

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0073

管子隆,吕爱锋,贾绍凤,等. 格尔木河中游地区植被覆盖与地下水埋深关系研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 86-93. GUAN Z L, LYU A F, JIA S F, et al. Study on the relationship between vegetation cover and groundwater depth in the middle reaches of Golmud River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 86-93. (in Chinese)

# 格尔木河中游地区植被覆盖与地下水埋深关系研究

管子隆<sup>1,2</sup>, 吕爱锋<sup>2,3</sup>, 贾绍凤<sup>2,3</sup>, 严家宝<sup>2,3</sup>, 董东林<sup>4</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 中国科学院 陆地水循环及地表过程重点实验室/中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;  
4. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 在干旱区内陆盆地, 地下水对植被的分布有很大的影响。在格尔木河中游地区, 同样发现植被依赖地下水分布的特征。通过归一化植被指数(*NDVI*)的遥感影像数据与地下水埋深的实地观测数据来研究分析植被覆盖对地下水埋深的关系。研究结果表明: 当地下水埋深小于4 m时, *NDVI*均值与标准差均随着地下水埋深的增加而减小。当地下水埋深大于4 m但小于8 m时, 植被生长开始逐渐受到影响, 对地下水的敏感性开始减弱。当地下水埋深超过8 m时, 植被覆盖严重下降, 并且对地下水埋深变化表现的愈加不敏感。8 m被认为是影响研究区植被覆盖的地下水埋深上限, 超过该上限, 地区生态环境会受到严重影响; 不同植被类型受地下水的影响也不同: 水柏枝的生长与地下水关系较密切, 芦苇盐生草甸与膜果麻黄可能受土壤盐渍化的影响其生长状况与地下水的关系较复杂。对比不同研究区研究成果, 由于降雨、蒸散发等气象要素、水文地质条件、人类活动等多方面因素的不同, 植被覆盖与地下水的相关性有明显差异。

**关键词:** 干旱区; *NDVI*; 地下水; 植被类型; 地下水开发利用; 格尔木河

**中图分类号:** TV211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0086-08

## Study on the relationship between vegetation cover and groundwater depth in the middle reaches of Golmud River

GUAN Zilong<sup>1,2</sup>, LYU Aifeng<sup>2,3</sup>, JIA Shaofeng<sup>2,3</sup>, YAN Jiabao<sup>2,3</sup>, DONG Donglin<sup>4</sup>

(1. School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process/Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the arid inland basin, groundwater has a great influence on the distribution of vegetation. In the middle reaches of the Golmud River, the distribution of vegetation is also groundwater dependent. We used the normalized difference vegetation index (*NDVI*) and field observation data of groundwater depth to study the relationship between vegetation distribution and groundwater depth. The results showed that when the groundwater depth was less than 4m, the mean *NDVI* would decrease with the increase of groundwater depth. When the groundwater depth was greater than 4 m but less than 8 m, the growth of vegetation was affected and became less sensitive to groundwater. When the groundwater depth was more than 8 m, the vegetation cover declined seriously, and was not sensitive to the change of groundwater depth. We consider 8 m to be the upper limit of groundwater depth that affects vegetation cover in the study area. The regional ecological environment will be severely affected

收稿日期: 2017-08-15 修回日期: 2018-03-30 网络出版时间: 2018-04-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180424.1755.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41671026); 青海省重大科技专项课题(20142NK2A421)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41671026); Major Science and Technology Special Project of Qinghai(20142NK2A421)

作者简介: 管子隆(1990-), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事水资源与环境研究。E-mail: hydgeo\_guan@163.com

通讯作者: 吕爱锋(1977-), 男, 山东莱芜人, 副研究员, 博士, 主要从事水资源系统模拟等方面的研究。E-mail: lvaf@igsrr.ac.cn

when the groundwater depth is beyond this limit. Different vegetation types were differently influenced by groundwater: The growth of *Myricaria* was closely associated with groundwater. For salt meadow reed and *Ephedra przewalskii*, the relationship between their growth and groundwater was complex probably because of soil salinization. A comparison of the research results of different research areas revealed that due to rainfall, evapotranspiration, hydrogeological conditions, human activities, and other factors, the correlation between vegetation and groundwater varied significantly.

**Key words:** arid area; NDVI; groundwater; vegetation type; utilization of groundwater; Golmud River

植被是联结土壤、大气和水分等要素的自然纽带<sup>[2]</sup>, 干旱荒漠区植物生长对地下水有更强的依赖性<sup>[3,7]</sup>, 地下水埋深直接影响着与植被生长关系密切的土壤水分和养分动态, 是决定荒漠区植被分布、生长、种群演替以及荒漠绿洲存亡的主导因子<sup>[8,11]</sup>。同时, 地下水对植被的影响又是复杂的, 一些湿生植物完全依赖于地下水, 没有地下水无法存活; 而有些植被则对地下水的变化不敏感<sup>[12,14]</sup>。因此, 研究干旱区植被覆盖与地下水埋深之间的关系, 对保护我国西北干旱区生态环境有很重要的意义。

目前对干旱区植被覆盖时空变化的研究已经很多: 其中一大部分集中在研究降水、气温、地形地貌及气候变化对植被覆盖时空分布的影响<sup>[15-19]</sup>。金晓媚等<sup>[20]</sup>研究柴达木盆地乌图美仁地区地下水埋深及矿化度对区域植被覆盖率的影响并得出该区域适合植被生长的地下水埋深和矿化度。赵文智等<sup>[21]</sup>研究了河西走廊绿洲的水文过程对地下水以及植被覆盖的影响。席海洋等<sup>[22]</sup>利用覆盖范围广、周期较短的遥感数据, 对近 20 年来额济纳绿洲整体的植被发育与地下水位的关系进行了定量分析研究, 得到黑河下游植被生长状况以及最佳生长水位。Jin 等<sup>[23]</sup>基于 NDVI 遥感影像数据、DEM 数据以及地下水观测数据研究海流图河流域植被对地下水和地形地貌的响应。目前的研究中研究区域多集中在绿洲农牧区, 且主要研究区域内植被整体上与地下水的关系。而在分析研究植被与地下水关系的过程中综合考虑植被类型、土壤条件、人为生产建设活动等因素的还不多。

本文研究区位于格尔木河中游, 研究区内地下水主要接受格尔木河的渗漏补给, 整体地下水埋深较浅, 地下水埋深过浅造成的建筑物安全问题以及土壤盐渍化等次生灾害问题十分严重; 同时, 研究区地处干旱区内陆盆地, 降水量少, 植被生长对地下水的依赖性很强, 地下水在一定程度上决定了植被的生长及分布, 地下水与当地生态环境有着紧密的联系, 是研究区内十分重要的生态环境影响因子。本文借助遥感影像和研究区内地下水观测数据, 研究格尔木河中游植被覆盖和地下水埋深在空间分布上

的关系, 分析影响植被生长的地下水埋深范围以及不同植被类型对地下水的响应, 对当地植被保护、荒漠化防治等生态环境的维护提供依据。

## 1 研究区概况

研究区选取柴达木盆地第二大河流格尔木河中游流经的格尔木市市区部分区域(图 1 右), 格尔木河源于昆仑山北坡主峰布尔汗布达山, 出山口后蜿蜒北流, 最后注入达布逊湖。全长 352 km, 是柴达木盆地第二大河。上游昆仑山口地区年均降水量约为 220 mm, 中下游仅为 40.2 mm, 潜在蒸发量高达 3 066 mm/a。受气候、地形等因素影响, 研究区南部为麓砾漠带, 植被稀疏, 主要以麻黄、葵科植物为主, 有人工种植的杨属、榆属、沙拐枣、细穗怪柳、沙棘属等乔灌木; 沿河流方向向北, 地形十分平坦, 河水流速缓慢, 地下水埋深变浅, 沿河道发育有湿生草甸, 植被以芦苇、蒿草、苔草为主。远离河岸阶地为盐生灌木、矮半灌木荒漠带, 植被主要为盐穗木、麻黄、细穗怪柳、白刺等<sup>[24]</sup>。研究区域内地表高程自南向北逐渐降低, 图 1 左为研究区 90 m 分辨率的 DEM 图。

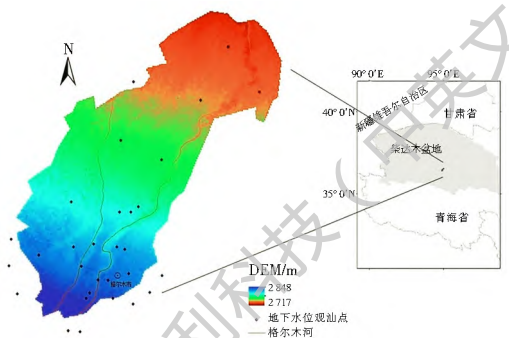


图 1 研究区位置及其 DEM

Fig. 1 Location and DEM of study area

## 2 数据和方法

### 2.1 地下水位等值线图

地下水位数据主要来源于研究区内 30 个有效地下水位观测井 2010 年 9 月份的观测数据, 研究区地下水位等值线图通过观测数据经插值得到, 地下

水位等值线图分辨率与 DEM 保持一致, 同样为 90 m 的分辨率(图 2)。由地下水位等值线图可知研究区内地下水流向整体上为由南向北, 河流两侧局部地下水流向为: 南部由河流指向两侧, 向北逐渐转为由两侧指向河流。

下水埋深均小于 15 m, 只在研究区南部河流上、中游连接部分以及分水岭部分区域地下水埋深超过 15 m。

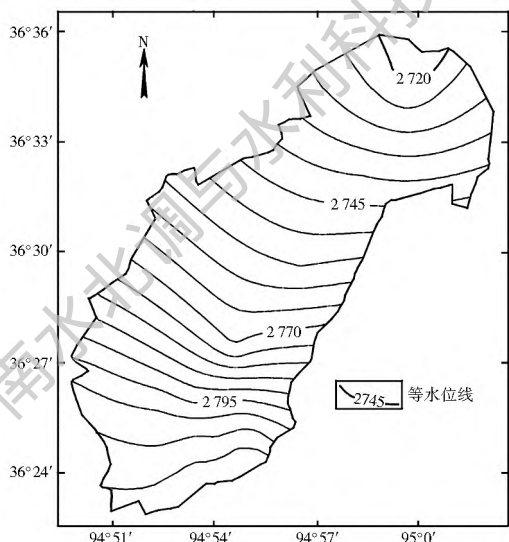


图 2 地下水水位等值线

Fig. 2 Contour map of groundwater level

## 2.2 地下水埋深分布图

研究区 DEM 图与地下水位等值线图同为 90 m 分辨率, DEM 栅格图像每个网格数值代表该单元对应地表高程, 地下水位等值线栅格图像每个网格数值代表该单元对应位置的地下水水位, 两者是一一对应的, 将两幅栅格图像叠加做相减运算即可得到研究区地下水埋深分布图(图 3)。研究区绝大部分区域地

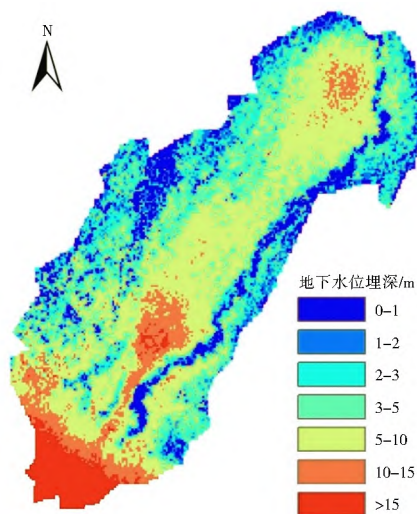


图 3 地下水埋深空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of groundwater depth

## 2.3 植被覆盖率与植被类型分布

归一化差值植被指数(*NDVI*)是目前广泛应用于反映植被生长状况的指数, *NDVI* 值大说明植被生长状况良好, *NDVI* 值小则反映植被发育较差。与地下水观测数据相对应, 本次研究所采用的是 2010 年 9 月的 MODIS *NDVI* 数据, 影像是 16 d 合成的, 空间分辨率为 250 m × 250 m, 由中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云提供(<http://www.gscloud.cn/>)。原始 *NDVI* 数据是 -10 000~10 000 的浮点数, 转化为 -1~1 的标准 *NDVI* 值(图 4(a))。

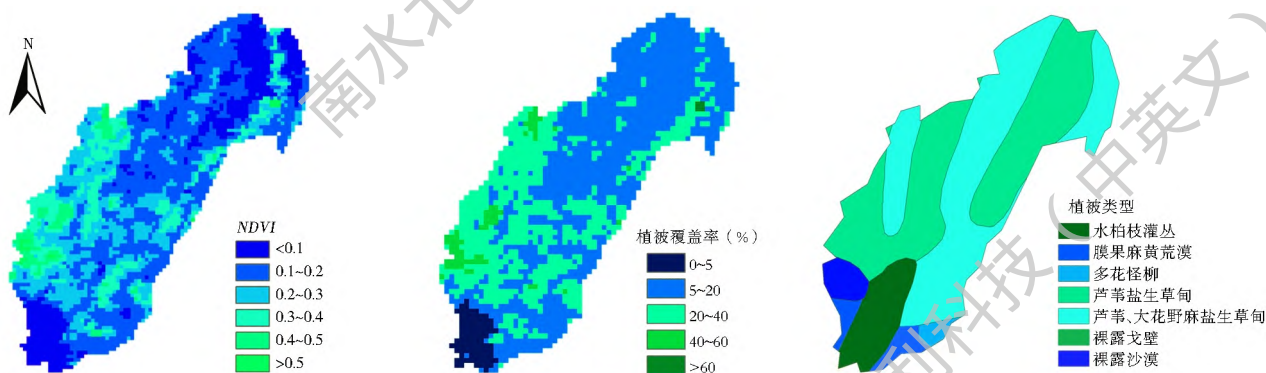


图 4 研究区 *NDVI*、植被覆盖率和植被类型分布

Fig. 4 Distribution of *NDVI*, vegetation coverage, and vegetation type in study area

为了更直观展现研究区植被覆盖情况, 本文引入研究区植被覆盖率<sup>[25]</sup> (*VCF*) 分布图(图 4(b))。植被覆盖率是基于像元二分模型<sup>[26]</sup> 计算得到的, 其计算公式为:

式中: *VCF* 为植被覆盖率; *NDVI* 为归一化差值植被指数; *NDVI<sub>min</sub>* 为研究区所处地区植被指数最小值; *NDVI<sub>max</sub>* 为研究区所处地区植被指数最大值。

研究区植被类型分布图(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

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

心”( <http://westdc.westgis.ac.cn> ), 由图可知, 研究区内主要的植被类型为芦苇、大花野麻、白刺、怪柳、膜果麻黄、多花怪柳、水柏枝等, 具体植被类型分布如图(图4(c))。

本文研究植被与地下水关系主要是运用 ArcGIS 进行空间分析, 分析不同植被类型, 不同埋深条件下  $NDVI$  与地下水埋深的关系; 运用 Excel 和 Matlab 进行统计分析, 分析不同埋深条件下  $NDVI$  的统计特征变化。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 $NDVI$ 与植被覆盖率的分布特征

由  $NDVI$  空间分布图(图4(a))可知, 研究区内主要为低  $NDVI$  值 ( $NDVI < 0.3$ ) 覆盖, 该区域占研究区总面积比例接近 84%。

研究区的植被覆盖率 ( $VCF$ ) 的统计结果见表 1, 分级方案采用金晓媚等<sup>[27]</sup> 关于柴达木盆地植被变化的研究中的分类方案。由表可知, 研究区 92.23% 的面积为中、低覆盖率, 3.49% 的面积为较高、高覆盖率(图4(b))。

表 1 研究区植被覆盖率面积统计

Tab. 1 Statistics of vegetation coverage in study area

植被覆盖率( $VCF$ )(%)	类型	百分比(%)
0~ 5	裸土	4.28
5~ 20	低覆盖率	56.98
20~ 40	中等覆盖率	35.25
40~ 60	较高覆盖率	3.29
60~ 100	高覆盖率	0.20

#### 3.2 $NDVI$ 与地下水埋深的关系

通过频率分布统计图来分析研究区  $NDVI$  与地下水埋深的分布特征, 图 5 为不同地下水埋深下  $NDVI$  的统计直方图与累积频率曲线。由图可知, 随着地下水埋深的增加,  $NDVI$  在低值区 ( $< 0.3$ ) 所占比例逐步增加, 高值区 ( $> 0.3$ ) 所占比例逐渐减少, 表明植被的覆盖逐渐变差。当地下水埋深大于 8 m 时,  $NDVI$  集中分布在低值区 ( $< 0.3$ ) 的区域, 其占研究区总面积比例已经超过 92%, 当地下水埋深大于 9 m 时,  $NDVI$  大于 0.5 的区域消失(图 5(j))。当地下水埋深大于 12 m 时,  $NDVI$  大于 0.3 的区域几乎全部消失, 植被覆盖很差。

为进行地下水埋深与  $NDVI$  的相关性分析, 将研究区地下水埋深图通过 ArcGIS 重采样为与  $NDVI$  同样分辨率(250 m)的栅格图像, 使  $NDVI$  图像与地下水埋深图像元格能够一一对应。每个像元

就可以得到  $NDVI$  值和埋深值一对数值, 在整个研究区内共得到 3 851 对数据。  $NDVI$  与地下水埋深相关性分析的散点图(图 6), 由图可知, 在整个研究区范围内,  $NDVI$  和地下水埋深分别在 0~ 0.65 和 0~ 40 m 之间变化, 但两者数值主要集中在  $NDVI$  小于 0.4、地下水埋深  $< 10$  m 的范围内。  $NDVI$  有随地下水埋深的增加而减小的趋势, 由于研究区存在土壤盐渍化现象, 因此, 在地下水埋深较浅的地方, 土壤盐渍化影响植被生长,  $NDVI$  值较小; 同时, 根据研究区地下水埋深分布图(图 3)和  $NDVI$  分布图(图 4(a))可知, 在地下水埋深较大的区域, 仍然有少量植被分布 ( $NDVI$  值较大), 根据其空间分布的位置条件分析其原因为: 研究区南部地势较高, 地下水埋深较大, 但考虑到研究区有一定的降雨量(年降雨量 40.2 mm), 在地下水埋深较深的区域仍然会有一些耐旱的植物依靠降雨雨水汇集生长; 在研究区中部以及偏西南的区域则由于有人工沟渠的存在, 地下水埋深较大但沟渠周围植被则依靠人工引沟渠水和渠道渗漏等获取水分生长。

为了分析  $NDVI$  与地下水埋深的依赖关系, 绘制了  $NDVI$  的均值与标准差随地下水埋深的变化曲线。考虑到研究区内部分区域为戈壁荒漠, 同时研究区内植被类型主要为乔灌木与禾草, 其根系深度均在 15 m 以内, 因此, 在研究  $NDVI$  与地下水埋深关系时, 只考虑地下水埋深在 15 m 以内的区域。将研究区  $NDVI$  分布图和地下水埋深分布图进行叠加, 对地下水埋深小于 15 m 的区域, 以 1 m 为间隔, 划分为 15 个埋深区间, 提取每个区间内对应的所有  $NDVI$  值, 15 个地下水埋深区间对应得到 15 组  $NDVI$  数据, 统计各组  $NDVI$  数值的平均值和标准差, 所得结果见图(图 7)。从图中可知  $NDVI$  均值随着地下水埋深的增大而逐渐减小(图 7(a)), 通过定量分析可知, 当地下水埋深小于 4 m 时,  $NDVI$  均随地下水埋深增加而降低, 短暂平稳后, 随着地下水埋深的增加  $NDVI$  继续下降, 当地下水埋深大于 8 m 时,  $NDVI$  开始趋于稳定, 呈轻微上下波动, 表明植被生长与地下水埋深关系变弱。同样, 每组数据的标准差也在随着地下水埋深的增加而减小(图 7(b)), 表明随着地下水埋深的增加, 每组数据内部波动越来越小,  $NDVI$  与地下水埋深的关系越来越弱。

#### 3.3 不同类型植被对地下水的响应

$NDVI$  作为反映植被生长状况的指数, 其与地下水埋深的关系同样也受植被类型的影响。  $NDVI$  与地下水埋深的关系反映的是一个区域所有植被种

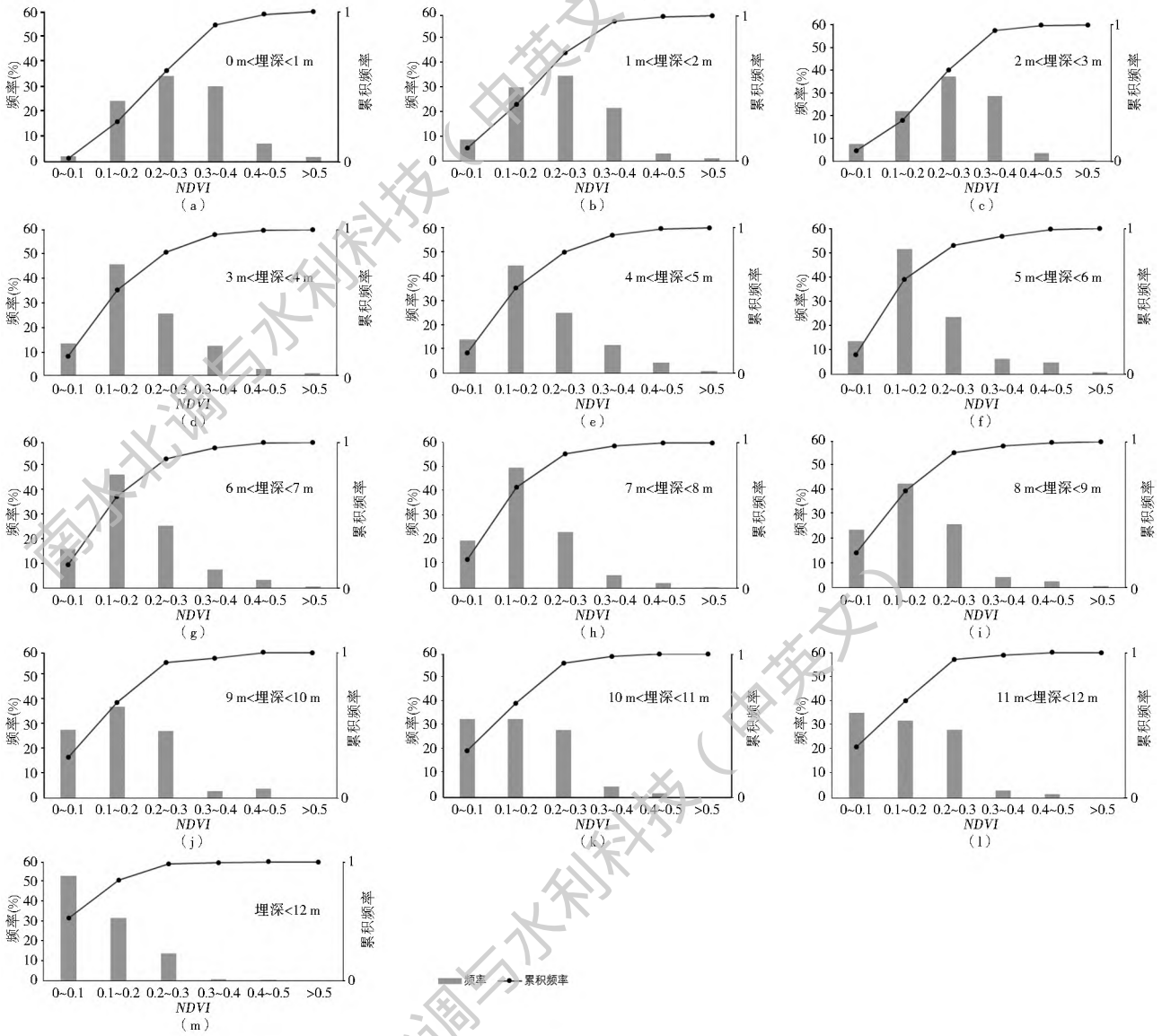


图 5 不同地下水埋深下 NDVI 分布统计

Fig. 5 Statistics of NDVI at different groundwater depths

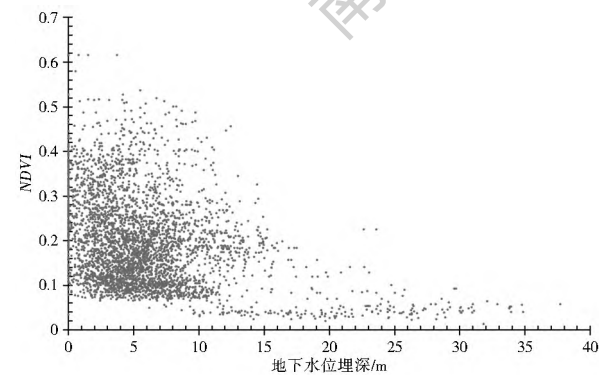


图 6 NDVI 与地下水埋深关系

Fig. 6 Relationship between NDVI and groundwater depth

类对地下水埋深关系的整体情况,但是不同植被种类对地下水的敏感程度是不同的<sup>[23]</sup>。因此,为了研究不同植被类型与地下水埋深的关系,选取研究区具有代表性的四种植被进行研究,其结果见图8,由

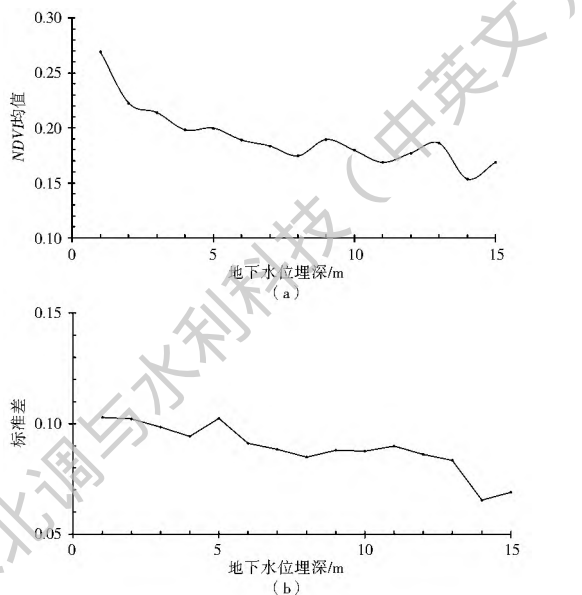


图 7 NDVI 随埋深增加的统计特征变化

Fig. 7 Change of statistical characteristics of NDVI distribution with groundwater depth

水柏枝(图8(a))可知水柏枝生长对地下水依赖较强,当埋深小于5 m时, $NDVI$ 值均大于0.1,当埋深大于5 m时,水柏枝对应的 $NDVI$ 小于0.05,水柏枝生长状况较差,说明水柏枝适宜生长在地下水埋深较浅(小于5 m)的地方。膜果麻黄(图8(d))表明膜果麻黄适宜在地下水埋深较浅的地方,但由于内陆干旱盆地有强烈的蒸散发,使得地下水埋深很浅的地方土壤盐渍化较严重,如此又严重影响膜果麻黄的生长,而在地下水位较深的地方,由于水分的缺乏膜果麻黄的生长状况同样较差。

相比之下,两种盐生草甸与地下水之间的关系就比较复杂,对比含白刺、怪柳的芦苇、大花野麻盐

生草甸(图8(b))和芦苇盐生草甸(图8(c))可知,两者同属草甸,所对应的地下水埋深范围较接近,且整体有 $NDVI$ 随地下水埋深增加而减小的趋势,但根据土地利用数据(数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>))可知,研究区内盐碱地绝大部分分布在植被类型为盐生草甸的区域,因此地下水埋深较浅的地区土壤盐渍化较严重,影响到草甸的生长, $NDVI$ 值较小;含白刺、怪柳的芦苇、大花野麻盐生草甸(图8(b))由于其中含有白刺和怪柳等根系较发达的灌木植物,其在地下水埋深较大的区域仍然有 $NDVI$ 较大值存在,并且数量多于芦苇盐生草甸(图8(c))。

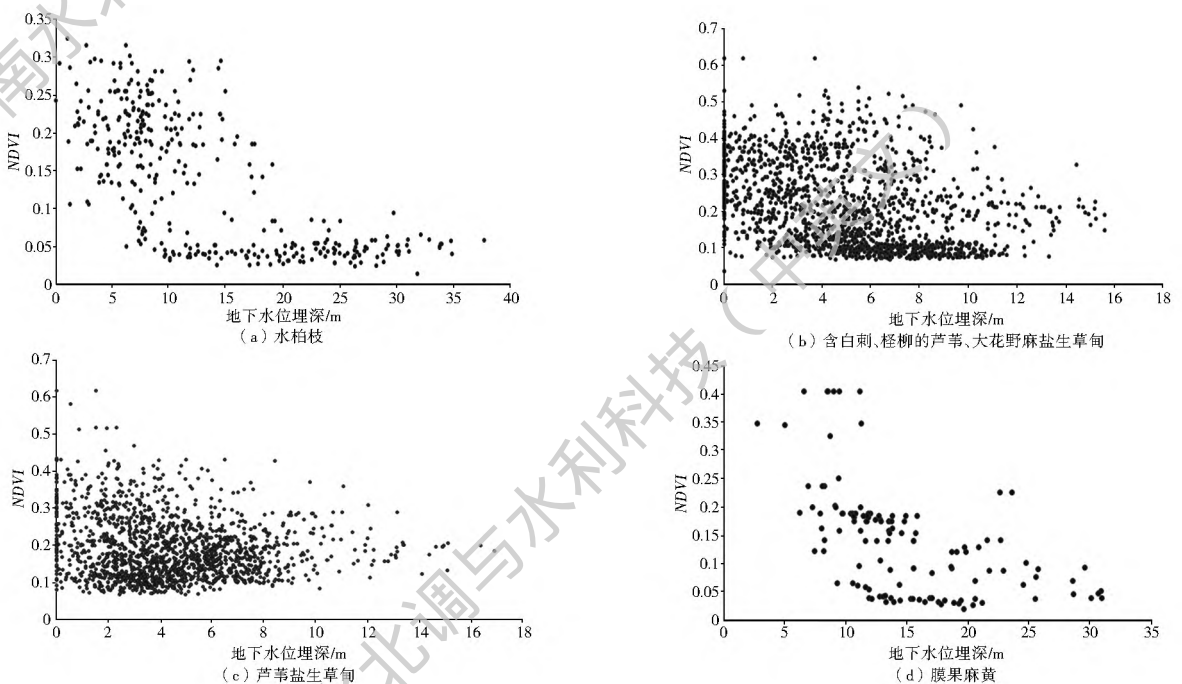


图8 不同类型植被 $NDVI$ 与地下水埋深的关系

Fig.8 Relationship between  $NDVI$  and groundwater depth for different vegetation types

## 4 讨论

土壤盐渍化对分析研究区植被覆盖和地下水埋深的关系有一定影响,由研究区内植被类型分布图与土地利用数据(数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>))可知,研究区内盐碱地上分布的植被类型主要为盐生草甸,位于盐碱地上的草甸 $NDVI$ 像元值均分布在0~0.4,并且随着地下水埋深增加无明显变化趋势,而位于非盐碱地上的草甸 $NDVI$ 像元值则分布在0.1~0.6,且随着地下水增加有明显降低的趋势。说明非盐碱地草甸对地下水的响应较明显,盐碱地对草甸的生长有严重影响,盐碱地的影响使得植被与地下水的关系变得复杂。

本文研究区内植被覆盖和地下水埋深之间的关系与同处柴达木盆地的乌图美仁区<sup>[20]</sup>存在不同。在乌图美仁地区,适宜植被生长的地下水埋深范围为0.4~3 m, $NDVI$ 的峰值出现在埋深为0.9 m的地方;而在本文研究区内, $NDVI$ 较大值出现在地下水埋深很小的区域,并且 $NDVI$ 随着地下水埋深的增加而减小。这些差异可能由多种因素造成:乌图美仁较本研究区更为干旱,乌图美仁研究区年降雨量为15~20 mm,本研究区为40.2 mm,并且乌图美仁有更高的潜在蒸发表,这意味着乌图美仁地区土壤盐渍化的现象更为严重,地下水埋深过浅的地方很可能因为土壤盐渍化而影响植被的生长;两个研究区水文地质条件存在差异,乌图美仁有多条河流流经,其中那陵格勒河为柴达木盆地流量最大

的河流,其入渗对该地区地下水的补给量很大,此外,乌图美仁地区浅层的第四系冲洪积松散层有更好的渗透性,大量河流出山后入渗很快,在多处洪积扇边缘出现自流,这使得乌图美仁地区地下水埋深较浅且变化范围小(0.4~3 m),而本文研究区自南部山前出山口向东北方向地势逐渐降低,由砾石带向平原细土带过渡,地下水埋深变化范围大(0.9~38 m);人类活动的影响,本文研究区处在格尔木市市区附近,人类生产活动较多且以城市建设和工业生产为主,而乌图美仁地区则以农畜牧为主,乌图美仁中部有大面积的农场,农场草甸等植被需要在地下水埋深较浅的区域才能生长,而强烈的蒸散发容易造成地下水埋深浅的区域土壤盐渍化,种植农田、人工灌溉、土壤盐渍化等会对分析地下水与归一化差值植被指数(*NDVI*)的关系产生影响。以上因素共同造成两个研究区植被覆盖与地下水埋深关系的差异。

## 5 结论

本文通过归一化差值植被指数(*NDVI*)和地下水的观测数据对格尔木河中游植被和地下水之间的关系进行了研究。结果表明,当地下水埋深小于4 m时,*NDVI*均值与标准差均随着地下水埋深的增加而减小。当地下水埋深大于4 m但小于8 m时,植被生长开始逐渐受到影响,对地下水的敏感性开始减弱。当地下水埋深超过8 m时,植被覆盖严重下降,并且对地下水埋深变化表现的愈加不敏感。4~8 m同样被认为是该研究区地下水开发利用的水位降深上限值的范围。

不同植被类型受地下水的影响也不同,水柏枝的生长于地下水关系较密切,芦苇盐生草甸与膜果麻黄可能因土壤盐渍化的影响其生长状况与地下水的关系较复杂。

研究区的植被和地下水关系的研究结果与乌图美仁地区有明显差异。表明不同研究区植被与地下水之间的关系存在差异,在蒸散发较强的地区,地下水位过浅可能会因为土壤盐渍化而出现*NDVI*随地下水埋深的增加先增大后减小的趋势;人类活动对植被和地下水的影响也会使得不同研究区植被和地下水的关系研究结果存在差异。

### 参考文献(References):

[1] 崔林丽,史军,杨引明,等.中国东部植被*NDVI*对气温和降水的旬响应特征[J].地理学报,2009(7):850-860.(CUI L L, SHI J, YANG Y M, et al. Response characteristics of vegetation *NDVI* in eastern China to temperature and precipitation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009(7): 850-860. (in Chinese))

DOI: 10.11821/xb200907009.

[2] GOW L J, BARRETT D J, RENZULLO L J, et al. Characterising groundwater use by vegetation using a surface energy balance model and satellite observations of land surface temperature [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 80: 66-82. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.02.021.

[3] NAUMBURG E, MATA-GONZALEZ R, HUNTER R G, et al. Phreatophytic Vegetation and Groundwater Fluctuations: A Review of Current Research and Application of Ecosystem Response Modeling with an Emphasis on Great Basin Vegetation [J]. *Environmental Management*, 2005, 35(6): 726-740. DOI: 10.1007/s00267-004-0194-7.

[4] RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate soil vegetation dynamics [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 3-9. DOI: 10.1029/1999WR900210.

[5] LV J, WANG X S, ZHOU Y, et al. Groundwater dependent distribution of vegetation in Hailu River catchment, a semi arid region in China: GROUNDWATER-DEPENDENT VEGETATION [J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(1): 142-149. DOI: 10.1002/eco.1254.

[6] HAN M, ZHAO C, FENG G, et al. An eco hydrological approach to predicting regional vegetation and groundwater response to ecological water conveyance in dryland riparian ecosystem [J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 224-236. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.02.032.

[7] 钟华平,刘恒,王义,等.黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系[J].水科学进展,2002(2):223-228.(ZHONG H P, LIU H, WANG Y, et al. The relationship between Ejina oasis and water resources in the lower reaches of Heihe River [J]. *Advances in Water Science*, 2002(2): 223-228. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2002.02.016.

[8] 樊自立,马英杰,张宏,等.塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J].干旱区地理,2004(1):8-13.(FAN Z L, MA Y J, ZHANG H, et al. Determination of ecological groundwater level and its reasonable depth in the Tarim River Basin [J]. *Arid Land Geography*, 2004(1): 8-13. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2004.01.002.

[9] 赵文智,常学礼,李启森,等.荒漠绿洲区芦苇种群构件生物量与地下水埋深关系[J].生态学报,2003(6):1138-1146.(ZHAO W Z, CHANG X L, LI Q S, et al. Relationship between biomass of reed population and groundwater depth in desert oasis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(6): 1138-1146. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2003.06.014.

[10] BAATTRUP PEDERSEN A, HOFFMANN C C, AUDET J, et al. Groundwater nitrogen and the distribution of groundwater dependent vegetation in riparian areas in agricultural catchments [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 66: 111-119. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.07.047.

[11] HAN M, ZHAO C, FENG G, et al. Bayesian inference of the groundwater depth threshold in a vegetation dynamic model: A case study, lower reach, Tarim River [J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 207-215. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.02.035.

- [12] 马玉蕾,王德,刘俊民,等.地下水与植被关系的研究进展[J].水资源与水工程学报,2013(05):36-40,44.(MA Y L, WANG D, LIU J M, et al. Advances in the research on the relationship between groundwater and vegetation[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013(5): 36-40, 44. (in Chinese))
- [13] 刘淑娟,刘世增,袁宏波,等.青土湖水面形成过程中荒漠植物群落结构的变化[J].干旱区研究,2017(1):72-78.(LIU S J, LIU S Z, YUAN H B, et al. Change of Structure of Desert Plant Communities during Water Area Formation of the Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2017(1): 72-78. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2017.01.10.
- [14] 张俊,赵振宏,马洪云,等.基于物种生存域的干旱半干旱区地下水与植被关系研究[J].水土保持研究,2014(5):240-243.(ZHANG J, ZHAO Z H, MA H Y, et al. Study on relationship between groundwater and vegetation in arid and semiarid region based on survival regions of plant species[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014(5): 240-243. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.05.043.
- [15] 孙庆龄,李宝林,许丽丽,等.2000-2013年三江源植被NDVI变化趋势及影响因素分析[J].地球信息科学学报,2016(12):1707-1716.(SUN Q L, LI B L, XU L L, et al. 2016. Analysis of NDVI change trend and its impact factors in the Three River Headwater Region from 2000 to 2013[J]. Journal of Geoinformation Science, 2016(12): 1707-1716. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1047.2016.01707.
- [16] GONG Z N, ZHAO S Y, GU J Z. et al. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017(02): 143-160. DOI: 10.1007/s11442-017-1369-5.
- [17] 邓兴耀,姚俊强,刘志辉.基于GIMMS NDVI的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J].干旱区研究,2017(1).(DENG X Y, YAO J Q, LIU Z H. Spatial and temporal variations based on GIMMS NDVI vegetation in arid areas of central Asia[J]. Arid Zone Research, 2017(1). (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2017.01.02
- [18] 刘华琳,徐晓民,焦瑞,等.锡林河流域年均降水量与不同地貌下植被覆盖度的关系[J].资源节约与环保,2016(9):289-290.(LIU H L, XU X M, JIAO R, et al. The relationship between vegetation coverage and average annual precipitation under different landforms in Xilin? River basin[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2016(9): 289-290. (in Chinese)) DOI: 10.16317/j.cnki.121377/x.2016.09.231.
- [19] 丁文荣.滇东南喀斯特地区植被覆盖变化及其影响因素[J].水土保持研究,2016(6):227-231,237,381.(DING W R. Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Vegetation NDVI and Its Driving Factors in Karst Area of Southeast Yunnan, China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016(6): 227-231, 237, 381. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.06.030.
- [20] 金晓娟,刘金韬,夏薇.柴达木盆地乌图美仁区植被覆盖率变化及其与地下水的关系[J].地学前缘,2014(4):100-106.(JIN X M, LIU J T, XIA W. The relationship between change of Qaidam Basin Wutumeiren vegetation coverage rate and groundwater[J]. Earth Science Frontiers, 2014(4): 100-106. (in Chinese)) DOI: 10.13745/j.esf.2014.04.011.
- [21] 赵文智,常学礼.河西走廊水文过程变化对荒漠绿洲过渡带NDVI的影响[J].中国科学:地球科学,2014(7):1561-1571.(ZHAO W Z, CHANG X L. Influence of hydrological process change on NDVI of desert oasis transition zone[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2014(7): 1561-1571. (in Chinese)) DOI: 10.1007/s11430-014-4927-z.
- [22] 席海洋,冯起,司建华,等.黑河下游绿洲NDVI对地下水位变化的响应研究[J].中国沙漠,2013(2):574-582.(XI H Y, FENG Q, SI J H, et al. Response of NDVI to groundwater level changes in the lower reaches of Heihe River[J]. Journal of Desert Research, 2013(2): 574-582. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00079.
- [23] JIN X M, GUO R H, Zhang Q, et al. Response of vegetation pattern to different landform and water-table depth in Hailiru River basin, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(11): 4889-4898. DOI: 10.1007/s12665-013-2882-1.
- [24] 秦占杰,山发寿,魏海成,等.格尔木河流域及周边地区表土花粉与区域植被的关系研究[J].盐湖研究,2012(4):13-20.(QIN Z J, SHAN F S, WEI H C, et al. Pollen Distribution Patterns of Surface Soil and Alluvial Pollen Samples from the Golmud River Drainage and Its Relationship with Vegetation[J]. Journal of Salt Lake Research, 2012(4): 13-20. (in Chinese))
- [25] GUTMAN G, IGNATOV A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533-1543. DOI: 10.1080/014311698215333.
- [26] 程红芳,章文波,陈锋.植被覆盖度遥感估算方法研究进展[J].国土资源遥感,2008(1):13-18.(CHENG H F, ZHANG W B, CHEN F. Research progress of remote sensing estimation method of vegetation coverage[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008(1): 13-18. (in Chinese))
- [27] 金晓娟,王松涛,夏薇.柴达木盆地植被对气候与地下水变化的响应研究[J].水文地质工程地质,2016(2):31-36,43.(JIN X M, WANG S T, XIA W. Study on response of Qaidam Basin vegetation to climate change and groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016(2): 31-36, 43. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.02.05.