

基于改进型垂直干旱指数的塔里木河流域绿洲 与荒漠区干旱时空变化对比

郭浩^{1,2}, 古丽·加帕尔¹, 包安明¹, 罗敏^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用 2001—2013 年 8 天合成 MODIS A1 时间序列数据计算改进型垂直干旱指数(MPDI), 应用趋势性分析、重标极差(R/S)分析等方法研究了塔里木河流域绿洲与荒漠区干旱时空变化状况及其可能原因。结果表明: 在过去 13 年, 塔里木河流域绿洲与荒漠区总体呈湿润趋势, 绿洲稳中转湿, 湿润趋势较明显且幅度较大; 而荒漠区相对稳定, 湿润趋势相对较小。绿洲与荒漠大部分地区未来变化趋势与过去 13 年变化趋势呈现较高的一致性。塔里木河干流上游、中游部分地区、尉犁县部分灌区等区域出现持续性干旱迹象, 应引起相关管理部门的重视。

关键词: 塔里木河; 绿洲; 荒漠; MPDI; R/S 分析

文章编号: 1000-694X(2017)04-0775-09

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2016. 00057

中图分类号: P462. 3

文献标志码: A

0 引言

塔里木河是中国最大的内陆河, 地处中国新疆南部、塔克拉玛干沙漠腹地, 气候干旱, 年降水量少且时空分布不均, 水资源短缺现象日趋严重, 生态系统十分脆弱, 干旱是本流域最主要的自然灾害。自 20 世纪 70 年代, 在以水资源利用为核心的人类活动的推动下, 流域生态系统出现了诸如河流断流、水质恶化、尾间湖干涸、大片胡杨死亡等系列问题^[1-3]。2001—2013 年, 国家启动实施了塔里木河流域近期综合治理规划, 先后采取了灌区节水、水库改造、河道治理、生态输水等系列措施, 干流下游生态状况得到显著改善^[4-6]。评价 2001—2013 年塔里木河流域干旱的时空分布特征, 总结旱情规律和进行趋势预报分析可以为塔里木河流域综合治理工作提供相关的信息和技术支持, 以提高水资源管理主动性和决策的科学性。然而, 针对该研究区的干旱监测甚少, 目前并未发现存在干旱遥感监测的相关研究。

干旱是指因水分的收支或供求不平衡而形成的持续的水分短缺现象。干旱可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱等 4 类, 农业干旱是

指在无地表水资源供给情况下, 一段时期土壤水分减少而造成的作物减产或失收现象^[7-9]。本文关注的干旱主要是研究区水分缺失影响农业、生态可持续发展的现象。传统站点监测代表范围有限, 数据实时性较差, 动态性很难保证, 人力财力消耗大, 效率低下, 数据稳定性受站点和操作人员影响因素也较大, 数据更新存在困难^[10]。而遥感监测干旱具有面状分布、覆盖范围广、时空分辨率高、时效性强、数据易获取等特点, 能够直接或间接反演大范围干旱所需地表参数, 为区域干旱监测提供有效手段^[11]。

近年来, 国内外学者对干旱遥感监测进行了大量研究^[12-17]。基于 NIR-Red 光谱特征空间的干旱遥感监测也得到进一步扩展, 其中詹志明等^[18]在建立 NIR-Red 特征空间的基础上构建土壤水分新方法。Ghulam 等^[19]结合 TM 和 MODIS 遥感影像, 提出基于近红外-红光(或短波红外)构造的波谱特征空间既能够植被生物量变化, 而且可以表征土壤水分变化, 并根据此规律提出了垂直干旱指数(PDI, Perpendicular Drought Index)。然而, PDI 更适用于裸土和低植被覆盖区土壤水分监测, 在植被覆盖度较高的地区精度较低。针对 PDI 的缺点, Ghulam 等^[20]在 PDI 的基础上考虑了植被覆盖度

收稿日期: 2015-11-15; **改回日期:** 2016-04-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41171295), 新疆维吾尔自治区重大专项课题(201230117-1), 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050104)

作者简介: 郭浩(1989—), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事气候变化与干旱研究。E-mail: casguohao@163.com

通信作者: 古丽·加帕尔(E-mail: glmr@ms. xjb. ac. cn)

(f_v) 因子, 提出改进型垂直干旱指数 ($MPDI$, Modified Perpendicular Drought Index)。 $MPDI$ 能够有效反映植被覆盖度较高地区的土壤水分情况^[20-26]。 本文选取 MOD09A1 数据计算 $MPDI$, 结合趋势分析和 R/S 分析等方法, 分析了近 13 年塔里木河“四源一干”流域平原区绿洲和荒漠区土壤水分的变化情况, 并从生态工程和人类活动等角度讨论了其发生变化的可能原因, 旨在为塔里木河“四源一干”流域水资源合理分配和生态环境保护提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况

塔里木河流域是中国最大内陆河流域, 主要位

于塔里木河盆地内, 总面积 $1.02 \times 10^9 \text{ km}^2$, 其中山地占 47%, 平原区占 22%, 沙漠面积占 31%。 20 世纪 40 年代后, 塔里木河流域由 9 大水系逐渐演变成阿克苏河、叶尔羌河、和田河、开都河-孔雀河、塔里木河干流“四源一干”的格局(图 1)。 塔里木河流域平原区环绕塔克拉玛干沙漠, 属于大陆性温暖带极端干旱气候, 多年平均气温 $10.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 多年平均降水量 $17.4 \sim 42.8 \text{ mm}$, 属于极端干旱地区。

由于 $MPDI$ 无法反映积雪及深层地表水分状况^[26], 本文主要研究塔里木河流域“四源一干”平原区, 即流域内海拔低于 2 000 m 的地区^[27]。 根据经过实地验证的 2010 年土地利用解译结果, 将受人类

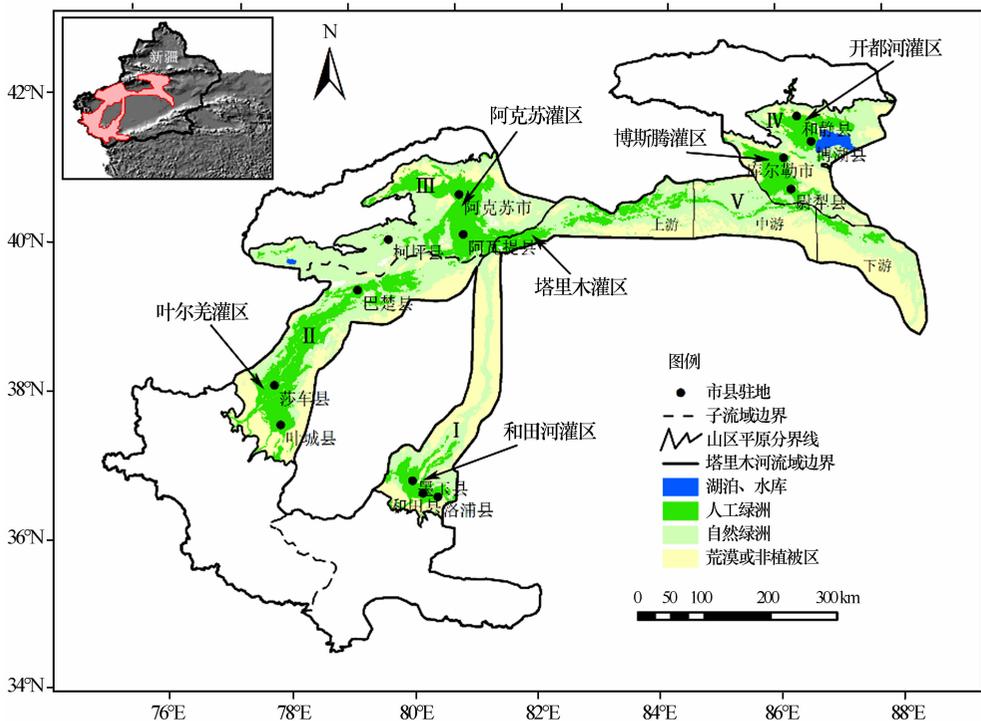


图 1 塔里木河“四源一干”平原区示意图(I:和田河流域; II:叶尔羌河流域; III:阿克苏河流域; IV:开都河-孔雀河流域; V:塔里木河干流流域)

Fig. 1 The sketch map of four sources and one main stream area of Tarim Basin

活动影响较大的旱地、水田和园地归并为绿洲区; 受人类活动的影响相对较小自然植被, 包括草本沼泽、草地、稀疏草地、灌木林、稀疏灌木林、河谷林、稀疏林归并为荒漠区, 对于 $MPDI$ 无法反映土壤水分状况的沙漠、裸岩等无植被区采用掩膜的方式剔除。 研究区可分为和田河、叶尔羌河、阿克苏河、开都河-孔雀河(后简称开-孔河)平原区和塔里木河干流 5 大部分。 研究区绿洲区主要包括和田河灌区、叶尔羌灌区、阿克苏灌区、塔里木灌区、博斯腾湖灌区和开都河灌区共六大灌区。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文选用的遥感数据影像为 2001—2013 年 MODIS/MOD09A1 的 8 天合成数据集。 本数据来源于美国土地过程分布式数据中心 (<https://lpdaac.usgs.gov>)。 MODIS/MOD09A1 数据集为 8 天合成的 L2 级反射率数据产品, 空间分辨率为 500 m, 用于计算植被覆盖度和 $MPDI$ 。 解码、拼接、转

投影等初步处理工作采用 MODIS Reprojection Tool(MRT)软件进行,投影坐标系为 Albert 等面积投影。通过 IDL 编程实现 *NDVI*、植被覆盖度和 *MPDI* 的计算。其中,植被覆盖度采用 Baret 等^[28]的半经验植被覆盖度计算方法。

$$f_v = 1 - \left(\frac{NDVI_{MAX} - NDVI}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right)^{0.6175} \quad (1)$$

式中: $NDVI_{MAX}$ 和 $NDVI_{MIN}$ 分别为100%植被覆盖下 $NDVI$ 和裸土对应的 $NDVI$ 。

根据研究区内植被覆盖情况, $NDVI_{MAX}$ 和 $NDVI_{MIN}$ 分别取值为0.7和0。利用土壤在 NIR-Red 光谱特征空间中的特性建立 *PDI* 模型^[19],可用于估算土壤水分。为提高植被覆盖区反演精度,将植被覆盖度因子(f_v)引入 *PDI* 模型得到 *MPDI*^[20]。

$$MPDI = \frac{R_{red} + MR_{nir} - f_v(R_{v,red} + R_{v,nir})}{(1 - f_v) \sqrt{M^2 + 1}} \quad (2)$$

$$R_{nir} = MR_{red} + I \quad (3)$$

式中: R_{red} 、 R_{nir} 分别为经过大气校正的红光、近红外波段反射率; $R_{v,red}$ 和 $R_{v,nir}$ 分别为红光波段和近红外波段的植被反射率。根据 Ghulam 等^[25]研究结果,本文 $R_{v,red}$ 和 $R_{v,nir}$ 分别采用0.05和0.5。 M 为土壤基线斜率,取值为1.04。基于2001—2013年MODIS的 R_{red} 和 R_{nir} 波段多年平均值构建红光-近红外光谱特征空间,计算土壤基线斜率,剔除超过两倍标准差的异常值后取平均值作为本研究区土壤基线斜率。

植被覆盖度是一个无穷趋近于1的值^[21]。因此,将半经验公式估算植被覆盖度结果中大于1的植被覆盖度像元强制转化为趋近于1的值(0.99),从而保证在计算 *MPDI* 时分母部分不会为0。*MPDI* 为无量纲指数。*MPDI* 越大,表明越干旱。*MPDI* 的大小由植被覆盖和土壤水分两种因素确定,在裸露的土壤表面,土壤水分对 *MPDI* 影响大,而在植被覆盖的地表或农田,植被覆盖状况决定了 *MPDI*,土壤水分和植被覆盖度的增加都会使 *MPDI* 下降。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析

对 *MPDI* 进行 2000—2013 年年度变化趋势分析,以研究区 *MPDI* 逐栅格逐年参量为输入变量,对各参量长时间序列数据采用最小二乘法进行线性拟合,得到拟合回归直线的斜率 b 表征参量的年变化速率。斜率为正,表明参量增加,反之则减少变化

速率计算公式下:

$$slope = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (4)$$

式中: $slope$ 为线性拟合斜率; x_i 为第 i 年的参量; t 为年份; n 为总年数。当 $slope > 0$ 时,表明随着时间变化,评价参量数值升高,即评价因子存在增加趋势,反之,当 $slope < 0$ 时,表明随着时间变化,评价参量呈下降趋势。

2.2.2 R/S 分析

重标极差分析(R/S, Rescaled Range Analysis)^[29]是一种基于长时间序列记忆分析的方法。该方法由英国水文学者 Hurst 于 1951 年最先提出,并被广泛用于水文、气候、地质等多个地学领域^[30-32],并被多次应用于基于遥感数据的植被覆盖变化等研究^[31,33-39]。本文利用该分析方法对研究区未来干旱发展趋势进行预测分析。R/S 分析方法的主要计算原理如下:

给定时间序列 $\{MPDI(t), t=1, 2, \dots, n\}$ 对于任意正整数 τ , 定义该时间序列的均值序列:

$$\overline{MPDI}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} MPDI(t) \quad t=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

计算累积离差:

$$X_{t,\tau} = \sum_{t=1}^{\tau} MPDI_{(t)} - \overline{MPDI}_{(\tau)} \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (6)$$

计算极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

计算标准差:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (MPDI_t - \overline{MPDI}_{(\tau)})^2} \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

若存在 $R/S \propto \tau^H$, 则说明 $\{MPDI(t)\}, t=1, 2, \dots, n$ 时间序列存在 Hurst 现象, H 值称为 Hurst 指数。当 $H=0.5$ 时,表明时间序列差分的自相关系数为0,即时间序列前后的变化无关;当 $H > 0.5$ 时,表明时间序列差分的自相关系数大于0,即时间序列的变化前后正相关;当 $H < 0.5$ 时,表明时间序列差分的自相关系数小于0,即时间序列的变化前后负相关。

3 绿洲与荒漠干旱时空分布格局

基于 2001—2013 年生长季(第 81~289 天)

MODIS 数据计算得到塔里木河流域平原区绿洲与荒漠区逐年累积 *MPDI*, 并得到绿洲、荒漠区近 13 年生长季 *MPDI* 变化趋势情况(图 2)。

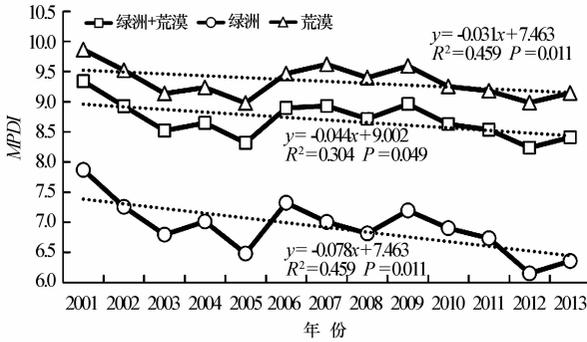


图 2 2001—2013 年生长季累积 *MPDI* 变化趋势

Fig. 2 The average annual variation curves for growing-season accumulated *MPDI* from 2001 to 2013

塔里木河绿洲、荒漠以及绿洲+荒漠年际 *MPDI* 均呈现小幅波动总体下降的趋势且变化趋势基本一致。荒漠区 *MPDI* 整体较高, 说明荒漠区土壤水分含量相对较低, *MPDI* 负向的变化速率也较低 (-0.031); 而绿洲 *MPDI* 整体较低, 土壤含水量较高, 湿润趋势明显, 变化斜率达 -0.078 。由此说明, 近 13 年绿洲土壤含水量较高且湿润趋势明显, 而荒漠区土壤含水量较低但相对稳定, 湿润趋势较弱。

图 3 为研究区 2001—2013 年生长季累积 *MPDI* 平均值的空间分布。受人类活动影响显著的绿洲区 *MPDI* 明显低于受人类活动影响较小的荒漠区。从以人工灌区为主的绿洲到以自然植被为主的荒漠区, 随 *MPDI* 的增大, 土壤水分含量逐渐降低。其中叶尔羌灌区、阿克苏灌区、和田河灌区、塔里木灌区和开都河灌区几大灌区绿洲 *MPDI* 较低, 土壤

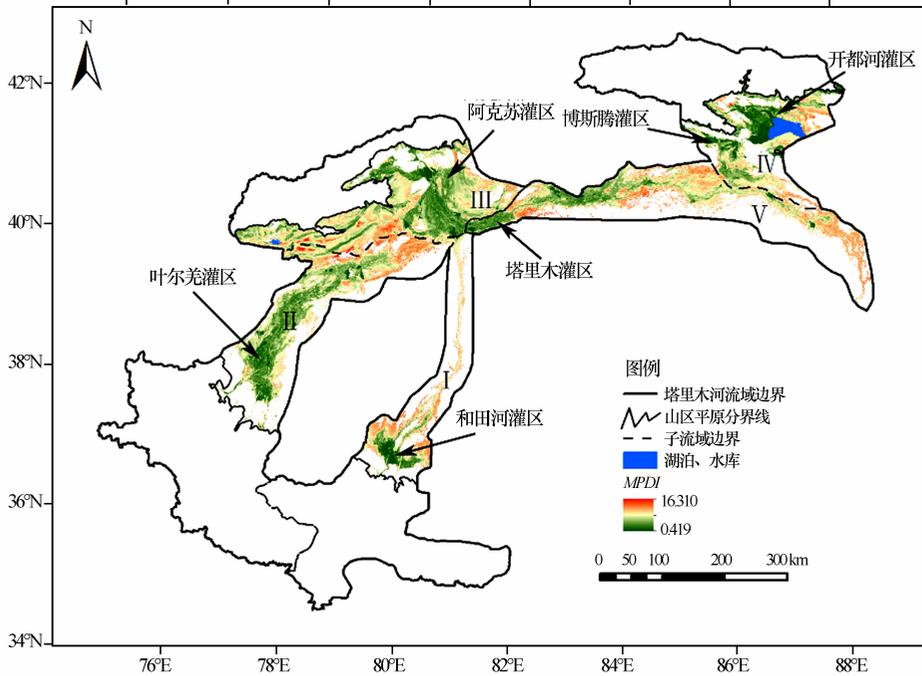


图 3 2001—2013 年绿洲和荒漠生长季累积 *MPDI* 平均值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of growing-season accumulated *MPDI* over oasis and desert in Tarim basin from 2001 to 2013

水分相对充足, 而博斯腾灌区绿洲以及塔里木河中下游绿洲地区的 *MPDI* 较高, 土壤水分相对较差。相对于绿洲, 荒漠区相对干燥, 土壤含水量较低。特别对于阿克苏灌区绿洲西侧、阿克苏灌区东侧、田河下游荒漠区、塔里木河上中游部分地区以及下游大部地区, *MPDI* 较高, 土壤含水量偏低。

4 绿洲与荒漠干旱动态变化特征

4.1 “四源一干”绿洲与荒漠干旱格局变化

图 4 反映了塔里木河绿洲和荒漠区 2001—

2013 年生长季累积 *MPDI* 变化率的空间分布情况。研究区土壤水分以稳定为主, 稳定区域面积占整个研究区面积的 55.97% (表 1)。约 37% 的地区呈现湿润趋势, 其中约 33% 地区变化速率 $-0.2 \sim -0.05$, 转湿的变化趋势较为缓慢; 仅有不足 5% 的区域呈现出快速转湿趋势, 零散地分布在和田河灌区、阿克苏灌区、博斯腾灌区北部和叶尔羌灌区东部等地区。绿洲转湿地区主要分布在各大灌区绿洲, 其中以和田河灌区、叶尔羌灌区东部地区、阿克苏灌区北部、南部及东南部、开都河灌区大部以及博斯腾

灌区北部。荒漠区转湿趋势相对较弱,主要散布在各灌区周边地区以及塔里木河中游下游河道两侧地区。

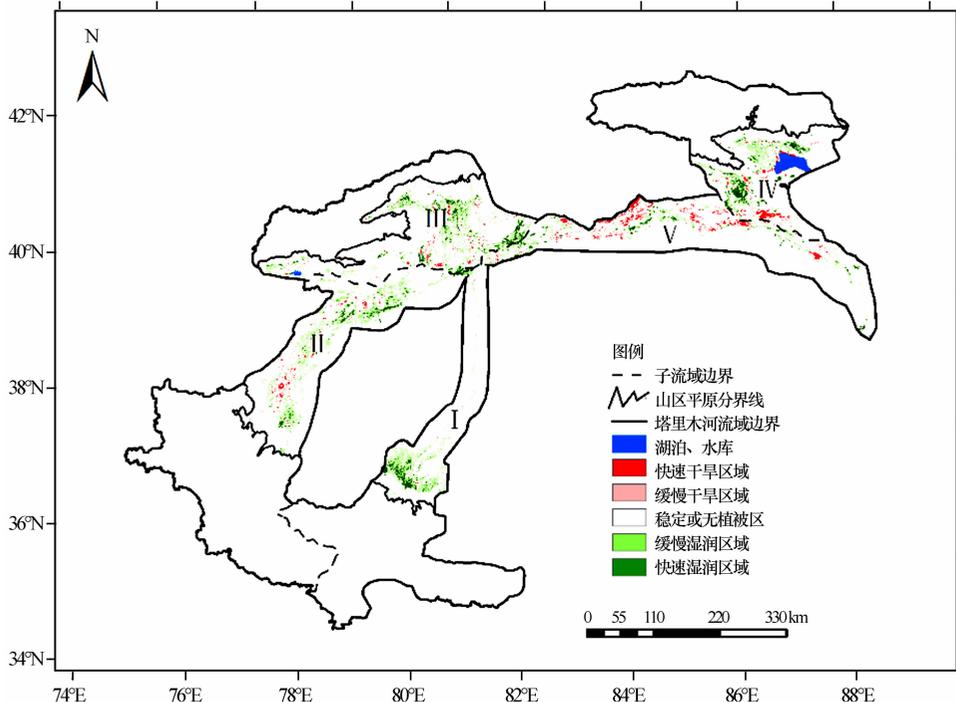


图 4 2001—2013 年生长季累积 MPDI 变化率空间分布 (I : 和田河流域; II : 叶尔羌河流域; III : 阿克苏河流域; IV : 开都河-孔雀河流域; V : 塔里木河干流流域)

Fig. 4 The spatial distribution of the change trend for MPDI in growing season from 2001 to 2013

表 1 2001—2013 年生长季累积 MPDI 变化趋势面积比例

Table 1 The statistical results of MPDI change trend in the growing season from 2001 to 2013

S _{MPDI}	变化类型	绿洲+荒漠/%	绿洲/%	荒漠区/%
≥ 0.2	快速干旱	0.70	0.35	0.82
0.05~0.2	缓慢干旱	6.00	5.84	6.06
-0.05~0.05	稳定	55.97	35.21	63.44
-0.2~-0.05	缓慢湿润	32.94	48.53	27.33
≤ -0.2	快速湿润	4.39	10.06	2.35

S_{MPDI}为生长平均 MPDI 在 2001—2013 年间变化率。slope 分级区间阈值根据不同像元值所占比例的突变点设定。

绿洲和荒漠 MPDI 变化趋势面积比存在较大差异。绿洲整体以湿润趋势为主,而荒漠区则较为稳定。绿洲呈现湿润趋势的面积占绿洲总面积的百分比高达 58.59%,48.53%的绿洲呈现缓慢湿润趋势,快速湿润面积百分比也较高,达 10.06%。荒漠区以稳定为主,63.44%的荒漠面积土壤水分状况保持稳定。虽然不如绿洲湿润趋势明显,但荒漠湿润趋势面积百分比(27.33%)仍明显高于干旱趋势面积百分比(6.88%)。

研究区整体呈现干旱趋势的面积比重较小,占整个研究区面积的 6.7%,其中缓慢干旱面积仅占 6%,快速干旱趋势面积不足 1%。绿洲和荒漠区的干旱面积比重均较低(分别为 6.19%和 6.88%),且

均以缓慢干旱趋势为主,绿洲和荒漠缓慢干旱面积比重分别为 5.84%和 6.06%,快速干旱的面积比重均不足 1%。

总体而言,2001—2013 年塔里木河研究区土壤水分变化趋势稳中变湿,绿洲和荒漠区均呈现出湿润趋势面积远大于干旱趋势面积的状况,绿洲湿润趋势较为明显,而荒漠区湿润趋势相对较弱。

4.2 子流域荒漠与绿洲干旱变化

为进一步阐明不同地区土壤干湿状况,表 2 给出 2001—2013 年塔里木河“四源一干”五个子流域绿洲和荒漠 MPDI 变化趋势斜率和相对变化幅度。所有流域 MPDI 变化趋势均为负向,表明 13 年间

塔里木河各流域绿洲和荒漠土壤水分状况均有不同程度的改善,但对于未通过显著性检验的区域而言,其负向系数仅能说明存在转湿迹象但并未形成稳定的趋势。就绿洲而言,开-孔河和和田河流域绿洲 *MPDI* 变化速率最大,且通过 0.01 水平的显著性检验。其次是阿克苏河和塔河干流中游的绿洲,两者也通过了 0.05 水平的显著性检验。而叶尔羌河、干流上游和干流下游变化趋势系数最低且不显著。

表 2 不同流域绿洲 *MPDI* 变化规律差异

Table 2 Statistics of *MPDI* change trend in growing season for different sub-basins

流域	变化趋势系数/13a		相对变化幅度/%	
	绿洲	荒漠区	绿洲	荒漠区
和田河	-0.071**	-0.38**	-30.510	-10.063
叶尔羌河	-0.144	-0.064	-16.439	-9.817
阿克苏河	-0.057*	-0.045	-17.233	-6.667
开孔河	-0.109**	-0.004	-23.122	-5.903
干流上游	-0.041	-0.011	-16.406	-6.325
干流中游	-0.066*	-0.007	-13.861	-4.748
干流下游	-0.034	-0.045*	-11.635	-7.014

** , $P < 0.01$, 差异极显著; * , $0.01 < P < 0.05$, 差异显著。

相对变化幅度结果显示 13 年期间绿洲变化幅度明显高于荒漠区变化幅度。和田河绿洲和荒漠 *MPDI* 减少幅度在各子流域均最大,表明和田河流域土壤水分状况有较大幅度的转湿。虽然塔里木河生态治理工程增加下游供水,生态状况的已恢复,但结果表明而塔河干流转湿幅度均为最小,且变化幅度由大到小依次为上游、中游和下游。这与塔里木河干流土壤水分供给方式和生态植被恢复有关。一方面,环境干旱,蒸发量巨大,塔里木河主要通过河道补给地下水然后再供给植被吸收。这使得导致表层土壤补给不足,相对干燥。另一方面,生态环境改善,植被恢复有助于表层土壤湿度的增加。因此,塔河干流大部地区呈现湿润趋势,但变化趋势较缓且变化幅度较小。值得注意的是,开孔河绿洲和荒漠区变化幅度差别最大,相差近 4 倍。

5 绿洲与荒漠干旱变化趋势持续性

基于 R/S 分析原理,利用 IDL 编程实现 *H* 的逐像元计算,得到塔里木河平原绿洲 2001—2013 年生长季累积 *MPDI* 变化的 Hurst 指数空间分布图(图 5),结合 *Slope* 变化率和 *H* 分类得到趋势持续性空间分布情况。总体看来,“四源一干”地区 *H* 较高。因此,*MPDI* 趋势持续性空间分布与 *MPDI* 趋

而荒漠区中,和田河转湿趋势最明显,系数达 $-0.38/13a$ 且通过极显著检验。干流下游也显著转湿,其变化速率为 $-0.045/13a$ 。这主要是由于在生态输水影响下,荒漠区植被在一定程度上得到了恢复^[4,40]。其他流域荒漠区变化趋势均不显著,其中变化趋势最小的是开-孔河和干流中游,系数仅为 $-0.004/10a$ 和 $-0.007/10a$,这与对应的绿洲转湿的趋势形成对比。

势空间分布图分布基本一致。这表明塔里木河绿洲与荒漠未来一段时间干旱状况与过去 13 年变化趋势基本一致。在大部分地区持续转湿的趋势中,但仍有部分地区呈现持续干旱趋势。塔里木河上游、中游部分地区、下游的大西海子附近以及博斯腾灌区东南部(尉犁县东南)等地区存在持续干旱趋势。

表 3 为 *MPDI* 变化趋势持续性分级统计结果,研究区(绿洲+荒漠)总体稳中转湿,稳定面积比例为 55.97%,持续湿润趋势面积比重(31.11%)明显高于持续干旱比重(6.49%)。持续湿润和持续干旱的速度较缓,均以微弱湿润和微弱干旱变化为主。从干旱转湿润的面积同样高于湿润转干旱的面积,其百分比分别为 6.21%和 0.21%。绿洲转湿迹象明显,持续湿润和反持续从干旱到湿润总面积比重高于稳定面积比重,高达 58.59%,其中 40.57%的面积呈现持续轻微湿润,8.29%的面积呈现反持续从干旱到湿润的变化趋势。荒漠区以稳定为主,稳定区面积比重达 63.44%,但呈现持续湿润的荒漠区面积比重(24.22%)仍高于持续干旱的荒漠面积比重(6.69%)。

6 结论与讨论

研究基于 *MPDI*,对塔里木河流域综合治理工

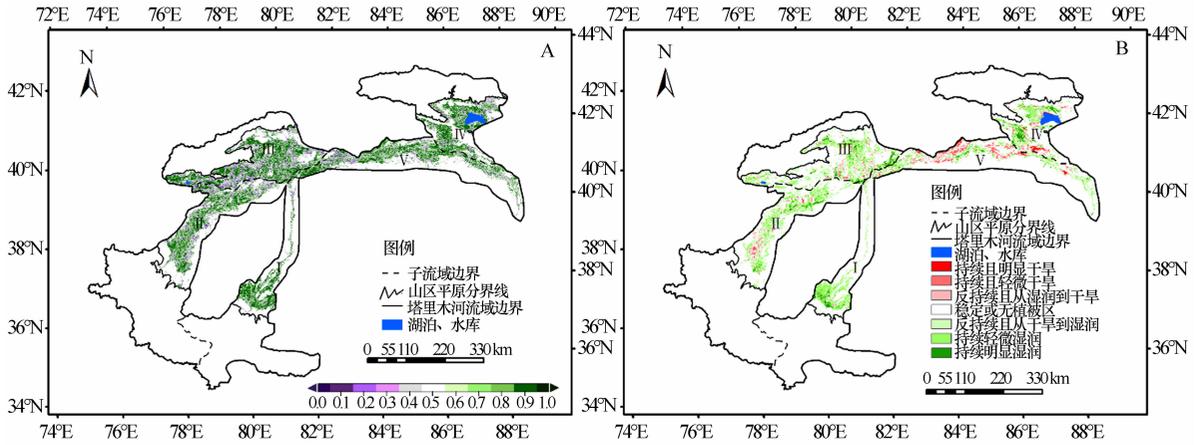


图 5 塔里木河流域 2001—2013 年生长季累积 MPDI(A)Hurst 指数空间分布图(B)趋势持续性空间分布图 (I :和田河流域; II :叶尔羌河流域; III :阿克苏河流域; IV :开都河-孔雀河流域; V :塔里木河干流流域)

Fig. 5 Spatial distribution of (A) Hurst exponent and (B) sustainability of the mean MPDI in the growing season in Tarim basin from 1982 to 2012

表 3 2001—2013 年 MPDI 变化趋势持续性分级面积比例

Table 3 Statistical results of the trend and Hurst exponent in Tarim basin from 2001 to 2013

SMPDI	H	变化类型	绿洲+荒漠/%	绿洲/%	荒漠区/%
<-0.2	>0.5	持续且明显湿润	4.20	9.73	2.22
-0.05~-0.2	>0.5	持续且轻微湿润	26.91	40.57	22.00
<-0.05	<0.5	反持续且从干旱到湿润	6.21	8.29	5.47
-0.05~0.05	—	稳定	55.97	35.21	63.44
>0.05	<0.5	反持续且从湿润到干旱	0.21	0.28	0.19
0.05~0.2	>0.5	持续且轻微干旱	5.81	5.60	5.88
>0.2	>0.5	持续且明显干旱	0.68	0.32	0.81

程实施后,流域“四源一干”绿洲与荒漠区干旱时空变化趋势进行了对比分析。综合治理工程实施后,塔里木河“四源一干”绿洲区表现为大部分地区持续明显转湿,少部分地区亦有干旱的迹象,与之对比,荒漠区呈现相对较弱的小幅转湿趋势,并在空间分布上具有一定差异。

2001—2013 年,塔里木河“四源一干”绿洲 MPDI 小幅波动,总体呈下降趋势,土壤湿度总体增加,并明显高于荒漠区。R/S 分析结果显示,塔里木河流域绿洲总体 Hurst 指数较高,表明大部地区呈现持续性转湿。绿洲与荒漠 13 年间变化幅度差别较大,开-孔河绿洲变幅为荒漠区变幅的近 4 倍。分区统计结果显示,与流域其他荒漠区相比,塔里木河干流中游及开孔河流域荒漠区湿润趋势微弱。

值得注意的是,塔里木河流域绿洲局部地区呈现干旱趋势,且 R/S 分析表明该趋势具有持续性。塔里木河上游和中游的河岸北侧区域干旱面积较大且干旱趋势较为明显。为保证塔里木河干流下游生

态用水需求,塔里木河干流上游灌区以喷滴灌节水技术替代原有大水漫灌方式,农业节水技术的应用使得该区域灌区土壤水分含量降低^[40-41],由此导致以 MPDI 监测到的土壤水分呈现下降趋势。塔里木河中游地区的干旱现象主要受塔河输水堤和生态闸的影响。由于输水堤和生态闸的修建,原有的漫溢过程改变为现在的地下水渗透过程^[40,42],区间耗水量呈减少趋势。土壤水分补给量大幅度下降的同时,补给方式的改变也使得地表土壤得不到应有的水分补给,造成该地区的干旱现象。开-孔河博斯腾灌区东南部地区和大西海子周边灌区均辖属尉犁县灌区,该地区的干旱由多因素叠加引起。一方面该地区博斯腾湖、塔里木河供水不足,旱情不断^[43];另一方面耕地的明显增加、节水灌溉措施的实施,也使得表层土壤水分含水量下降^[44]。

针对绿洲持续明显转湿和荒漠区的小幅转湿趋势以及部分地区出现的干旱现象,应引起相关部门的重视,一方面加强水资源宏观调控,合理配置工农

业用水和生态用水比例;控制耕地扩张,适当调整源流供水方案。另一方面,在干流中游河道两岸地区优化生态闸运作方式,在保证下游基本输水的同时充分利用生态闸的生态保护和修复作用,保证中游两岸荒漠植被生态需水的需求。

参考文献:

- [1] 陈燕,玉米提·哈力克,汪飞,等.塔里木河下游生态退化成因分析[J].新疆农业科学,2009,46(1):156-160.
- [2] 赵振勇,王让会,张慧芝,等.塔里木河下游荒漠生态系统退化机制分析[J].中国沙漠,2006,26(2):220-225.
- [3] 周孝明,陈亚宁,李卫红,等.近50年来塔里木河流域下游生态系统退化社会经济因素分析[J].资源科学,2008,30(9):1389-1396.
- [4] 毛炜峰,高前兆,秦莉,等.塔里木河干流输水运行对河流生态功效的分析[J].干旱区地理,2008,31(4):604-614.
- [5] 樊自立,徐海量,傅彦仪,等.塔里木河下游生态保护目标和措施[J].中国沙漠,2013,33(4):1191-1197.
- [6] 傅彦仪,徐海量,赵新风,等.漫溢干扰对塔里木河岸退化植被的影响[J].中国沙漠,2014,34(1):60-66.
- [7] Meteorological Drought—Policy Statement[C]. Bulletin of the American Meteorological Society,1997:847-849.
- [8] 袁文平,周广胜.标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比分析[J].植物生态学报,2004,28(4):523-529.
- [9] 王劲松,郭江勇,周跃武,等.干旱指标研究的进展与展望[J].干旱区地理,2007,30(1):60-65.
- [10] 宋炜.遥感监测干旱的方法综述[J].中国西部科技,2011,10(13):42-43,74.
- [11] 杨涛,宫辉力,李小娟,等.土壤水分遥感监测研究进展[J].生态学报,2010,30(22):6264-6277.
- [12] Patel N, Anapashsha R, Kumar S, et al. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status[J]. International Journal of Remote Sensing,2009,30(1):23-39.
- [13] Gao Z, Gao W, Chang N B. Integrating temperature vegetation dryness index(TVDI) and regional water stress index(RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2011,13(3):495-503.
- [14] 杜晓,王世新,周艺,等.一种新的基于MODIS的地表含水量模型构造与验证[J].武汉大学学报:信息科学版,2007,32(3):205-207,211.
- [15] 王娇,丁建丽,袁泽,等.基于特征空间的绿洲土壤水分监测算法改进[J].中国沙漠,2016,36(6):1606-1612.
- [16] 张喆,丁建丽,李鑫,等.TVDI用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J].中国沙漠,2015,35(1):220-227.
- [17] 李森,颜长珍,谢家丽.腾格里沙漠东南缘不同固定程度沙地土壤表层水分时空变化遥感分析[J].中国沙漠,2016,36(3):734-740.
- [18] 詹志明,秦其明,阿布都瓦斯提·吾拉木,等.基于NIR-Red光谱特征空间的土壤水分监测新方法[J].中国科学(D辑):地球科学,2006,36(11):1020-1026.
- [19] Ghulam A, Qin Q, Zhan Z. Designing of the perpendicular drought index[J]. Environmental Geology,2007,52(6):1045-1052.
- [20] Ghulam A, Qin Q, Teyip T, et al. Modified perpendicular drought index(MPDI): a real-time drought monitoring method[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2007,62(2):150-164.
- [21] 周正明.遥感光谱指数反演土壤水分及干旱时空分布研究[D].北京:中国气象科学研究院,2013.
- [22] 秦其明,姚云军,游林,等.基于PDI、MPDI和SPSI的农田干旱监测研究[C].遥感定量反演算法研讨会,北京,2010.
- [23] 杨学斌,秦其明,姚云军,等.PDI与MPDI在内蒙古干旱监测中的应用和比较[J].武汉大学学报:信息科学版,2011,36(2):195-198.
- [24] Shahabfar A, Ghulam A, Eitzinger J. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2012,18:119-127.
- [25] Ghulam A, Qin Q, Kusky T, et al. A re examination of perpendicular drought indices[J]. International Journal of Remote Sensing,2008,29(20):6037-6044.
- [26] Zang J H, Zhou Z M, Yao F M, et al. Validating the modified perpendicular drought index in the North China region using in situ soil moisture measurement[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE,2015,12(3):542-546.
- [27] 师庆东,肖继东,潘晓玲,等.近20年来新疆植被覆盖变化特征研究[J].干旱区研究,2004,21(4):389-394.
- [28] Baret F, Clevers J, Steven M. The robustness of canopy gap fraction estimates from red and near-infrared reflectances: a comparison of approaches[J]. Remote Sensing of Environment,1995,54(2):141-151.
- [29] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers,1951,116(1):770-799.
- [30] Sánchez Granero M A, Trinidad Segovia J E, García Pérez J. Some comments on Hurst exponent and the long memory processes on capital markets[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2008,387(22):5543-5551.
- [31] Peng J, Liu Z, Liu Y, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai Tibet Plateau using Hurst Exponent[J]. Ecological Indicators,2012,14(1):28-39.
- [32] Guli J, Liang S, Yi Q, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators,2015,58:64-76.
- [33] Cao L, Xu J, Chen Y, et al. Understanding the dynamic coupling between vegetation cover and climatic factors in a semi-arid region—a case study of Inner Mongolia, China[J]. Ecohydrology,2013,6(6):917-926.
- [34] Wang Y, Hou X, Wang M, et al. Topographic controls on vegetation index in a hilly landscape: a case study in the Jiadong Peninsula, eastern China[J]. Environmental Earth Sciences,

2013,70(2):625—634.

- [35] Liu X,Zhang J,Zhu X,et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000—2011[J]. *Journal of Geographical Sciences*,2014,24(2):288—302.
- [36] Jiang W,Yuan L,Wang W,et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*,2015,51:117—126.
- [37] Li S,Yan J,Liu X,et al. Response of vegetation restoration to climate change and human activities in Shaanxi-Gansu-Ningxia Region[J]. *Journal of Geographical Sciences*,2013,23(1):98—112.
- [38] Hou X,Wu T,Yu L,et al. Characteristics of multi-temporal scale variation of vegetation coverage in the Circum Bohai Bay Region,1999—2009[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(6):297—304.
- [39] 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*,2013(7):897—908.
- [40] 王进,龚伟华,沈永平,等. 塔里木河干流上游中、下段河床淤积和耗水对生态环境的影响[J]. *冰川冻土*,2009(6):1086—1093.
- [41] 满苏尔·沙比提,努尔卡木里·玉素甫. 塔里木河流域绿洲耕地变化及其河流水文效应[J]. *地理研究*,2010,29(12):2251—2260.
- [42] 张宏安,曹海涛,李晓铃,等. 塔里木河干流输水堤建设对两岸天然植被的影响及保护对策[J]. *水电站设计*,2004,21(1):91—93.
- [43] 何玉春,魏光辉. 新疆尉犁县农业用水现状及应对措施[J]. *水利技术监督*,2013(2):18—21.
- [44] 米雪晶. 尉犁县绿洲用地变化及其可持续利用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学 2010.

MPDI-based Comparison on Spatiotemporal Variation of Drought over Oasis and Desert in Tarim Basin

Guo Hao^{1,2}, Jiapaer Guli¹, Bao Anming¹, Luo Min^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on a regression analysis and Hurst index method, this study calculated the Modified Perpendicular Drought Index (MPDI) from 2001 to 2013 to investigated the spatial-temporal characteristics of droughts over oasis and desert of Tarim basin by using 8-day combined MODIS A1 dataset. The main results indicate that: both oasis and desert tend to be wetter. The oasis became wetter than before, and the amplitude of this trend over oasis is relatively larger than that over desert which is much more stable. According to the results of spatial distribution and statistical results of Hurst, the future trend seems to be consistent with the last 13 years. It is should be noted that some regions, such as the upstream region and midstream region of Tarim, the southeastern parts of irrigated area in Yuli county, show a persistent drier trend. The water resources management department and other relevant departments should pay more attention on such phenomenon.

Key words: Tarim River; oasis; desert; MPDI; R/S analysis