetative restoration on the Loess Plateau, according to variability of water holding capacity in different landuse types, it could be suggested that increasing forestland and sparse woodland area in relatively wet region, increasing grassland area and reducing land reclamation in dry region can promote the process of ecological pattern optimization.

Key words: TVDI; landuse type; Loess Plateau

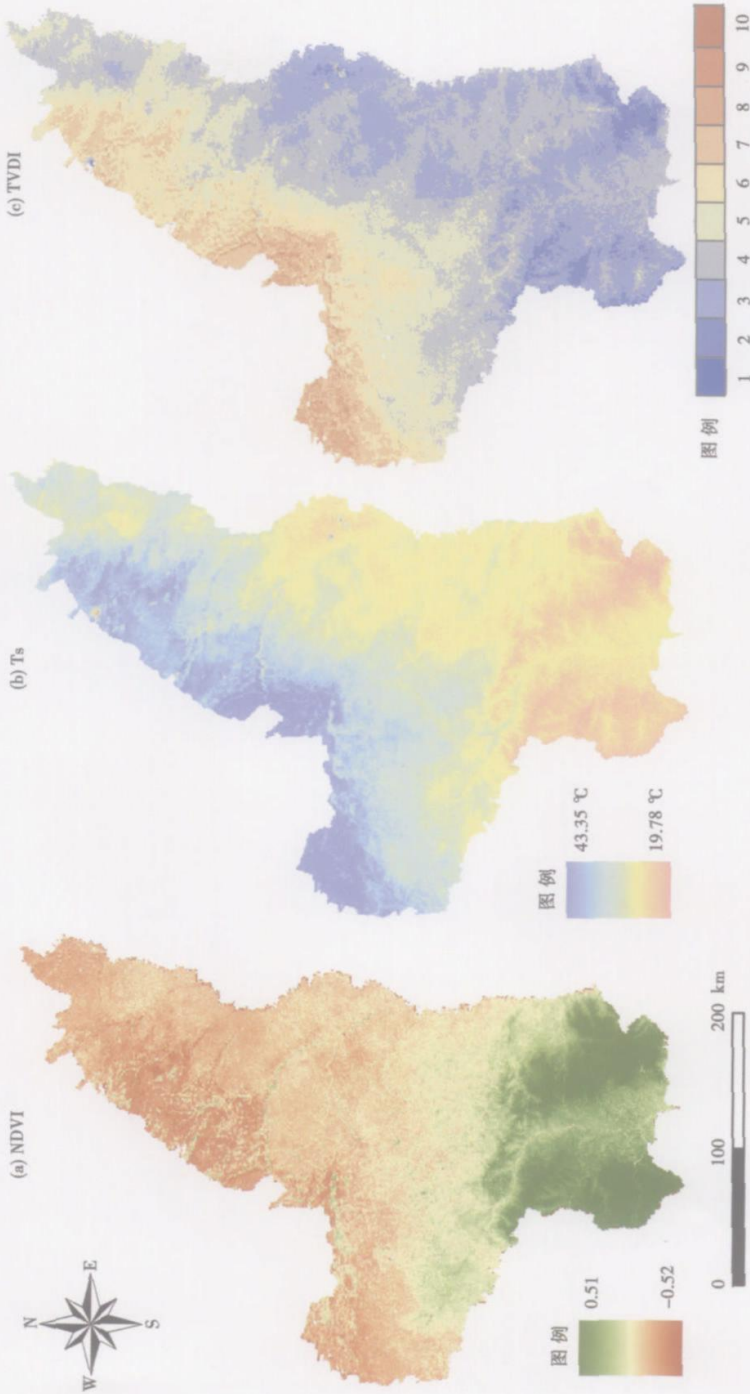


图 2 研究区地表干燥度及其影响因子空间分布
Fig.2 Distribution of TVDI and its influencing factors in the study area