

黑河中游植被覆盖率变化趋势及其驱动因子分析

张更喜, 粟晓玲, 马心依

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:利用2002~2011年的黑河干流中游归一化植被指数数据获得植被覆盖率变化趋势,选取合适的NDVI阈值将整个区域划分为“绿洲区”和“荒漠区”,并分别探讨了地下水埋深、中游耗水量及累积降水量对两种区域面积和植被覆盖率变化的影响。结果表明:黑河干流中游植被覆盖率整体呈增长趋势,由2002年的32%增长到了2011年的36%,对植被覆盖率增长贡献最大的因素为绿洲区扩张,10年间绿洲区面积占比增长了10%;影响绿洲扩张的主要因素为地下水埋深和中游耗水量,绿洲区植被覆盖率变化较小,可忽略其影响。荒漠区植被覆盖率的变化主要受累积降水量影响。利用地下水埋深、中游耗水量、累积降水量可预测区域植被覆盖率的变化趋势,区分人类活动和气候变化对区域植被覆盖率的影响是可行的。

关键词:植被覆盖率;水位埋深;耗水量;降水量;绿洲区;荒漠区

中图分类号:S181 **文献标志码:**A

Analysis on the changing trend of vegetation cover rate and its driving factors in middle reaches of Heihe River

ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, MA Xinyi

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The changing trend of vegetation cover rate has been obtained by using the NDVI data during 2002 to 2011 in middle reaches of Heihe River. The whole region can be divided into oasis region and desert area by selected suitable NDVI threshold value. The influences of ground water table, water consumption in middle reaches and cumulative precipitation to the areas of two regions and the change of vegetation cover rate were discussed respectively. The results showed that: As a whole the vegetation cover rate in middle reaches of Heihe River was assumed an increasing trend, from 32% in 2002 had increased to 36% in 2011. The expansion of oasis area was the largest contribution factor for increasing vegetation cover rate. During 10 years, the oasis areas has increased 10%. The main factors to influence the expansion of oasis area were the ground water table and water consumption in middle reaches. But the change of the vegetation cover rate in oasis was rather small, so its influence can be ignored. The change of vegetation cover rate in desert region was major influenced by the cumulative precipitation. So it is feasible by using ground water table, water consumption in middle reaches and cumulative precipitation to forecast changing trend of regional vegetation cover rate and distinguishing the impacts between human activities and climate change on regional vegetation cover rate.

Keywords: vegetation cover rate; groundwater table; water consumption; precipitation; oasis region; desert area

作为生态系统的重要组成部分,植被在水循环、能量流动、生物化学循环等方面都起着至关重要的作用^[1]。监测植被的动态变化是更好地理解植被与气象因素反馈机制的重要手段,也是必要环

节之一^[2-4]。作为植被指数之一的归一化植被指数(NDVI)已得到广泛认可和应用,尤其是在区域和全球尺度上估计植被生物量、植被生长状况以及植被动态变化方面^[5]。

关于植被变化趋势的问题,已有学者在区域及全球尺度上进行过不同的研究^[6-9]。近年来随着全球气温的升高,北半球中高纬度地区植被覆盖率呈增长趋势^[7-8]。国内关于植被变化趋势的研究虽然起步较晚,但是发展尤为迅速。Xiao 等人^[10]在 2004 年研究了 1982-1998 年 17 年间植被变化趋势及其影响因子,认为在北部高纬度地区温度升高和降水量增加是造成植被覆盖率增长的主要因素;Fang 等人^[11]关于中国整体植被的研究也表明中国西北部地区植被增长趋势显著。由于植被生长受气候变化、CO₂ 浓度、氮沉积量、生态过程以及人类活动等众多因素的影响,如何区分自然因素和人为因素的影响仍然是一个难点,但已有学者做过探索性研究。如 Zhou 等人^[12]基于净初级生产力研究了黑河流域沙漠化动态变化与人类活动和气候变化的关系,探讨了人为因素和自然因素对沙漠化的贡献;Xiao^[13]利用线性回归方法研究了不同省份植被变化趋势及其与人为因素和自然因素的关系;Wang^[14]依据 NDVI 值将黑河下游地区划分为“灌溉区”和“非灌溉区”,探索了两区域对黑河下游整体植被覆盖率的贡献以及影响两种区域覆盖率变化的水资源因素。但是,关于黑河中游地区的研究较少,而且大部分研究并没有综合考虑地下水位、地上径流及降水对植被覆盖率变化的影响程度,本文旨在探索地下水埋深、中游耗水量、累积降水量对区域植被覆盖率变化的贡献,以期利用水量变化预测区域植被覆盖率变化趋势。

选取黑河干流中游为研究对象,依据生长长期的 NDVI 值将黑河干流中游地区划分为“绿洲区”和“荒漠区”,探索分水政策后黑河干流中游地区植被覆盖率的变化趋势以及两区域对植被覆盖率的贡献。

1 研究区概况

黑河流域是我国第二大内陆河流域,位于 37°44'~42°42'N 和 96°42'~102°08'E 之间,总面积约为 14 万 km²^[12]。研究区位于黑河干流中游,面积 1.3 万 km²,属大陆性中温带干旱气候,降水量少,蒸发量大,太阳辐射强烈,年均气温 7.4~8.5,年均降水量 108.3~150.0mm,降水主要集中在 6~9 月,占全年降水量的 70%~80%,年蒸发量 1340~2400mm^[15]。黑河出口口的径流量在过去几十年间呈增长趋势,上游莺落峡的多年平均径流量由 20 世纪 60 年代的 14.4 亿 m³ 增长到 90 年代的 15.7 亿 m³;而下游正义峡断面自上世纪 60 年代到 90 年代径流量由 10.5 亿 m³ 下降为 7.5 亿 m³(图 1),这主要

是因为自 20 世纪 60 年代起,中上游地区农田面积的扩张、城市化进程的加快、工业的发展等使中游地区耗水量急剧上升^[16-17],从而导致黑河下游东居延海在 1992 年出现了干涸现象,而西居延海干涸现象出现的时间则更早^[16]。为了恢复下游地区生态系统、抑制生态环境恶化,中国政府在 21 世纪初实施了分水政策,过去 10 年间正义峡的平均径流量达到了 10.5 亿 m³。中游地区由于受到分水政策的限制,取水量有所下降,而农田面积还在不断扩张^[20],经济发展仍然较快,需水量持续增大,导致地下水开采量增加,使得地下水位下降,2004 年下降幅度达到了最大值,之后地下水位又有所回升。在干旱半干旱地区,由于降水量稀少,地下水对植被种类、生长、结构有较大影响^[21]。

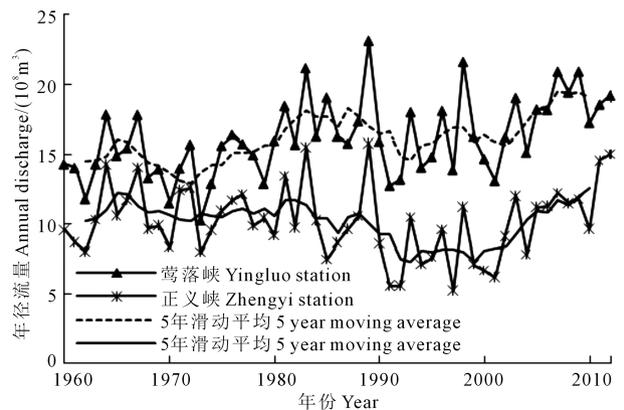


图 1 黑河莺落峡、正义峡年径流量

Fig. 1 Annual runoff at the Yingluoxia and Zhengyixia in Heihe River wells in middle reaches of Heihe River

2 资料和方法

2.1 降水、径流和地下水水位数据

本文的数据序列为 2002~2011 年的实测月资料。降水资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://www.escience.gov.cn>)的张掖、临泽、高台 3 个气象站数据,取 3 站平均值作为研究区的降水量;地下水数据选取研究区具有连续观测的 24 个潜水井的地下水埋深数据(图 2),见 254 页彩图,径流量资料为莺落峡、正义峡水文站年径流量。据调研,梨园河每年能够流入干流的水非常有限,因此选取莺落峡与正义峡年径流量之差代表干流中游地区耗水量。地下水与径流资料来源于国家自然科学基金委员会“黑河计划数据管理中心”(<http://www.heihedata.org>)。

2.2 归一化植被指数 (NDVI)

植被的动态变化,尤其是在大尺度范围内,可以利用遥感监测^[22]。NDVI 是根据遥感红光波段和

近红外波段的光谱值计算得出的用于监测植被生长状况以及植被覆盖程度的一种参数,到目前为止是应用最广泛的植被指数^[23]。本文的 NDVI 数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn),是基于 MODIS 的 NDVI 产品(MYD13A2 和 MOD13A2),利用改进的 HANTS 算法去云重建得到了 2002–2011 年每天、1km 分辨率 NDVI 数据集。为了避免因云、大气、太阳高度角等因素影响可能造成的 NDVI 值偏低的现象,利用最大值合成法(MVC, Maximum Value Composites)获取每年生长期最大的 NDVI 图像,即每一像元的 NDVI 值都是生长期内的最大值^[24]。

2.3 绿洲区的划分

在黑河干流中游地区,绿洲区面积分布较广,经常抽取地下水进行灌溉,地下水也会通过毛管作用进入土壤供植被吸收,从而维持原生植被的生长。灌溉植被与原生植被的地下水来源是同一地下水资源,使得区分这两种植被变得愈加困难。本文选取一个 NDVI 阈值来区分“绿洲区”和“荒漠区”^[14],因为绿洲区在生长季具有较高的 NDVI 值,区分出来的绿洲区既包括灌溉农田、草地、森林区也包括了地下水位埋深较浅的天然植被区。

为了获取 NDVI 阈值,将 2002~2011 年每年生长期的 NDVI 图像进行最大值合成,依据 2011 年土地利用图取得 NDVI 阈值为 0.12,即 NDVI 大于 0.12 的区域为绿洲区,小于 0.12 的区域为荒漠区。

2.4 植被覆盖率的计算

通过 NDVI 计算植被覆盖率,公式^[25]为

$$f_v = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (1)$$

式中, $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$ 分别表示无植被覆盖($f_v = 0$)和完全植被覆盖($f_v = 1$)的 NDVI 值,一般 $NDVI_{\min}$ 选裸地的 NDVI 值, $NDVI_{\max}$ 选取灌溉农田区的 NDVI 值^[26]。本文依据 2011 年土地利用类型图选取 $NDVI_{\min}$ 为 0.055, $NDVI_{\max}$ 为 0.65。

2.5 对植被覆盖率变化的贡献

将整个区域划分为两种类型之后,植被覆盖率由绿洲区的植被覆盖率(f_o)、荒漠区植被覆盖率(f_D)以及绿洲区和荒漠区的面积(A_o 和 A_D)确定^[14]。

$$f_v = \frac{A_o f_o + A_D f_D}{A_o + A_D} \quad (2)$$

定义绿洲区面积比 $A_o^* = \frac{A_o}{A_o + A_D}$,荒漠区面积

比 $A_D^* = \frac{A_D}{A_o + A_D}$,显然 $A_o^* + A_D^* = 1$,公式(2)可表示为:

$$f_v = A_o^* f_o + A_D^* f_D \quad (3)$$

对 f_v 进行全微分得:

$$df_v = \frac{\partial f_v}{\partial f_o} df_o + \frac{\partial f_v}{\partial A_o^*} dA_o^* + \frac{\partial f_v}{\partial f_D} df_D + \frac{\partial f_v}{\partial A_D^*} dA_D^* = A_o^* df_o + f_o dA_o^* + A_D^* df_D + f_D dA_D^* \quad (4)$$

f_v 的相对变化为:

$$\frac{df_v}{f_v} = \frac{f_o A_o^*}{f_v} \frac{df_o}{f_o} + \frac{f_o}{f_v} dA_o^* + \frac{A_D^* f_D}{f_v} \frac{df_D}{f_D} + \frac{f_D}{f_v} dA_D^* = X_{f_o} + X_{A_o} + X_{f_D} + X_{A_D} \quad (5)$$

X 分别表示四种因子(f_o, A_o, f_D, A_D)对植被覆盖率趋势变化的贡献。

3 结果分析

3.1 植被覆盖率趋势变化

黑河干流中游地区 2002 年平均植被覆盖率为 32%,2011 年为 36%,2002~2011 年 10 年间植被覆盖率总体呈增长趋势。2002 年绿洲区面积比 A_o^* 为 0.56,2011 年为 0.66,增长趋势显著,这主要是由绿洲区的扩张引起的。绿洲区的植被覆盖率 f_o 和荒漠区植被覆盖率 f_D 并无明显的趋势变化, f_o 均值为 0.54; f_D 均值为 0.06(图 3)。

利用趋势分析法分析 2002 年到 2011 年 10 年间黑河干流中游每个栅格点植被覆盖率的变化,公式^[27]如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{10 \times \sum_{i=1}^{10} i \times f_{v_i} - \sum_{i=1}^{10} i \times \sum_{i=1}^{10} f_{v_i}}{n \sum_{i=1}^{10} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{10} i \right)^2} \quad (6)$$

式中, i 表示年数, f_{v_i} 表示第 i 年的植被覆盖率, θ_{slope} 表示的是 2002~2011 年植被覆盖率的整体趋势变化; θ_{slope} 划分为 5 个标准^[28]: $\theta_{\text{slope}} < -0.006$ 时为显著减少; $-0.006 < \theta_{\text{slope}} < -0.001$ 时为轻度减少; $-0.001 < \theta_{\text{slope}} < 0.001$ 时为基本不变; $0.001 < \theta_{\text{slope}} < 0.006$ 时为轻度增加; $\theta_{\text{slope}} > 0.006$ 时为显著增加。

由图 4 中可以看出,10 年间黑河干流中游植被覆盖率总体呈增加趋势,显著增加与轻度增加的面积占总面积的 90%。

3.2 敏感性分析和趋势贡献

通过计算 2002~2011 年生长季平均值计算得出 $f_o = 0.53, f_v = 0.33, f_D = 0.06, A_o^* = 0.58, A_D^* = 0.42$,带入公式(5)得到植被覆盖率 f_v 的相对变化为:

$$\frac{df_v}{f_v} = 0.92 \frac{df_o}{f_o} + 1.62dA_o^* + 0.07 \frac{df_D}{f_D} + 0.17dA_D^* \quad (7)$$

式中,不同的系数代表了对整个区域植被覆盖变化的敏感程度,由上式可以看出植被整体盖度对绿洲区面积比 A_o^* 变化的敏感性最大,其次是绿洲区的植被覆盖率 f_o 。

自 2002 至 2011 年,植被覆盖率 f_v 的值由 32% 加至 36%,虽然导致每年变化的原因有所差异(图 5),但总体而言,绿洲区面积比 A_o^* 的贡献率是最大的。

由于 NDVI 阈值的选取具有主观性,为了保证评价结果的稳定性,选取了 5 种不同的 NDVI 阈值(0.10,0.11,0.12,0.13,0.14)来计算植被覆盖率的相对变化。尽管不同的 NDVI 阈值得到的敏感性参数有差异,但是对植被覆盖率变化趋势贡献最大的都为绿洲区面积(表 1)。

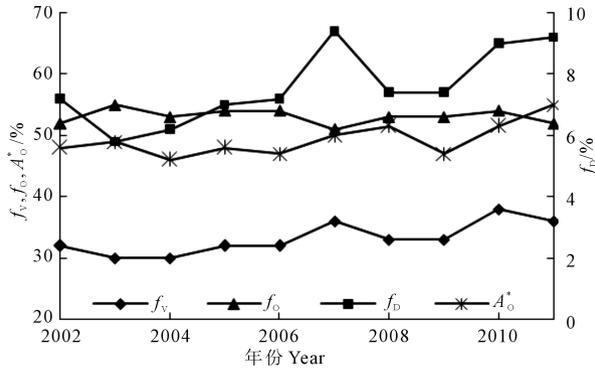


图 3 黑河干流中游植被覆盖率及绿洲区面积比的年际变化
Fig.3 The interannual variation of vegetation cover rate and oasis areas in middle reaches of Heihe River

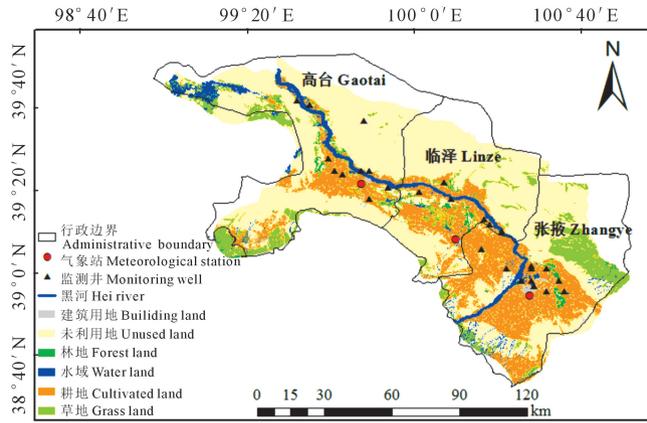


图 2 黑河干流中游土地利用及监测井位置图
Fig. 2 The land use and location of monitoring

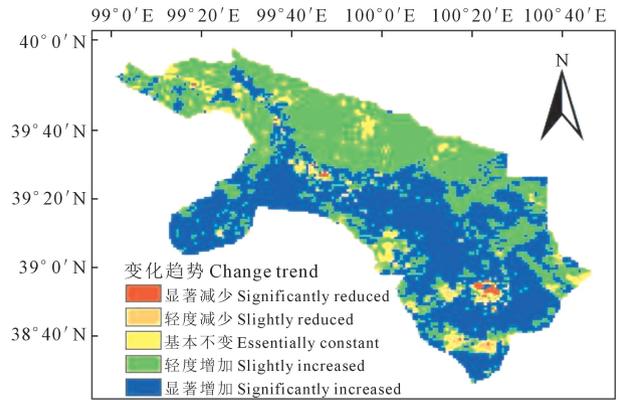
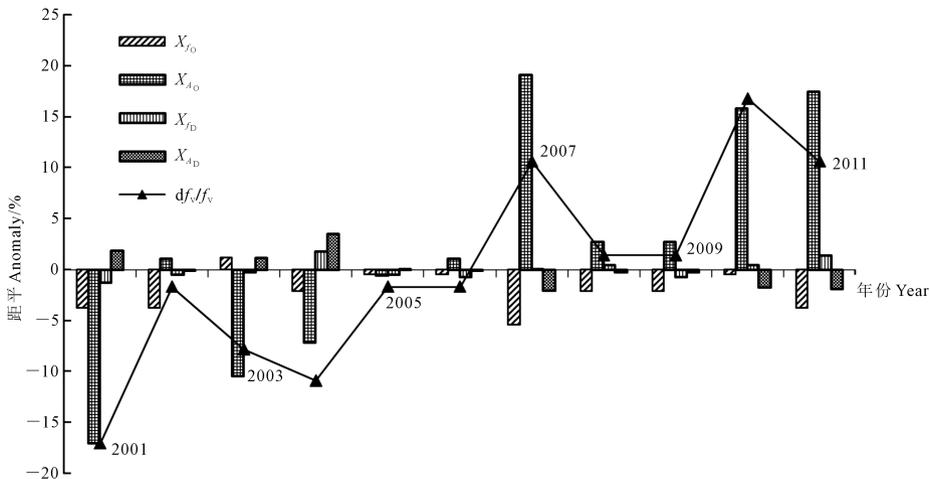


图 4 2002~2011 年黑河干流中游植被覆盖率变化趋势
Fig.4 The changing trend of vegetation cover rate in middle reaches of Heihe River during 2002 to 2011



X_{f_o} : 绿洲区植被覆盖率的贡献; X_{A_o} : 绿洲区面积变化的贡献; X_{f_D} : 荒漠区植被覆盖率的贡献;
 X_{A_D} : 荒漠区面积变化的贡献; df_v/f_v : 植被覆盖率相对变化

X_{f_o} : The contribution of vegetation cover rate in oasis areas; X_{A_o} : The contribution of oasis area variation; X_{f_D} : The contribution of vegetation coverrate in desert area; X_{A_D} : The contribution of desert area variation; df_v/f_v : The relative variation of vegetation coverrate

图 5 植被覆盖率相对值及四种贡献因子的年际变化

Fig.5 The interannual change of relative vegetation cover rate and four contribution factors

表 1 不同 NDVI 阈值下各贡献因子的敏感性及其贡献率

Table 1 The sensitivity and contribution rate of each contribution factor under different NDVI threshold values

NDVI 阈值 NDVI threshold	敏感性 Sensitivity	贡献 Attribution/%			
		X_{f_0}	$X_{A_0^*}$	X_{f_D}	X_{A_D}
0.10	$\frac{df_V}{f_V} = 0.96 \frac{df_0}{f_0} + 1.38dA_0^* + 0.04 \frac{df_D}{f_D} + 0.13dA_D^*$	2.30	102.60	4.60	- 9.50
0.11	$\frac{df_V}{f_V} = 0.94 \frac{df_0}{f_0} + 1.47dA_0^* + 0.05 \frac{df_D}{f_D} + 0.15dA_D^*$	7.30	102.20	0.80	- 10.30
0.12	$\frac{df_V}{f_V} = 0.92 \frac{df_0}{f_0} + 1.62dA_0^* + 0.07 \frac{df_D}{f_D} + 0.17dA_D^*$	16.70	90.90	2.50	- 10.10
0.13	$\frac{df_V}{f_V} = 0.91 \frac{df_0}{f_0} + 1.67dA_0^* + 0.08 \frac{df_D}{f_D} + 0.18dA_D^*$	34.10	93.60	13.50	- 10.80
0.14	$\frac{df_V}{f_V} = 0.89 \frac{df_0}{f_0} + 1.75dA_0^* + 0.10 \frac{df_D}{f_D} + 0.20dA_D^*$	3.70	93.60	13.50	-10.80

3.3 水量变化对植被覆盖率的影响

对植被覆盖率变化贡献最大的是绿洲区面积比 A_0^* , 绿洲区植被覆盖率 f_0 的变化很小, 可以忽略不计, 而 $A_D^* = 1 - A_0^*$, 可将公式(5) 简化为:

$$\begin{aligned} \frac{df_V}{f_V} &= \frac{f_0}{f_V} dA_0^* + \frac{A_D^*}{f_V} df_D + \frac{f_D}{f_V} dA_D^* \\ &= \frac{f_0}{f_V} dA_0^* + \frac{A_D^*}{f_V} df_D + \frac{f_D}{f_V} d(1 - A_0^*) \\ &= \left(\frac{f_0}{f_V} - \frac{f_D}{f_V} \right) dA_0^* + \frac{A_D^*}{f_V} df_D \end{aligned} \quad (8)$$

影响绿洲区面积比 A_0^* 的主要因素为中游耗水量和地下水埋深, 相关系数分别为 0.76、0.91(图 6(a,b)). 利用二元线性回归方法拟合 A_0^* 与中游耗水量 (W)、地下水埋深 (H) 的关系, 得出拟合公式:

$$A_0^* = \alpha H + \beta W + \gamma \quad (9)$$

拟合曲线得到经验系 $\alpha = -0.21, \beta = 0.016, \gamma = 136$; 如图 7 所示为实测绿洲区面积比 A_0^* 与预测值的比较。

影响荒漠区植被覆盖率 f_D 的主要因素为降水量, 取前一年 10 月至当年 9 月的累积降水量, 建立

荒漠区植被覆盖率与降水量的关系, 相关系数为 0.85 ($p < 0.05$) 见图 8。

绿洲区面积比 A_0^* 受中游耗水量 W 和地下水埋深 H 的影响, 因此将 dA_0^* 改写为 $\alpha dH + \beta dW$; 荒漠区植被覆盖率 f_D 受降水 P 的影响, 因此将 df_D 改写为 λdP , 区域植被覆盖率的相对变化可以表示为:

$$\frac{df_V}{f_V} = \left(\frac{f_0}{f_V} - \frac{f_D}{f_V} \right) (\alpha dH + \beta dW) + \frac{A_D^*}{f_V} \lambda dP \quad (10)$$

以相对形式表示:

$$\begin{aligned} \frac{df_V}{f_V} &= \left(\frac{f_0}{f_V} - \frac{f_D}{f_V} \right) \left(\alpha H \frac{dH}{H} + \beta W \frac{dW}{W} \right) + \\ &\frac{A_D^*}{f_V} \lambda P \frac{dP}{P} \end{aligned} \quad (11)$$

取研究时段均值 ($f_0 = 0.53, f_V = 0.33, W = 7.85, P = 136.2, f_D = 0.06, H = 4.41, A_0^* = 0.57, A_D^* = 0.43$) 以及经验系数 ($\alpha = -0.21, \beta = 0.016, \lambda = 0.0001$), 公式(11) 可以改写为:

$$\begin{aligned} \frac{df_V}{f_V} &= -1.32 \frac{dH}{H} + 0.18 \frac{dW}{W} + 0.02 \frac{dP}{P} \\ &= X_H + X_W + X_P \end{aligned} \quad (12)$$

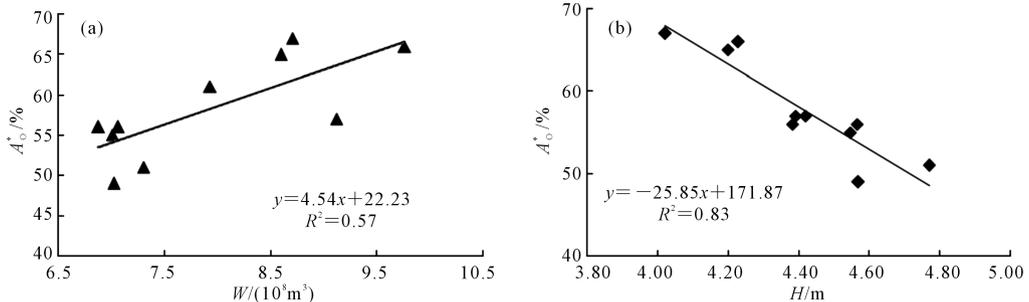


图 6 黑河干流中游绿洲区面积比 (A_0^*) 与年取水量 (W) 的关系 (a), 与地下水埋深 (H) 的关系 (b)

Fig.6 Relationship between oasis area ratio with annual water intake (a) and with groundwater table (b) in middle reaches of Heihe River

由上式可以看出,地下水位埋深增加 1% 将导致植被覆盖率减少 1.32%,而中游耗水量(径流量差)增加 1% 引起植被覆盖率增加 0.18%,降水量增加 1% 只会使植被覆盖率增加 0.02%,由此可以看出地下水位埋深的变化对植被覆盖率变化的影响最

大,降水量变化的影响最小。利用此模型预测区域整体植被覆盖率的相对变化,由图 9 可以看出,预测值与实测值的关系曲线斜率为 1.03,相关系数为 0.91,预测效果较好。

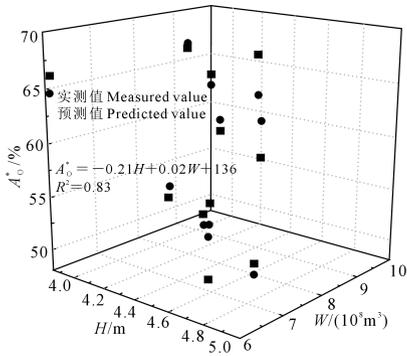


图 7 由中游耗水量 (W) 与地下水平均埋深 (H) 预测的绿洲面积比 (A_0^*) 与实测值的比较

Fig.7 The comparison between oasis area ratio (A_0^*) predicted by water consumption (W) in middle reaches and average groundwater table (H) with the observed values

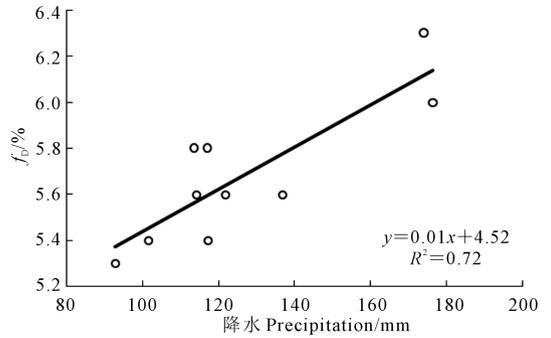
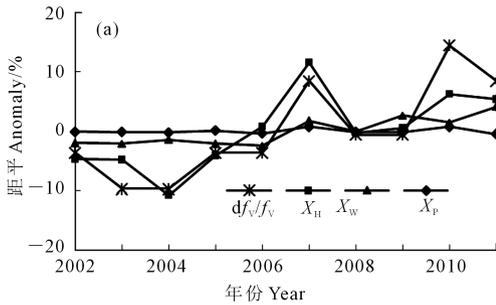


图 8 累积降水量与荒漠区植被覆盖率 (f_D) 的关系

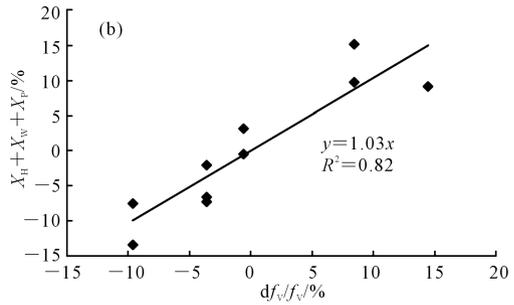
Fig.8 Relationship between cumulative precipitation with vegetation cover rate in desert areas (f_D)



X_H : 地下水平均埋深的相对变化; X_W : 中游年取水量的相对变化; X_P : 累积降水量的相对变化

图 9 植被覆盖率的相对变化 (df_v/f_v) 以及各水量的相对变化 (a), 由水量的相对变化预测得到植被覆盖率相对变化的预测值与实测值的关系 (b)

Fig.9 There lative variations of vegetation cover rate (df_v/f_v) and each water volume (a); The relationship between predicted value of vegetation cover rate forecasted by relative change of water volume with observed value (b)



4 讨论

本研究选取黑河干流中游生长季最大 NDVI 数据计算植被覆盖率,很好地避免了冰、雪等因素的影响,利用 NDVI 将整个区域划分为“绿洲区”和“荒漠区”是一种简单的方法,但是对于 NDVI 阈值的选取主观性较强,且不同区域对于该阈值的选取也会有所不同。利用全微分法将植被覆盖率的变化分解为 4 个驱动因子,获取绿洲区及荒漠区面积和植被覆盖率变化对区域植被覆盖率变化的贡献,并且可分别研究影响不同驱动因子的水资源因素。对植被覆盖率影响最敏感的贡献因子为绿洲区面积比 A_0^* ,绿洲区扩张是引起中游植被覆盖率增大的主要因素。建立地下水埋深、中游耗水量与绿洲面积的多元关系,相关性显著,中游耗水量主要用于农业灌溉,灌溉是保证人工绿洲健康发展的必要条

件,而适宜的地下水埋深则是天然植被健康生长的保障。Wang 等^[14]关于黑河下游的研究中也表明正义峡来水量是影响下游绿洲区植被覆盖率增长的主要因素。中游荒漠区地下水埋深普遍较大且无灌溉补给,植被生长主要依靠降水维持,因此年累积降水量与荒漠区植被覆盖率的关系显著。

气候变化和人类活动都会对区域植被覆盖率的变化产生影响,但是区分两种影响仍是一个难题。黑河中游是绿洲与荒漠共存的典型地区,人类活动主要集中在绿洲区,探索受人类活动影响的地下水埋深与中游耗水量对绿洲区的影响和降水量对荒漠区的影响,为区分人类活动和气候变化对区域植被覆盖率变化提供了简单可行的方法,同时也为中游水资源合理配置提供一定的科学依据。但是,影响植被覆盖率变化的因素众多,本文只考虑了水资源因素,并未考虑气温、 CO_2 等其它因素的影

响,在以后的研究中还需进一步研究与探索。

5 结 论

1) 黑河干流中游区域植被覆盖率由 2002 年的 32% 增长到了 2011 年的 36%, 绿洲区扩张是造成植被覆盖率增长的主要因素。

2) 影响绿洲区面积变化的主要因素为地下水埋深和中游耗水量, 线性相关系数分别为 -0.91 和 0.75 , 累积降水量的变化是影响荒漠区植被覆盖率变化的主要因素, 相关系数为 0.85 。

3) 利用地下水埋深、中游耗水量及累积降水量的相对变化可以预测区域植被覆盖率的相对变化, 直线斜率为 1.03 , 满足显著性检验。

黑河干流中游地区人类活动对于植被趋势变化的影响很大, 可通过大力发展节水农业措施、提高中游地区用水效率、控制区域地下水的开采量和中游耗水量, 来保障中游生态环境持续健康发展。

参 考 文 献:

- [1] Dieter G, Sibyll S, Uwe H, et al. Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286: 249–270.
- [2] Angelini I M, Garstang M, Davis R E, et al. On the coupling between vegetation and the atmosphere[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 105: 243–261.
- [3] Bnan G, Levis. A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1543–1566.
- [4] Bounoua L, Hall F, Sellers P, et al. Quantifying the negative feedback of vegetation to greenhouse warming: A modeling approach [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37 (7): 1–5.
- [5] Jeremy L W, David S G, Julia E A, et al. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58: 249–272.
- [6] Dubovyk O, Menz G, Convad C, et al. Spatio-temporal analyses of cropland degradation in the irrigated lowlands of Uzbekistan using remote-sensing and logistic regression modeling[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185: 4775–4790.
- [7] Rasmus F, Kjeld R, Per K, et al. Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-term earth observation based primary productivity and precipitation relationships[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5: 664–686.
- [8] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. *Nature*, 1997, 386: 698–702.
- [9] Charles D, Keeling R N, Hirofumi H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300: 1560–1563.
- [10] Xiao J F, Moody A. Trends in vegetation activity and their climatic correlates: China 1982 to 1998[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25: 5669–5689.
- [11] Fang J Y. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982–1999[J]. *Science in China Series C*, 2004, 47(3): 229.
- [12] Zhou W, Sun Z G, Li J L, et al. Desertification dynamic and the relative roles of climate change and human activities in desertification in the Heihe River Basin based on NPP [J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(4): 465–479.
- [13] Xiao J F, Zhou Y, Zhang L. Contributions of natural and human factors to increases in vegetation productivity in China [J]. *Ecosphere*, 2015, 6(11): 1–20.
- [14] Wang Y, Roderick M L, Shen Y, et al. Attribution of satellite-observed vegetation trends in a hyper-arid region of the Heihe River basin, Western China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(9): 3499–3509.
- [15] 张永喆, 牛赞, 张虎, 等. 黑河中游西墩滩荒漠植物生长对水分变化响应研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(7): 71–77.
- [16] Guo Q L, Qi F, Li J L. Environmental changes after ecological water conveyance in the lower reaches of Heihe River, northwest China [J]. *Environmental Geology*, 2008, 58(7): 1387–1396.
- [17] Jin X M, Micheal E S, Jan G C, et al. Groundwater depth and vegetation in the Ejina Area, China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2011, 25(2): 194–199.
- [18] Zhang Y C, Yu J J, Wang P, et al. Vegetation responses to integrated water management in the Ejina basin, Northwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25: 3448–3461.
- [19] Qin D J, Zhao Z F, Han L F, et al. Determination of groundwater recharge regime and flowpath in the Lower Heihe River basin in an arid area of Northwest China by using environmental tracers: Implications for vegetation degradation in the Ejina Oasis [J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(6): 1133–1145.
- [20] 郝丽娜, 粟晓玲. 黑河干流中游地区适宜绿洲及耕地规模确定[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 262–268.
- [21] Jin X M, Liu J T, Wang S T, et al. Vegetation dynamics and their response to groundwater and climate variables in Qaidam Basin, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(3): 710–728.
- [22] Fu B H, Isabela B. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater [J]. *Journal of Arid Environments*, 2015, 113: 59–68.
- [23] Neil C S, Matthew J C. Remote sensing of vegetation responses to flooding of a semi-arid floodplain: Implications for monitoring ecological effects of environmental flows [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 387–391.
- [24] 张雪艳, 胡云峰, 庄大方, 等. 蒙古高原 NDVI 的空间格局及空间分异[J]. *地理研究*, 2009, 28(1): 10–18.
- [25] Toby N C, David A R. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Elsevier Science*, 1997, 62: 241–252.
- [26] David P, Groeneveld. Remotely-sensed groundwater evapotranspiration from alkali scrub affected by declining water table [J]. *Hydrology*, 2008, 358: 294–303.
- [27] Jason E, Roland G. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535–554.
- [28] 周伟, 王倩, 章超斌, 等. 黑河中上游草地 NDVI 时空变化规律及其对气候因子的响应分析[J]. *草业学报*, 2013, 22(1): 138–147.