

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2016-12-25

地下水和干旱指数对植被指数空间分布的联合影响： 以鄂尔多斯高原为例

齐蕊¹, 王旭升^{1,*}, 万力¹, 黄金廷², 冯雨晴¹, 蒋小伟¹, 韩鹏飞¹

1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083

2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

QI Rui¹, WANG Xusheng^{1,*}, WAN Li¹, HUANG Jinting², FENG Yuqing¹, JIANG Xiaowei¹, HAN Pengfei¹

1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

QI Rui, WANG Xusheng, WAN Li, et al. Joint influences of groundwater and aridity index on the spatial distribution of vegetation index: a case study in the Ordos Plateau, China. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(2): 265-273

Abstract: The region between Wuding River and Dosit River in the Ordos Plateau, China, is a typical arid to semi-arid zone in Northwest China. This region is covered by the Mu Us desert, whereas shallow groundwater exists in many places, which created a favorable condition for vegetation growing. Previous studies showed that the vegetation coverage in the Ordos Plateau increased with the decrease of groundwater depth, but the impact of the climatic gradient was not soundly considered. This study establishes a high resolution grid data of groundwater depth in the study area based on a large amount of well data, with which to conduct an analysis on the correlation between the satellite enhanced vegetation index (EVI) and groundwater/climate data. A double factor coordinate system composed of groundwater depth and aridity index is developed to show the response of vegetation index at regional scale on both of the groundwater condition and climate background. Results show that both the increases of aridity index and groundwater depth will lead to the decrease of the statistical values of vegetation index of specific probabilities. When the aridity index ranges between 3~5, the vegetation index is significantly influenced by groundwater depth, and the most beneficial groundwater depth to the emergence of high coverage vegetation is 1~3 m. The critical groundwater depth for significant groundwater-vegetation relationship is about 7 m. The results improve the understanding of the eco-hydrogeological characteristics in the Ordos Plateau.

Key words: groundwater depth; vegetation coverage; climatic gradient; arid region; Ordos

摘要:鄂尔多斯高原无定河与都思兔河之间的地段属于我国西北地区典型的干旱-半干旱过渡带, 覆盖毛乌素沙地, 存在大量的地下水浅埋区, 为植被生长创造了有利条件。前人研究表明鄂尔多斯高原沙地植被的盖度随着地下水埋深的减小而增大, 但没有充分考虑气候梯度的影响。本研究依托大量井孔调查资料建立了研究区地下水埋深的高分辨率栅格数据, 与区内增强型植被指数 EVI 的遥感数据和气候数据进行相关分析, 并建立地下水埋深与干旱指数双因素坐标系来确定区域植被指数对地下水和气候背景的联合响应。研究结果表明: 干旱指数和地下水埋深的增大都会导致植被指数的概率统计值减小。干旱指数介于 3~5 时, 地下水埋深对植被指数的影响比较显著, 且地下水埋深介于 1~3 m 最有利于高盖度植被的出现。地下水显著影响植被分布的临界埋深约为 7 m。这一结果改进了前人关于鄂尔多斯生态水文地质特征的认识。

关键词:地下水埋深;植被盖度;气候梯度;干旱区;鄂尔多斯

中图分类号:P641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2017)02-0265-09

收稿日期:2015-12-30;修回日期:2016-06-21

基金项目:国土资源部国土资源公益性行业科研专项基金项目(201311076); 全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(2014457)

作者简介:齐蕊(1987—),女,博士研究生,地下水科学与工程专业。E-mail:qirui@cugb.edu.cn

* 通讯作者简介:王旭升(1974—),男,教授,主要从事水文地质研究。E-mail:wxsh@cugb.edu.cn

0 引言

大陆地区的植被类型及植被盖度主要取决于气候特征,但是也会受到地形地貌、地下水和土壤质地等多种因素的影响。相对湿润地区而言,干旱、半干旱地区地下水对植被分布的影响更加强烈。当前,全球气候变化和人类活动引起的地下水环境变化如何对植被生态产生联合影响,是生态水文地质学需要解决的关键问题之一。

关于植被与气候背景的关系,前人已经开展了大量研究。一个经典的成果就是 Whittaker^[1]建立了世界主要植被类型与年平均气温、年平均降水量二维气象指标空间的关系,绘制出植被气候分区图。方精云^[2]在此基础上划分了东亚地区的植被气候类型,确定草原植被主要存在于多年平均降水量不足1 000 mm,多年平均气温高于-3 ℃的地带。降水量和气温不仅控制植被类型,对更具有普遍意义的植被指数也具有重要影响^[3-6]。普布次仁^[7]利用我国北部地区的降水量、土壤湿度及归一化植被指数NDVI进行相关分析,发现NDVI随降水量增加具有非线性增加的趋势,而与土壤湿度的关系则更加复杂一些。这些研究较少考虑地下水的作用。

在有地下水观测资料的干旱、半干旱地区,前人已经发现植被指数随地下水埋深呈现有规律的变化。金晓媚等^[8-9]在银川平原和内蒙古额济纳旗盆地研究植被与地下水的关系,发现总体上NDVI随地下水埋深的增加而减小,但受到盐碱化问题的影响,存在一个NDVI达到峰值的临界埋深。黄金廷等^[10]在鄂尔多斯高原研究发现地下水埋深会影响优势植被类型,而且旱柳对地下水埋深的适应能力最强。其他研究者也开展了鄂尔多斯高原植被和地下水关系的定量分析^[11-14],证实沙地植被指数和相对盖度总体上随地下水埋深的增加而减小。其中,Lü等^[15]、王旭升等^[16]已利用大量地下水观测资料详细研究了鄂尔多斯高原一个典型流域——海流兔河流域,发现当地下水埋深小于10 m时,NDVI与地下水埋深存在显著的相关性,但NDVI本身也存在强烈的随机性,地下水埋深主要影响的是NDVI的均值和峰值。

上述前人研究一般只强调某个因素对植被的影响,对气候和地下水影响植被分布的联合作用考虑较少。在鄂尔多斯高原,不仅地下水埋深的变化范

围大,而且气候特征也有较大的变化,两者都不可忽视。然而,现有的关于“地下水-植被”关系的多数认识没有区分同一研究区的气候梯度(多年平均降水量、蒸发量、气温等随空间坐标的变化率),尚不足以准确反映地下水对植被分布的独立影响。本文的目标是在前人研究基础上,选择鄂尔多斯高原跨越毛乌素沙地的典型地段,定量开展植被指数空间分布与地下水埋深、干旱指数的相互关系研究,厘清气候背景和水文地质条件分别对植被覆盖特征的影响,为评价植被生态变化提供依据。毛乌素沙地是我国典型的干旱-半干旱过渡带,既有强烈的气候梯度(降雨量的变化范围大),又有不同深度的地下水。相对而言,其沙地性质的地貌、土壤特征较为均匀,为确定植被分布对气候、地下水的双重响应提供了便利条件。

1 研究区及数据

1.1 研究区及地下水数据

本文研究区位于内蒙古鄂尔多斯高原中部(图1),地理坐标范围是北纬37°58'~39°23',东经106°52'~109°19',属于干旱-半干旱地区,主要被毛乌素沙地覆盖,面积约为15 000 km²。区内地面海拔大部分在1 100~1 400 m,中部梁地高程可达1 500 m以上,沙丘相对高度一般小于100 m。在30多年前,沙丘分布区仍然被称为毛乌素沙漠,随着区域气候向着有利控制沙漠化方向变化及我国沙漠化防治、退牧还草等措施的实施,近30年来区内沙漠化程度减轻,人们将其改称为毛乌素沙地^[17-18],但是也有研究者仍然将其称为沙漠^[19]。现今沙地中仍然分布有一些沙丘和沙丘链,多为固定、半固定沙丘。沙地中部存在众多湖(淖)湿地,与长条形的沙梁相间分布。多数湖泊由于受长期的强烈蒸发作用而演变为水质较差的盐碱湖。除了零星分布的草地之外,特属于荒漠地带的沙生植被、盐生植被也有广泛分布,如沙柳、沙蒿、芨芨草等。在湖(淖)湿地周边,地下水埋藏浅,容易发展成盐碱滩而只适宜耐盐植被生长。毛乌素沙地的社会经济形态以牧业为主,但也分布少量的耕地种植玉米等作物,耕地占研究区的总面积小于10%。研究区地表水系并不十分发育,在长达215 km的地段内,自西向东只有都思兔河、海流兔河、纳林河等少量河流。其中都思兔河为黄河支流,海流兔河与纳林河为无定河支流,流量均小

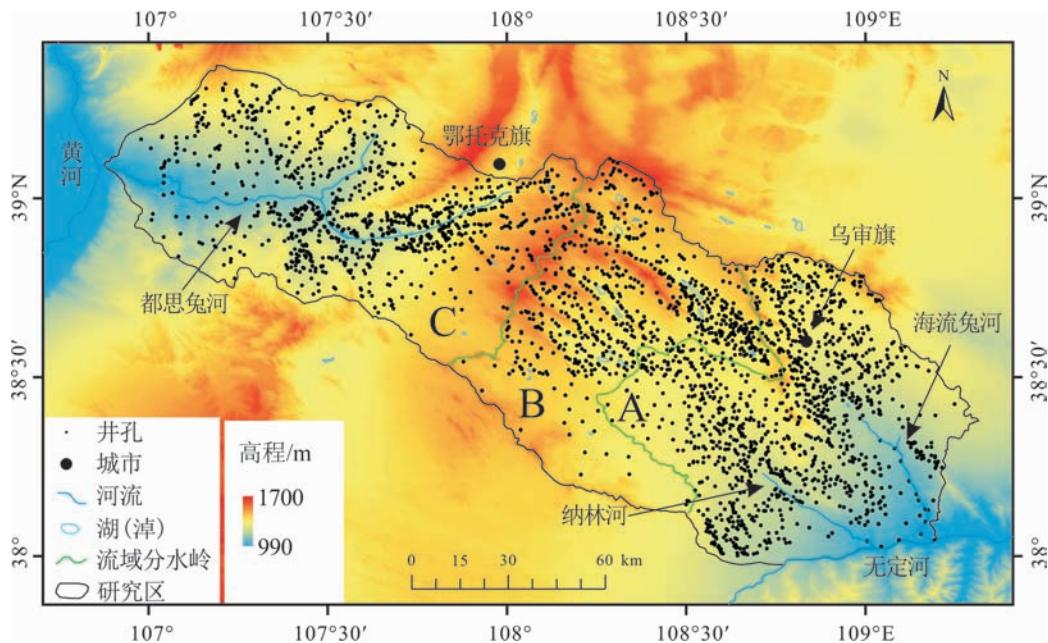


图1 研究区位置和井孔资料分布图
Fig. 1 The study area and distribution of wellbores

于 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 主要来自于地下水的排泄。

鄂尔多斯高原的水文地质调查程度较高^[20], 已经积累了大量的地下水位观测数据。本文研究共收集到2 961个井孔的水位点数据(图1), 包括前人在1:5万地形图中标注的井孔数据。水位点数据几乎均匀分布在都思兔河与海流兔河之间的地带, 本文获取的是井孔中地下水的埋深, 然后根据地表高程推测地下水位。不同来源的数据对应的时间可能相差10年以上, 但近20年来毛乌素沙地的水文地质条件没有显著的改变, 地下水位的变化并不强烈, 井孔水位基本能够代表多年平均地下水位。考虑到本文研究的定量关系基于统计分析, 地下水位变化带来的少量误差并不会影响对相关关系的判断。

1.2 气象数据

本研究从中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)收集了鄂尔多斯高原及其周边22个气象站的数据, 以分析研究区的气候梯度。这些气象站的建站时间有先有后, 为统一起见, 本研究采用1980—2012年(共计33年)的降水量、蒸发量序列计算多年平均值。气象站的蒸发量均为蒸发皿观测值, 在1980—2001年全国气象站统一使用小型蒸发皿(E20型), 而1998年之后, 多数气象站开始采用大型蒸发皿(E601型)观测4—10月的蒸发量。本文利用1998—2001年间4—10月小型和大型蒸

皿的同步观测数据, 确定了两者日蒸发量的线性回归关系, 把大型蒸发量数据统一换算为小型蒸发皿数值。基于这些基础数据, 统计出各个气象站的多年平均降水量和蒸发量, 并用Kriging插值方法绘制出等值线图(图2)。鄂尔多斯高原多年平均降水量为150~450 mm, 整体呈现从东南部向西北部减小的趋势, 而多年平均蒸发量的变化趋势则相反, 在1 800~2 400 mm变化。相对而言, 研究区多年平均气温为5~8 °C, 变化范围很小。因此, 本文暂不考虑气温梯度对植被覆盖的影响。

为了综合反映降水量和蒸发量对植被的影响, 本文采用干旱指数 ϕ 作为气候指标, 其定义为

$$\phi = \frac{E_0}{P} = \frac{kE_p}{P} \quad (1)$$

其中 E_0 为实际水面蒸发量的多年平均值, E_p 为蒸发皿观测蒸发量的多年平均值, k 是蒸发皿校正系数, P 为多年平均降水量。对于蒸发皿校正系数, 本文采用内蒙古地区经验值^[21]的平均值, 即 $k=0.55$ 。计算结果表明, 研究区干旱指数在3.1~6.8变化。按照一般的气候类型划分^[22-23], 干旱指数介于2~5的为半干旱气候, 大于5的为干旱气候。因此, 研究区跨域了干旱、半干旱两个气候带, 具有较强的气候梯度。

1.3 植被数据

目前, 大尺度区域的植被覆盖研究一般采用遥

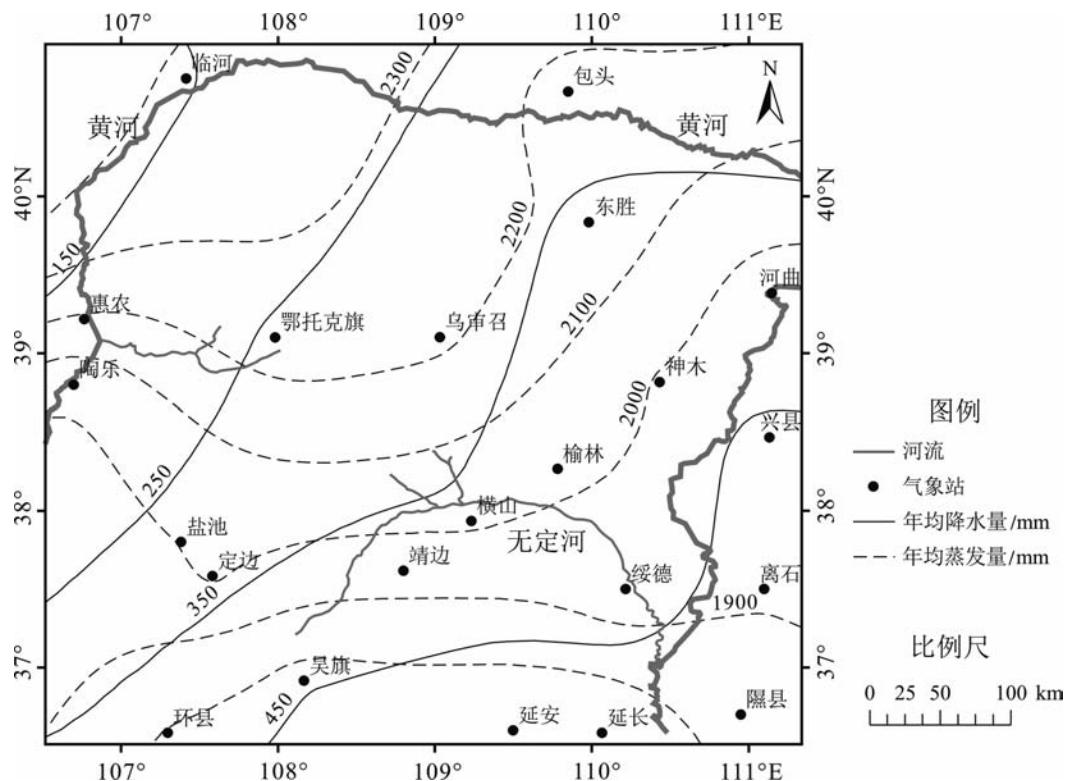


图 2 鄂尔多斯高原多年平均降水量、蒸发量分布特征

Fig. 2 Distributions of mean annual precipitation and pan evaporation in the Ordos Plateau

感知解译得到的植被指数,如归一化植被指数 NDVI,增强型植被指数 EVI 等等。NDVI 是当前研究植被分布规律普遍采用的遥感数据。但是 NDVI 在植被高覆盖区容易饱和,并且易受大气干扰和土壤背景干扰的影响^[24]。为了弥补 NDVI 的不足,LIU 和 HUETE^[25]建立了增强型植被指数(EVI),EVI 改进了 NDVI 在大气、土壤背景、植被饱和等问题上的不足,其计算公式为

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue} + L} \quad (2)$$

其中, ρ_{NIR} 、 ρ_{red} 和 ρ_{blue} 分别为近红外、红光、蓝光波段经过大气校正的反射值, L 为土壤调节参数, 参数 C_1 、 C_2 用于通过蓝光波段来修正大气对红光波段的影响, G 为增益系数。通常取 $L=1$, $C_1=6$, $C_2=7.5$, $G=2.5$ ^[24,26]。美国 NASA 定期发布 EVI 数据产品,研究人员可从专门的网站上(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)下载 MODIS EVI 棚格数据。

笔者收集了研究区 2000—2014 年的 MODIS EVI 棚格数据,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d。在鄂尔多斯高原,EVI 值存在比较强烈的季

节性变化,最大值一般出现在每年 8 月中旬,代表植被覆盖所能达到的最大程度,这个时期的植被指数能代表植被覆盖特征。根据获取的 2000—2014 年 8 月中旬 EVI 数据,可以计算得到代表多年平均植被盖度的 EVI 均值(算术平均值),其分布特征见图 3。

研究区 8 月中旬 EVI 均值在 $-0.1 \sim 0.6$ 变化,但绝大多数小于 0.3,大于 0.4 的局部地区含有耕地作物。EVI 低于零表示水体,而 EVI 介于 0.0 与 0.1 之间区域一般属于裸地或植被稀疏的沙丘。此外,笔者发现盐碱滩等裸地的 EVI 均在 0.06 以下,因此可以将 $EVI=0.06$ 作为判断有无植被覆盖的基线值。前人发现塔里木沙漠的 EVI 基线值为 0.04^[27],与本研究区很接近。在海流兔河流域、纳林河流域和都思兔河流域的偏中下游地区,EVI 值偏高,主要是由耕地作物引起的。当然,并非全部高 EVI 区都属于耕地,在地下水埋深很浅的区域也可能由于天然植被茂盛而出现高 EVI 现象。本研究根据土地利用信息划分了鄂尔多斯高原耕地区和非耕地区,将非耕地区提取出来进行天然植被覆盖特征的分析。图 3 在一定程度上显示了植被的斑块状分布。

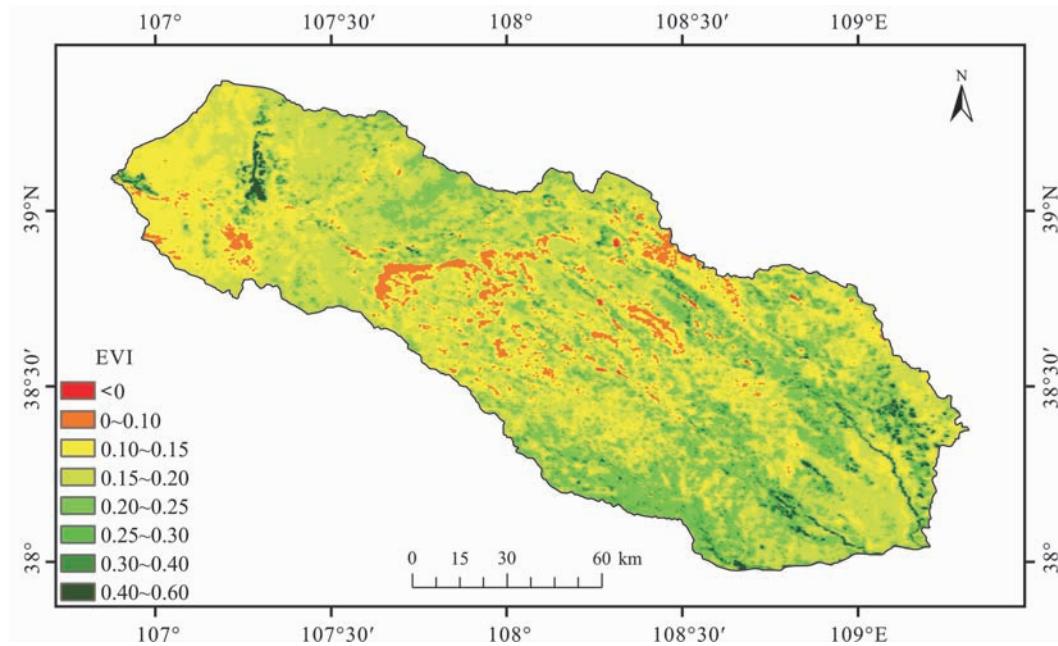


图3 研究区8月中旬增强型植被指数(EVI)多年平均值分布图

Fig. 3 Distribution of the mean annual enhanced vegetation index (EVI) in August in the study area

2 数据统计特征及相关性分析

2.1 植被指数和地下水埋深的统计特征

根据井孔埋深数据和数字高程(DEM, 90 m 分辨率),可以计算出各井孔所在位置的地下水位。在此基础上采用 Kriging 方法进行空间插值,得到研究区地下水位栅格数据,分辨率为 250 m,与 EVI 栅格数据的分辨率一致。

研究区 EVI 和地下水埋深都表现出一定的随机性。图 4 给出了非耕地植被覆盖区 EVI 栅格数据以及地下水埋深栅格数据的统计直方图。图中不含 EVI 低于 0.06 的裸地和水体数据。总体而言,

EVI 及地下水埋深在统计上均不符合正态分布。EVI 比较符合偏正态分布特征,峰值出现在 0.15~0.20,拖尾现象并不明显。地下水埋深小于 10 m 的区域约占研究区面积一半,但地下水埋深的频率分布存在显著的拖尾现象,且随着埋深的增加出现频率缓慢减小,埋深大于 50 m 的区域占研究区面积不足 5%。

2.2 地下水埋深影响植被盖度的定量特征

把不同埋深的 EVI 栅格数据投放到直角坐标系,可以得到图 5 所示的散点图。该散点图既可以反映植被指数随机特征,又可以表现出地下水埋深对植被指数的影响。在地下水埋深小于 10 m 的范围,有不少数据点位于 $EVI > 0.3$ 的区域,而地下

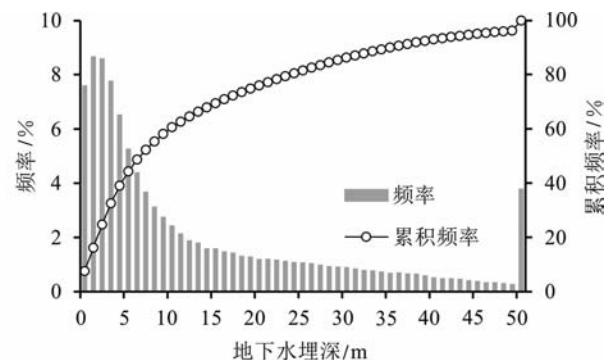
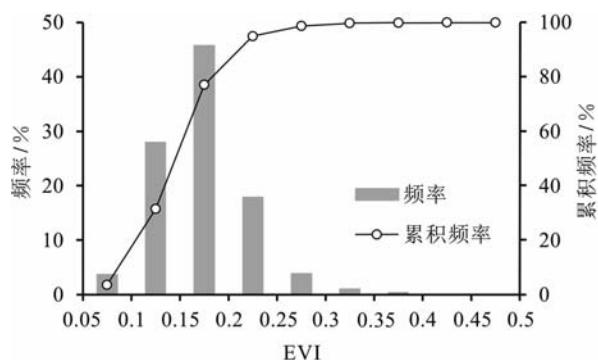


图4 非耕地区增强型植被指数(左)和地下水埋深(右)的统计特征

Fig. 4 Statistical properties of the enhanced vegetation index (left) and groundwater depth (right) in the uncultivated area

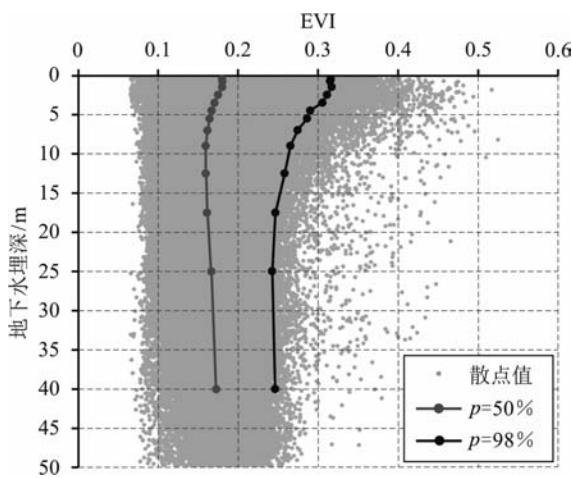


图 5 非耕地区增强型植被指数随地下水埋深的变化特征

Fig. 5 Variation patterns of the enhanced vegetation index with groundwater depth in the uncultivated area

埋深大于 20 m 时,则绝大部分数据点位于 $EVI < 0.3$ 的区间,这说明地下水埋深可以控制植被指数的分布概率。这种影响可以通过不同埋深区间的 EVI 统计指标来进行定量分析。本文取 EVI 小于某一数值的概率为 p ,则 $p=50\%$ 所对应的是 EVI 的均值(EVI_a), $p=98\%$ 所对应的 EVI 数值(EVI_m)反映了绝大多数情况下能够达到的较高植被盖度水平。为了保证统计样本数达到 1 000 个以上,在计算 EVI_a 与 EVI_m 时,地下水埋深区间的跨度随地下水位降低而逐渐增大,但当地下水埋深小于 5 m 时,埋深区间取固定值为 1 m。如此获取的 EVI_a 及 EVI_m 随地下水埋深的变化也绘制在图 5 中。总体上看, EVI_a 与 EVI_m 均随地下水埋深的增大而减小。

EVI_a 在 0.16~0.18 之间变化,且当埋深大于 20 m 时, EVI_a 基本与地下水埋深无关。在地下水埋深小于 20 m 的范围, EVI_a 的变化可以近似描述为以下非线性公式:

$$EVI_a = 0.18, 0 < d < 2 \text{ m} \quad (3)$$

$$EVI_a = 0.16 + 0.02 \exp[-\lambda_a(d-2)], 2 \text{ m} \leq d < 20 \text{ m} \quad (4)$$

其中: d 为地下水的埋深,m; λ_a 为 EVI 均值的衰减系数($\lambda_a = 0.36 \text{ m}^{-1}$)。该非线性公式的拟合相关系数达到 $R^2 = 0.97$ 。

EVI_m 的变化幅度更大一些。当地下水埋深在 1~2 m 时, EVI_m 接近 0.32,达到密集灌丛或树林的植被盖度,而地下水埋深超过 20 m 时, EVI_m 迅速下降到 0.24 附近且基本不再随地下水埋深变化。在地下水埋深小于 50 m 的范围, EVI_m 的变化可以

近似描述为以下非线性公式:

$$EVI_m = 0.316, 0 < d < 2 \text{ m} \quad (5)$$

$$EVI_m = 0.243 + 0.073 \exp[-\lambda_m(d-2)], \\ 2 \text{ m} \leq d < 50 \text{ m} \quad (6)$$

其中 λ_m 为 98% 概率 EVI 值的衰减系数($\lambda_m = 0.15 \text{ m}^{-1}$)。该非线性公式的拟合相关系数达到了 $R^2 = 0.99$ 。比较式(3)、(4)和式(5)、(6),可见 EVI_a 与 EVI_m 的变化都存在 2 m 的临界地下水埋深,即当 $d < 2 \text{ m}$ 时,植被指数的分布概率不再随地下水埋深变化,说明这样浅的地下水埋深所提供的土壤湿度足以使植被覆盖达到最好的状态。另一方面, $d > 2 \text{ m}$ 时, EVI 统计值都随地下水埋深呈指数衰减,而且 EVI_a 的相对衰减反而快于 EVI_m 的衰减(因 $\lambda_a > \lambda_m$)。当 $d > 15 \text{ m}$ 时,两者都基本衰减到最小值,植被指数不再受到地下水埋深的影响,而受控于气候、土壤等其他因素。因此, d 介于 2 m 至 15 m 之间是研究区植被指数对地下水埋深比较敏感的区间段。图 5 中的 EVI 统计值随地下水埋深的变化并非确定性的减小,而是在趋势项左右轻微摆动,甚至存在“逆”趋势现象(如 $d > 20 \text{ m}$ 时, EVI_a 随 d 的增大反而略有增加)。这说明 EVI 的分布概率并不单纯受到地下水埋深的控制,也受到其他因素的影响。其中一个重要的因素就是气候背景(干旱指数)。

2.3 干旱指数影响植被盖度的定量特征

与处理地下水埋深与 EVI 关系类似,如果把干旱指数(ϕ)作为横坐标,EVI 作为纵坐标,可以得到如图 6 所示的散点图。显然,数据点也具有随机分布的特点,但分布的概率特征随干旱指数而变化。总体上,即随着干旱指数的增加,EVI 有下降的趋势。本文同样以 $p = 50\%$ (EVI_a) 和 $p = 98\%$ (EVI_m) 两个统计值来定量分析植被指数随干旱指数的变化。以 0.5 为间隔,根据 ϕ 属于 3~7 的不同区间的散点数据样本计算 EVI_a 与 EVI_m ,每个区间的样本点数都达到 5 000 个以上。结果以曲线形式绘制在图 6 中。可见 EVI_m 随干旱指数增加呈现明显的减小趋势,且可以近似表示为以下线性公式:

$$EVI_m = 0.457 - 0.0437\phi, 3 < \phi < 7 \quad (7)$$

该式的拟合相关系数达到 $R^2 = 0.95$ 。与此不同的是, EVI_a 尽管随干旱指数增加也存在总体上的下降趋势,但表现出一定的波动性。这说明虽然高盖度植被的存在概率受到干旱指数的强烈影响,但 EVI 在 0.1~0.2 的低盖度植被的存在概率并不单纯地依赖于干旱指数,可能也强烈地受到其他因素(例如

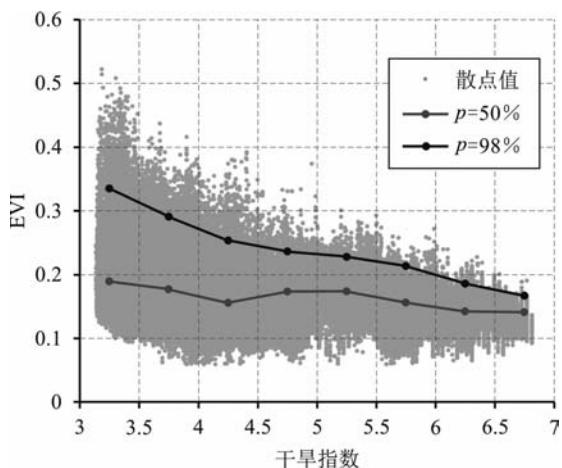


图 6 非耕地区增强型植被指数随干旱指数的变化特征

Fig. 6 Variation patterns of the enhanced vegetation index with the aridity index in the uncultivated area

地下水埋深)的影响。因此,仅仅利用气候因素来判断植被覆盖特征也是不全面的。

3 双因素联合影响植被分布的定量分析与讨论

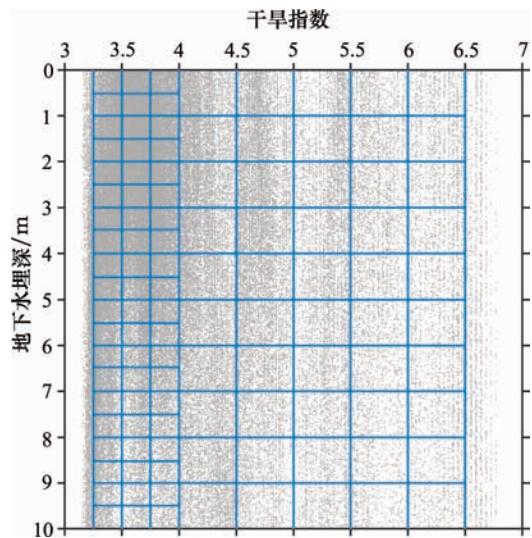
3.1 双因素坐标系

图 5、6 中的散点数据虽然能够各自反映地下水和气候背景对植被指数的影响,但是在单因素控制的趋势部分已经包含了另外一个因素的作用,存在混合效应。因此,式(3)~(7)所描述的定量关系仍然不够准确。为此,本文建立干旱指数、地下水埋深的坐标系,将 EVI 数据投放到该坐标系中。然后,分区间计算 EVI 的统计值(EVI_a 及 EVI_m)并进行分析。总体按照地下水埋深间隔 1 m、干旱指数间隔 0.5 方式划分网格区间,但在数据点较密集的部分进行加密,加密网格的地下水埋深和干旱指数间隔分别为 0.5 m 和 0.25(图 7)。每个网格区间的数据散点均超过 300 个。

3.2 植被指数在双因素坐标系的分布特征

在图 7 所示的网格区间计算植被指数统计值 EVI_a 及 EVI_m ,并以网格区间的中点为坐标,进行空间插值,可以绘制植被指数统计值的等值线图。 EVI 统计值在这种二维坐标系的分布情况如图 8 所示。从图 8 可以看出, EVI_a 及 EVI_m 随干旱指数增加和地下水埋深增大均表现出总体上的减小趋势,但并不是单调均匀的变化。

以 $p=50\%$ 计算的 EVI 均值(EVI_a)介于 0.12



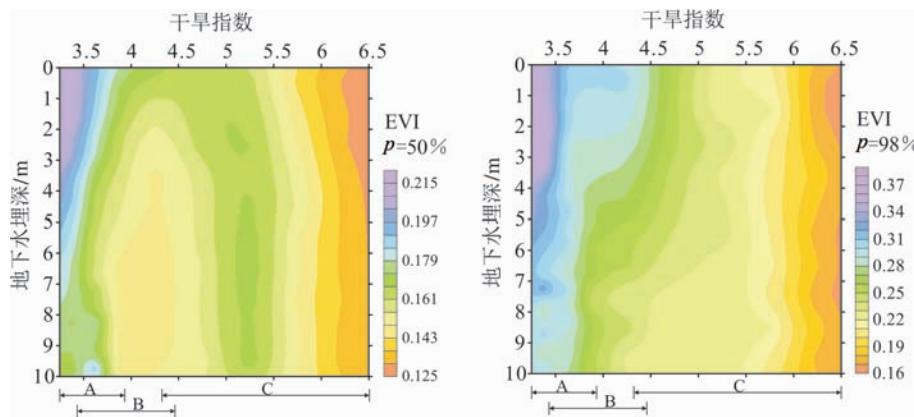
蓝色线划分出计算 EVI 统计值的网格区间。

图 7 研究区植被指数样本数据在双因素坐标系的分布特征

Fig. 7 Data points of vegetation index in the study area distributed in the coordinates composed of the double factors

至 0.23 之间(图 8 左)。其最大值出现在干旱指数小于 3.4、地下水埋深小于 2 m 的区间,位于无定河流域内。其最小值出现在干旱指数大于 6.2、地下水埋深小于 1 m 的区间,位于都思兔河流域内。值得强调的是, EVI_a 的最小值并不出现在地下水埋深最大的区间,而是出现在气候非常干旱的地下水浅埋区,这种地下水浅埋区往往发生土壤盐渍化而不宜植被生长。另一方面,在干旱指数大于 4.5 的情况下(都思兔河流域), EVI_a 的等值线近似与纵坐标平行,说明这种情况下 EVI_a 随地下水埋深的变化并不明显。在这种 EVI_a 的分布格局中,也存在与宏观趋势不协调的情况,即在干旱指数介于 5.0~5.5、地下水埋深大于 2 m 的区间, EVI_a 数值偏大。这个区间与鄂托克旗市的西侧山梁有对应关系,该处人工植树造林(实际为沙生灌木)导致植被盖度增大。

相对于 EVI_a 而言, EVI_m ($p=98\%$)的变化范围更大一些,介于 0.16~0.39(图 8 右)。其最大值出现在干旱指数小于 3.4、地下水埋深介于 1~3 m 的区域,也位于无定河流域内。研究区地下水埋深小于 1 m 的陆地区域往往以草甸为主要景观,出现树林的概率并不大。 EVI_m 最小值出现在干旱指数大于 6.3、地下水埋深小于 2 m 的区间,位于都思兔河流域西北部河谷或河床附近。这是浅埋深地下水长期蒸发积盐并导致土壤盐渍化的后果。总体上,干旱指数大于 5.5 时, EVI_m 一般小于 0.22,且与地下水埋深并无显著关系。在干旱指数小于 4.5 且地



A 属于无定河流域;B 属于内陆湖流域;C 属于都思兔河流域。

图 8 双因素坐标系下增强型植被指数 EVI 的分布特征

Fig. 8 Distribution of the enhanced vegetation index (EVI) in the coordinates composed of the double factors

下水埋深小于 7 m 的情况下,地下水埋深对 EVI_m 的影响很明显。而当地下水埋深大于 7 m 时, EVI_m 出现局部振荡或等值线趋于与纵坐标平行,显示地下水埋深对植被指数的影响减弱。此外,在鄂托克旗市西侧山梁对应的区间,没有出现 EVI_m 显著偏离宏观趋势的特征,说明这个地区植树造林并没有形成大片 EVI 超过 0.22 的高密度植被。

3.3 讨论

图 8 已经清楚地表明:研究区植被的空间分布特征同时受到气候因素以及地下水的影响。前人^[15-16]在运用遥感数据研究“地下水-植被”关系的过程中,对气候梯度的考虑不充分,因此得到的结论不够准确。例如,根据植被指数与地下水埋深的单纯相关性(图 5),似乎地下水显著影响植被分布的临界埋深可以达到 10 m 甚至 20 m。然而,从双因素坐标系下的结果(图 8)来看, $d > 7$ m 时植被分布就几乎与地下水埋深无关了,说明取临界埋深为 7 m 更加合理。实际上,研究区砂土的毛细上升高度和植被根系的深度都很难达到 10 m,无法解释如此深的地下水仍然对植被分布有影响。前人之所以对临界埋深估计偏大,是因为在图 5 之类的关系图中混入了气候因素的作用。从图 7 可以看出,干旱指数越小,地下水埋深偏小的概率也越大(数据点占比例越大),造成“地下水埋深越小、干旱指数也越小”的非因果性相关关系。由于干旱指数对植被分布具有显著影响,上述非因果性的相关关系大大强化了“地下水埋深越小、植被指数越大”的统计特征,而这只是区域尺度气候背景与地下水埋深之间某种关联导致的宏观统计结果。只要考虑干旱指数和地下水埋

深的联合影响,就可以基本排除这种干扰。

除了上述气候因素和地下水之外,土壤质地和盐分、地形地貌和人类活动等其他因素也可能影响植被指数的空间分布^[28-30]。由于水文地质条件实际上也与土壤质地和地形地貌有关,地下水的影响可能间接反映了这些自然因素的综合作用,本文没有单独加以分析。但在某些地区干旱指数和地下水埋深之外的因素可能是控制植被分布的主要因素,需要另当别论。当多种因素都影响植被指数分布、而且没有哪个因素的作用占显著优势时,主成分分析法可能会更加有效。另外,本文对定量关系的研究虽然剔除了耕地区的数据,分析结果也仍然会在一定程度上受到人类活动的干扰,例如都思兔河流域某些梁地上人工植树造林及灌溉维护导致的植被指数偏高现象,削弱了植被指数均值随地下水埋深和干旱指数变化的宏观趋势。关于土地利用如何与自然因素叠加在一起对植被指数的分布产生影响,尚待进一步分析研究。

4 结论

鄂尔多斯高原无定河与都思兔河之间的地段覆盖毛乌素沙地,干旱指数在 3~7 变化,跨越了干旱区和半干旱区气候类型,存在较强的降水量和蒸发量梯度,造成植被类型和盖度的空间差异。与此同时,地下水的深浅变化也会导致植被盖度的空间差异。鄂尔多斯高原天然植被的分布主要是气候背景和地下水这 2 个因素联合作用的结果。利用增强型植被指数(EVI)、地下水埋深以及干旱指数栅格数据进行的

统计分析表明,随着干旱指数和地下水埋深的增大,研究区植被指数的概率统计值都存在减小的趋势。干旱指数介于3~5时,地下水埋深对植被指数的影响比较显著,而在干旱指数大于5的地区地下水对植被指数的影响较弱。一般情况下,地下水埋深介于1~3 m最有利于高盖度植被的出现,埋深大于7 m时地下水对植被基本没有影响。干旱指数大于6时,在地下水埋深小于1 m的地带易于发生土壤盐渍化而导致植被指数减小。本文的结果改进了前人关于鄂尔多斯生态水文地质特征的一些认识。

参考文献

- [1] WHITTAKER R H. A criticism of the plant association and climatic climax concepts[J]. Northwest Science, 1951, 25: 17-31.
- [2] 方精云. 东亚地区植被气候类型在温度、降水量坐标中的表达[J]. 生态学报, 1994, 14(3): 290-294.
- [3] WANG J, PRICE K P, RICH P M. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3827-3844.
- [4] ICHII K, KAWABATA A, YAMAGUCHI Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(18): 3873-3878.
- [5] VANACKER V, LINDERMANN M, LUPO F, et al. Impact of short-term rainfall fluctuation on interannual land cover change in sub-Saharan Africa[J]. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14(2): 123-135.
- [6] NAGLER P L, GLENN E P, KIM H, et al. Relationship between evapotranspiration and precipitation pulses in a semi-arid rangeland estimated by moisture flux towers and MODIS vegetation indices[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 70(3): 443-462.
- [7] 普布次仁. 归一化植被指数与降水量、土壤湿度的关系[J]. 气象, 1995, 21(12): 8-12.
- [8] 金晓媚, 万力, 薛忠歧, 等. 基于遥感方法的银川盆地植被发育与地下水关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008(1): 129-132.
- [9] JIN X M, SCHAEPMAN M E, CLEVERS J G P W, et al. Groundwater depth and vegetation in the Ejina area, China[J]. Arid Land Research and Management, 2011, 25(2): 194-199.
- [10] 黄金廷, 侯光才, 陶正平, 等. 鄂尔多斯高原植被生态分区及其水文地质意义[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1330-1334.
- [11] 李瑛. 鄂尔多斯湖盆高原地下水与植被生态关系研究: 以苏贝淖流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2009: 3-61.
- [12] 张二勇. 鄂尔多斯盆地内蒙古能源基地地下水开发与植被演化风险评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 4-57.
- [13] 卢娜. 基于遥感的鄂尔多斯盆地蒸发量计算及植被指数分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006: 5-74.
- [14] 吕京京. 海流兔河流域地下水对植被指数分布的影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 3-91.
- [15] LÜ J J, WANG X S, ZHOU Y X, et al. Groundwater-dependent distribution of vegetation in Hailiutu River catchment, a semi-arid region in China[J]. Ecohydrology, 2013, 6(1): 142-149.
- [16] 王旭升, 万力, 齐蕊, 等. 鄂尔多斯高原地下水与植被盖度的相互影响[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5): 1013-1022.
- [17] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 64-66.
- [18] 何彤慧, 王乃昂. 毛乌素沙地历史时期环境变化研究[M]. 北京: 人民出版社, 2010: 1-402.
- [19] 董光荣. 中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 151-161.
- [20] 侯光才, 张茂省, 刘方, 等. 鄂尔多斯盆地地下水勘察研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 32-36.
- [21] 施成熙, 牛克源, 陈天珠, 等. 水面蒸发器折算系数研究[J]. 地理科学, 1986, 6(4): 305-313.
- [22] United Nations Environment Programme (UNEP). World atlas of desertification[M]. London: UNEP, 1992.
- [23] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization(UNESCO). Map of the world distribution of arid regions: explanatory note[M]. Paris: Man and Biosphere (MAB) Technical Notes, 1979: 54.
- [24] 王正兴, 刘闯, HUETE A. 植被指数研究进展: 从AVHRR-NDVI到MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [25] LIU H Q, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 457-465.
- [26] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1): 195-213.
- [27] 王正兴, 刘闯, 陈文波, 等. MODIS增强型植被指数EVI与NDVI初步比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(5): 407-410.
- [28] 金晓媚, 张强, 杨春杰. 海流兔河流域植被分布与地形地貌及地下水位关系研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 227-233.
- [29] 周仰效. 地下水-陆生植被系统研究评述[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 21-30.
- [30] PINNEKER E V. A recent concept of hydrogeology and its ecological problems[J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3(1): 49-56.