

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.03.01

柴达木盆地生态植被的地下水阈值

党学亚^{1,2,3}, 卢娜^{1,2,3}, 顾小凡^{1,2,3}, 金晓媚⁴

- (1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局干旱-半干旱地区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710054; 4. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 生态植被的地下水阈值是指植被依赖地下水生长的最大水位埋深和溶解性总固体含量(TDS)。控制地下水开采生态风险的基础是弄清生态植被与地下水的依存关系并给出地下水阈值。文章利用遥感数据集 MOD13Q1 和水文地质调查获得的实测数据, 统计分析了柴达木盆地主要平原区生态植被与潜水的水位埋深、TDS 的关系。结果表明: 天然植被依赖地下水的阈值是水位埋深为 5.3 m、TDS 为 7.5 g/L; 埋深 > 5.3 m 地带的天然植被基本与地下水无关; 埋深 < 1.1 m 是水生植被、湿生植被与湿生耐盐碱植被适宜生长的水位埋深区间; 埋深 1.4 ~ 3.5 m 是耐盐植被及中生植被与旱生植被适合生长的水位埋深区间; TDS ≤ 1.5 g/L 适宜植被生长, 1.5 g/L < TDS ≤ 5 g/L 较适宜植被生长, 5 g/L < TDS ≤ 7.5 g/L 基本不适宜植被生长, TDS > 7.5 g/L 不适宜植被生长。

关键词: 柴达木盆地; 生态植被; 地下水阈值; 水位埋深; TDS

中图分类号: P641.1; P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)03-0001-08

Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin

DANG Xueya^{1,2,3}, LU Na^{1,2,3}, GU Xiaofan^{1,2,3}, JIN Xiaomei⁴

- (1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
3. Shaanxi Province Engineering Research Centre of Water Resources and Environment, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
4. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The groundwater threshold of ecological vegetation is defined as the maximum depth to the water table and the maximum total dissolved solids (TDS) of groundwater on which the growth of vegetation depends. The basis for controlling the ecological risk of groundwater exploitation is to clarify the dependency of ecological vegetation and groundwater and determine the groundwater threshold. Based on the measured data obtained by remote sensing dataset MOD13Q1 and hydrogeological survey, the relationship among ecological vegetation, burial depth and TDS of the phreatic water in the main plain area of the Qaidam Basin is statistically analyzed. The results show that ① the threshold of natural vegetation-dependent groundwater is 5.3 m for depth of water table and 7.5 g/L for TDS, and natural vegetation growing in areas where the water table depth is more than 5.3 m is basically independent of groundwater. ② Water table depth < 1.1 m is suitable for aquatic, hygrophilous vegetation and hygrophilous saline-resistant vegetation. Water table depth ranging from 1.4 m to 3.5 m is suitable for saline-resistant vegetation, middle vegetation and xerophytic vegetation. ③ TDS of ≤ 1.5 g/L is suitable for vegetation growth, 1.5 g/L < TDS ≤ 5 g/L is more suitable for vegetation growth, 5 g/L < TDS ≤ 7.5 g/L is not basically suitable for vegetation growth, and TDS > 7.5 g/L is not suitable for vegetation growth.

Keywords: Qaidam Basin; ecological vegetation; groundwater threshold; groundwater depth; TDS

收稿日期: 2018-09-01; 修订日期: 2018-11-17

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“柴达木盆地巴音河-塔塔凌河流域 1:5 万水文地质调查”(DD20160291)

第一作者: 党学亚(1967-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事水工环地质调查研究。E-mail: 474767944@qq.com

柴达木盆地位于青藏高原东北部,是一个巨大的矿产与能源资源盆地,也是国家在建的最大循环经济试验区,承担着支撑青海经济社会发展、保护三江源,支援西藏建设的重任。在青海实施了生态立省战略,大部分省域被划定为保护区的情况下,柴达木几乎是青海唯一可开发矿产,变资源优势为经济优势的地区,又被称作为青海发展的“经济眼”和带动青藏经济的“发动机”。区内的格尔木、德令哈、乌兰、诺木洪-宗加及乌图美仁平原是柴达木循环经济的核心布局区与主要用水区(图1)。根据柴达木盆地重点地区1:5万

水文地质调查报告^[1]以及柴达木盆地地下水资源及其环境问题调查评价报告^[2]:柴达木盆地干旱少雨,内部平原区水资源基本来自周边山区的径流输入,多年平均量为 $5\,630 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。其中 $4\,244 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 为出山河流在冲洪积扇渗漏形成的地下水。因此,地下水是柴达木经济社会发展依赖的主要水源。与此同时,地下水在冲洪积扇前缘泄出后与地表水共同作用形成了绿洲植被,其又是维持盆地绿洲生态的重要水源。故循环经济试验区开发利用水资源必须查明地下水与生态植被的关系。

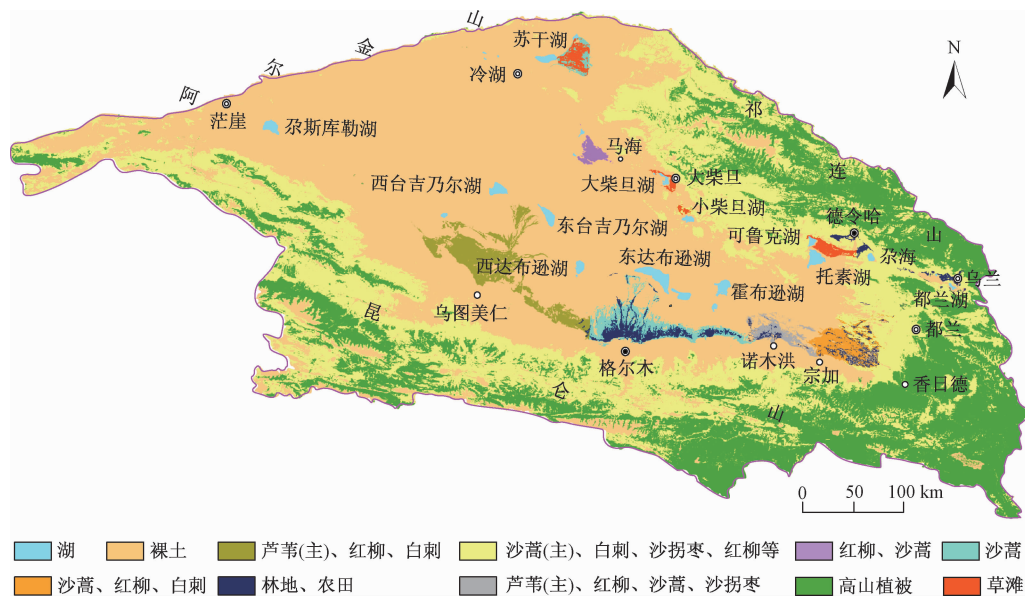


图1 柴达木盆地主要植物种群分布图

Fig. 1 Distribution map of the main plant populations in the Qaidam Basin

目前,生态植被与地下水关系的调查研究从技术思路到方法手段均已成熟。杨泽元等通过调查提出了陕北风沙滩地区生态安全的地下水位埋深为 $1.5 \sim 5 \text{ m}$ ^[3];张茂省等采用水文地质调查与遥感定量分析相结合的方法,研究认为陕北能源化工基地风沙滩地区影响植被生态的潜水位埋深不超过 7 m ^[4];金晓媚等通过遥感分析并辅以野外验证的方法,研究了银川平原、黑河下游绿洲带及柴达木乌图美仁和都兰地区地下水与植被的关系^[5-8],得出适宜植被的水位埋深和TDS为银川平原水位埋深 $2 \sim 4 \text{ m}$ 、 $\text{TDS} < 2.5 \text{ g/L}$,黑河下游绿洲带水位埋深 $2 \sim 5 \text{ m}$,乌图美仁地区水位埋深 $< 2 \text{ m}$ 、 $\text{TDS} < 3.5 \text{ g/L}$,都兰地区水位埋深 1.7 m 、 $\text{TDS} < 3 \text{ g/L}$ 。本文利用2010年以来,在柴达木盆地实施的系列1:5万水文地质调查项目获得的基础数据,通过研究平原生态植被与地下水的关系,厘定出对柴达木盆地具有普适性且便于宏观层面科学决策采用的生

态植被的地下水阈值,以期为柴达木循环经济试验区基于风险管控制定地下水开发利用方案提供基础依据。

1 研究区概况

研究区由格尔木、德令哈、乌兰、诺木洪-宗加、乌图美仁5个位于昆仑山和祁连山山前的第四系河湖相沉积平原组成。从河流出口至下游终端湖,昆仑山前的乌图美仁、格尔木、诺木洪-宗加地区地貌形态依次为洪积平原、冲洪积平原、冲湖积平原和湖积平原,而祁连山前的德令哈、乌兰地区为洪积平原、冲洪积平原、冲湖积平原,几乎不存在湖积平原。

全盆地降水量 $< 300 \text{ mm}$,主要集中在6—9月。降水呈现山区多平原区少、东部多西部少的空间分布特征。其中,山区降水量 $100 \sim 300 \text{ mm}$,平原区降水量 $20 \sim 200 \text{ mm}$,祁连山前的德令哈平原、乌兰平原 $100 \sim$

200 mm, 诺木洪 - 宗加、格尔木、乌图美仁平原约 50 mm。研究区以特征荒漠^[9]为主, 植被稀疏, 种类不足 200 种, 主要是高度抗旱与耐盐碱的灌木、半灌木和草本, 分布于砾石戈壁、洪积平原上的沙漠地带, 结构简单^[10-11]。砂砾质洪积平原, 潜水位埋深 > 20 m、土壤总盐 0.6% ~ 1%, 植物群落建群种主要为膜果麻黄、驼绒藜、梭梭、蒿叶猪毛菜和合头草; 绿洲所在的洪积平原前缘和冲积平原中后部, 潜水位埋深 3 ~ 10 m、TDS 在 1 ~ 5 g/L, 地表土壤为灰棕色沙质盐化的荒漠土, 表层易溶盐含量 5% ~ 10%, 植物群落主要为怪柳和梭梭; 冲积平原前部和湖积平原后缘, 潜水位埋深 2 ~ 3 m, TDS 在 5 ~ 10 g/L, 土壤为荒漠盐土, 表层含盐量为 6% ~ 10%, 有较厚的盐结皮, 植物建群种主要为梭梭、怪柳和多汁盐生的盐爪爪等; 冲积平原前缘和湖积平原区, 潜水位埋深 < 2 m, TDS 在 10 ~ 50 g/L, 土壤为盐生草甸土和草甸盐土, 表层含盐量 > 10%, 多具盐壳, 植物群落随着潜水位埋深减小依次为芨芨草盐生

草甸、芦苇与赖草盐生草甸和湿生杂草类、盐角草盐生草甸和沼泽化盐生草甸。

本研究区从河流出口向下游的终端湖泊, 德令哈平原和乌兰平原植被生态依次为戈壁砾石荒漠、地下水泄出带与冲洪积细土平原绿洲, 而乌图美仁、格尔木、诺木洪 - 宗加 3 处平原有所不同, 在戈壁带、绿洲带下游分布有大面积寸草不生的盐沼荒漠^[12-19]。各块区除共同具有蒿叶猪毛菜、冰草、驼绒藜、合头草、赖草等植被种群外, 还有各自独特的建群植物种类, 从而使得植被群落结构有所不同。其中: 格尔木平原区以芦苇、罗布麻、黑枸杞、白刺、膜果麻黄、沙蒿、红柳为主; 德令哈平原区以为芦苇、白刺、红柳、枇杷柴、沙蒿、芨芨草、盐爪爪、黑枸杞、梭梭混生为主; 乌兰平原区以芦苇、盐爪爪、沙蒿为主, 同时伴生有怪柳、白刺、梭梭等; 诺木洪 - 宗加平原区主要为芦苇、沙蒿、红柳、白刺、沙拐枣混生; 乌图美仁平原区以芦苇为主, 其间混生少量红柳和白刺 (图 1)。主要植物类型的习性和适生环境见表 1。

表 1 柴达木盆地主要植物类型的适生环境一览表

Table 1 A list of suitable environments for the main plant types in the Qaidam Basin				
类型	植物名称	适宜土地类型和地下水位埋深	最大根系深度	特性
草本	蒿叶猪毛菜	荒漠戈壁滩, 含盐碱的沙质土壤	0.2 m	耐旱, 耐盐
草本	冰草	干燥草地, 山坡, 丘陵及沙地	< 1 m	喜干燥、寒冷
草本	赖草	水分条件较好, 盐渍化较轻的河谷冲积平原或水渠边沿, 在干旱或盐渍较重的生活环境, 生长低矮	< 1.1 m	耐旱、耐寒, 轻度耐盐
草本	矮化芦苇	适宜生长于水位 1 ~ 5 m 深的草甸盐土沙地、盐碱滩	< 1.5 m	耐干旱、风沙
草本	芨芨草	微碱性草滩, 喜生于水位埋深约 1.5 m 的轻度盐渍化土	0.8 ~ 1.5 m	耐盐碱滩
半灌木	合头草	喜生于石质残丘、碎石坡地和丘顶, 也见于壤质碱化的土壤上	0.20 ~ 0.25 m	喜干燥、寒冷
半灌木	罗布麻	水位 1 ~ 3 m 深的盐碱地、沙荒地河滩地	0.3 ~ 4 m	耐盐碱性
半灌木	驼绒藜	戈壁、荒漠、半荒漠、干旱山坡或草原	0.6 m	抗旱、耐寒、耐瘠薄
半灌木	沙蒿	半流动、半固定、固定沙丘, 平沙地, 覆沙戈壁, 干河床	1.5 ~ 4 m	抗寒, 抗旱, 耐沙埋
灌木	盐爪爪	洪积扇前缘及湖边, 多发育在冲积平原水位埋深 1 ~ 1.5 m 的壤质盐土地, 形成盐生草甸	0.15 ~ 0.20 m	耐盐碱
灌木	柴达木黑枸杞	湖泊盆地、冲积扇、河流沿岸、风积沙丘边缘和山间盐土平原	< 0.5 m	耐旱、耐盐碱, 耐寒、耐高温
灌木	白刺	多生于盐渍化较为严重、水位 1 ~ 2 m 的深沙地或有风积沙的黏土	1 ~ 3 m	喜碱地, 耐干旱, 耐风蚀沙埋
灌木	膜果麻黄	山坡、平原、干燥荒地、河床及草原	> 2 m	耐热, 耐寒, 喜旱
灌木	沙拐枣	沙丘、砂砾质荒漠	< 6 m	强旱生, 耐旱、耐高温
灌木	红柳	河漫滩、河谷阶地上, 沙质和黏土质盐碱化的平原上, 沙丘上	< 10 m	耐旱、耐热、喜光
灌木	怪柳	水位 3 ~ 5 m 深的沙漠、1 ~ 2 m 深的壤质盐土	< 10 m	抗沙埋风蚀, 耐水湿盐碱、干旱
小乔木	梭梭	水位 3 ~ 4 m 深的沙丘、丘间沙地及中轻度盐渍土, 水分异常缺乏的洪积石质戈壁	主根 2 m, 最深达 4 ~ 5 m	抗旱、抗热、抗寒、耐盐碱性都很强

另外, 研究区农业种植和城乡绿化贡献了大面积的人工绿地。5 个块区中除乌图美仁人烟稀少, 生态植被基本保持天然状态外, 其它 4 区是柴达木盆地的

人口密集区, 城乡绿化与以种植枸杞为特色的高原农业活动强烈。1:5 万水文地质调查显示, 格尔木、德令哈、乌兰及诺木洪 - 宗加的绿洲带上, 地下水位埋深

3~4 m以深的地段是当地市县级城镇以及农场、乡村的所在地,形成横贯冲洪积扇前缘,宽度3~4 km、面积70~215 km²不等的农业种植带(表2)。其中,城乡绿化与防风固沙种植了大量毛白杨、小叶杨等乔木。这些乔木根系深度一般在2.7~4.5 m^[20-21],在多数种植区够及不到地下水,成活与生长发育主要依靠滴管或漫灌维系。

2 研究方法与数据处理

2.1 研究方法

本研究采用生态水文地质调查与遥感定量分析相结合的方法进行。水位埋深、TDS含量数据为柴达木盆地系列1:5万水文地质调查工作在2010—2016年植物生长季6—9月获得的实测数据。其中,水位埋深

通过自计水位仪监测和人工监测获得,仪器监测频率6次/月,人工统测数据为2次/年。TDS数据在青海省水文地质工程地质环境地质调查院实验室测试。遥感数据为MOD13Q1数据集,其内容为归一化差值植被指数(NDVI),空间分辨率为250 m×250 m,每16 d一期数据,每年23期^[22]。像元的NDVI值介于-1和1之间,数值越大表示所对应的地面植被覆盖度越高,反之所对应地面植被覆盖度越低。该套植被指数有2000年4月至今的数据,可免费获取。本研究选用其中与地下水位及TDS获取时间同期的8期NDVI数据,并进行最大值合成,以表征该时间段内的植被覆盖状况。具体的数据范围限定在地下水位埋深<10 m的区域内,但这一区域内无植被生长的乌图美仁平原与格尔木平原盐沼平原除外。

表2 生态景观规模及城乡绿植规模

Table 2 Scale statistics of the ecological landscape and urban and rural green planting in the study area

区块		平原区规模					农业种植 区面积/ km ²	农业种植区 与城镇面 积/km ²	绿洲在植被 分布区的 占比/%	
		与出山口距离/km		面积/km ²						
		地下水 溢出带	终端湖或 绿洲终界	总面积	戈壁	绿洲				盐沼
乌图美仁		40	120(湖)	5500	530	1660	3310	0	0	0
格尔木		30	90(湖)	5400	760	2140	2500	74	125	74
德令哈		16~28	28~40(界)	940	146	685	0	215	255	73
诺木洪—宗加		15~30	29~40(界)	3180	1580	1600	0	75	75	50
乌兰盆地	都兰湖—柯柯盐湖北	5~6	12	285	30	220	0	66	80	77
	都兰湖—柯柯盐湖南	3~5	4~7	210	110	74	0	0	0	35

2.2 数据处理

表1显示区内主要植物根系深度一般小于4 m,沙拐枣小于6 m、红柳和柽柳小于10 m,但适生水位埋深一般不超过3 m、根深较大的红柳和柽柳适生水位埋深在4~5 m。故筛选埋深小于10 m区域的水位、TDS及NDVI数据进行相关性分析,数据量及样点控制面积与密度见表3。

首先将水位埋深进行插值,得到每个像元空间

上对应的水位埋深与NDVI数据;再将水位埋深以0.1 m为间隔,对每一区间上的NDVI值进行平均取值,得到NDVI均值与潜水位埋深关系曲线,确定地下水位阈值;其次,将调查点所处像元的NDVI值与同期对应的TDS含量绘制成散点图,得到NDVI与TDS含量的关系,确定生态植被的地下水TDS阈值;综合两者厘定出能够包容整个研究区天然生态植被的地下水阈值。

表3 样本数量统计

Table 3 Statistics of the sample size

研究区块	数据获取的时间	水位实测点			TDS样点	
		控制面积/km ²	点数/个	密度/(点·(10 km ²) ⁻¹)	点数/个	密度/(点·(10 km ²) ⁻¹)
格尔木平原	2015年6—9月	1300	346	2.66	233	1.79
德令哈平原	2016年6—9月	780	176	2.26	192	2.46
乌兰盆地	2012年6—9月	398	120	3.02	45	1.13
诺木洪—宗加平原	2010年7—9月和2011年7—9月	1430	141	0.99	143	1.00
乌图美仁平原	2010年7—9月和2011年7—9月	530	131	2.47	115	2.17

3 结果与讨论

3.1 NDVI 与水位埋深关系

NDVI 值与潜水位埋深散点图及 NDVI 均值与潜水位埋深关系曲线见图 2。

(1) 各块区 NDVI 散点均有较集中的水位埋深分布区间。格尔木平原 NDVI 散点分布的水位埋深区间主要在 0.3 ~ 3.5 m, 在 3.5 ~ 8.2 m 有一定分布、

8.2 ~ 10 m 极少分布;德令哈平原 NDVI 散点分布的水位埋深区间主要在 0.3 ~ 2.6 m, 在 2.6 ~ 10 m 有显明分布且高值点较多;乌兰平原 NDVI 散点密集分布的水位埋深区间为 0.3 ~ 2.6 m 和 4.3 ~ 8 m, 在 2.3 ~ 4.3 m 有较密集分布;诺木洪 - 宗加平原 NDVI 散点密集分布的水位埋深区间为 0.3 ~ 2.6 m, 其中高值点集中分布于 0.6 ~ 2.3 m;乌图美仁平原 NDVI 散点密集分布的水位埋深区间为 0.5 ~ 2.6 m。

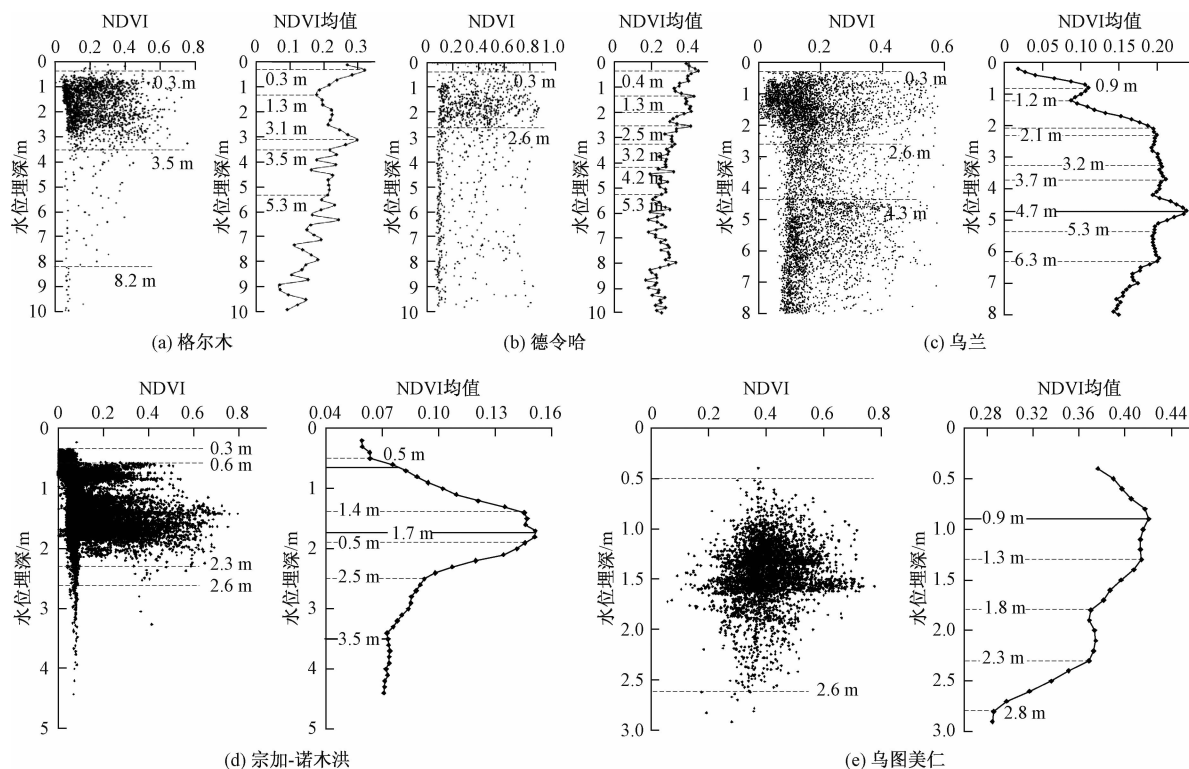


图2 柴达木盆地典型平原区 NDVI 与潜水位埋深关系

Fig. 2 Diagram of NDVI and groundwater table in the typical plain area of the Qaidam Basin

(2) 块区 NDVI 均值曲线除格尔木与德令哈形态类似外, 总体差异明显, 但高值区有着共同的水位埋深区间。格尔木曲线呈多峰谷波浪形态。NDVI 均值在水位埋深小于 3.5 m 时变化平稳、大于 3.5 m 时显著跳荡、大于 5.3 m 时总体呈降低趋势。埋深 0 ~ 1 m 和 1.4 ~ 5.3 m 为高值区, 峰顶在 0.3 和 3.1 m; 同时在埋深 1 ~ 1.4 m 形成了低值区, 谷底在 1.3 m。德令哈曲线形态与格尔木较为相似, NDVI 均值总体较高, 在水位埋深小于 4.2 m 时起伏变化较平滑, 大于 4.2 m 时起伏剧烈且 NDVI 均值呈现明显跳荡性的降低趋势, 但在埋深接近 7 m 后 NDVI 均值有增大趋势。在 0 ~ 1 m、1.2 ~ 2.2 m 和 2.4 ~ 3.6 m 形成了 3 个高值区, 峰顶在 0.4, 1.3, 2.5 和 3.2 m, 峰值大小不等; 同时在 1 ~ 1.2 m 和 2.2 ~ 2.4 m 形成了 NDVI 均值相对较小

的低谷区, 谷底在 1.1 和 2.3 m。乌兰曲线总体呈“台地起峰式”形态, “台地”对应的水位埋深在 2.1 ~ 6.3 m, 区间跨度较大、NDVI 均值相对较高, 并在 2.3, 3.2, 3.7 和 4.7 m 形成了多个幅度不等的峰值; “台地”两侧 NDVI 均值急速减小, 但在埋深 0.8 m 处出现了小峰值、1.1 m 处出现了低谷值。诺木洪 - 宗加的 NDVI 均值总体呈正态分布, 在 0.9 ~ 2.5 m 对应着相对高值区, 其间的 1.4 ~ 1.9 m 为突出的高值区, 峰值在 1.7 m; 水位埋深大于 3.5 m 时, NDVI 均值趋向不变。乌图美仁的 NDVI 均值曲线总体为接近完整的“弯弓”形态, 埋深 0.4 ~ 2.3 m 对应着相对高值区, 峰值在 0.9 m, 其间水位埋深 1.8 ~ 2.3 m 对应的 NDVI 均值变化不明显; 埋深 2.3 ~ 2.8 m 时 NDVI 均值急剧减小, 埋深大于 2.8 m 趋于稳定。横向对比各块区可

见,乌图美仁 NDVI 均值绝对值最高,其次是德令哈、格尔木、乌兰,诺木洪-宗加最低。总体上 1.4 ~ 3.5 m 是各块区高 NDVI 均值共同对应的水位埋深。结合表 1 判断,±0.3 m、±0.9 m、±2.1 m、±3.1 m 等峰值应是几种不同结构植被群落适宜的地下水位埋深;相对而言,水位埋深 ±1.1 m 不利于植被的生长发育。

3.2 NDVI 与 TDS 含量的关系

NDVI 与 TDS 含量关系见图 3。随着 TDS 的增大,NDVI 散点分布总体呈现密度减小、高值点减少的变化特征。TDS ≤ 1.5 g/L 时,散点密集,NDVI 高值点密度大,植被生长发育最好;1.5 g/L < TDS ≤ 5 g/L 时,散点较密集但 NDVI 高值点密度显著减少,植被生长较好;5 g/L < TDS ≤ 7.5 g/L 时,散点稀疏,NDVI 高值点急剧减少,植被生长较差;TDS > 7.5 g/L 时,散点极少、NDVI 值均在 0.35 以下,植被生长发育差。

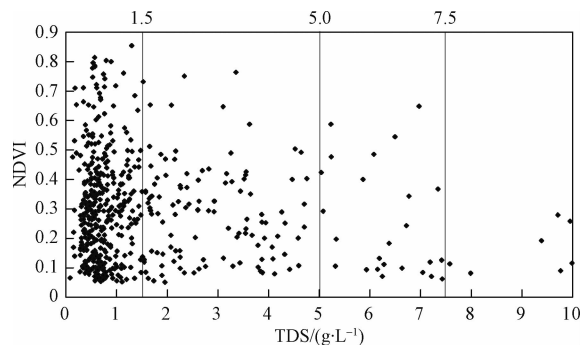


图 3 柴达木典型平原区潜水 TDS 与植被指数的关系图

Fig. 3 Diagram of NDVI and groundwater TDS in the typical plain area in the Qaidam Basin

3.3 讨论

研究区块 NDVI 值高低对应的水位埋深区间既有相同之处也有显著差异,反映各块区植被既受共同因素的作用,也受到了不同因素的影响。从 NDVI 均值的绝对值看,乌图美仁最高,其次是德令哈、格尔木、乌兰,最低是诺木洪-宗加。对照研究区的自然条件,乌图美仁平原降水少,但有柴达木盆地第一大河那棱格勒河提供地表和地下水源;德令哈平原降水相对较多,同时柴达木盆地第四大河巴音河提供地表和地下水源,另外较大规模的农业种植与城乡绿化;格尔木平原降水少,但柴达木盆地第二大河格尔木河提供地表和地下水源,另外也有较大规模的农业种植与城乡绿化;乌兰平原降水量最大,河流较小,但农业种植与城乡绿化面积占比高;诺木洪-宗加平原降水少,河流规模小,农业种植与城乡绿化面积占比低。由此可见,研究区生态植被受河流规模与大小、降水量和人类活动共

同影响,其中河流大小与规模占主导,其次是降水量大小,农业种植与城乡绿化规模。其中河流大小与规模实际反映了河流对地表水和地下水以及对绿洲、湿地植物种群与植被群落的控制。对此,结合研究区主要植物种群的适生环境与植被群落结构特征、地下水位与 TDS,以及人工植被规模,以不利于植物生长的 1.1 m 水位埋深为界分区段做进一步分析研究。

(1) 1.1 m 以浅的区段,NDVI 均值在水位埋深 0.3、0.4、0.8、0.9 m 处出现峰值,在 ±1.1 m 出现谷值。该区段一般处于泉水溢出带、河道与湖滨地带,是芦苇、赖草、盐爪爪、白刺等水生、湿生植被或湿生耐盐碱植被的主要分布区。其中的泉水溢出带及其上游河道以及淡水湖的湖滨地带地下水 TDS 与土壤含盐较低,而泉水溢出带下游地带的河道盐碱滩头及咸水湖湖滨地带 TDS 与土壤含盐较高。推断 ±1.1 m 是初始盐渍化的水位埋深,峰值对应的 0.3 ~ 0.4 m 是适宜水生与湿生植被的水位埋深、0.8 ~ 0.9 m 是适宜湿生耐盐碱植被的水位埋深;峰值不连续出现的 NDVI 均值洼地是受到了地下水 TDS 含量高的影响,植被生长受到抑制所致。

(2) 1.1 ~ 10 m 的区段,基本处于河道两岸的高漫滩、盐渍化阶地与冲湖积平原,是芦苇、盐爪爪、芨芨草、罗布麻、膜果麻黄、白刺、红柳、怪柳、沙蒿等湿生耐盐、中生、旱生植被,以及人工植被的主要分布区。该区段 NDVI 均值在水位埋深 1.4 ~ 3.5 m 时较高,说明是耐盐、中生及早生植被生长适宜的水位埋深区间。此区间内各块区 NDVI 均值峰、谷对应的水位埋深有所不同,大致与其植被群落结构差异相匹配。同时该区段 NDVI 均值在格尔木、德令哈水位埋深 3 m 以深区段存在显著的跳跃变化,在乌兰存在宽泛的高值区,明显受到了农业种植与城乡绿化的影响。为此,通过忽视跳跃点考察总体变化趋势来消除这种干扰,将曲线由大致平稳向急剧下降转变的拐点水位埋深作为天然植被的地下水位阈值。结果显示:诺木洪-宗加地区 NDVI 均值变化的拐点出现在 3.5 m;格尔木和德令哈地区 NDVI 均值变化的拐点水位埋深为 5.3 m;乌兰地区 NDVI 均值在 5.3 m 也有反应,呈现由高值向稳态跌落。这些反映出区内生态植被能够获取 5.3 m 以浅深度的地下水。对照区内大量分布着的红柳、怪柳、白刺、梭梭、沙拐枣等植物最大根系深度可见,二者基本匹配。此结果与前人在陕北风沙滩地区^[3-4]、银川平原^[5]、黑河下游绿洲带^[6]、柴达木地区^[7-8]已有的相关研究结

论基本一致。故以 5.3 m 作为地下水位阈值。此限值对乌图美仁和诺木洪—宗加地区生态植被具有包容性,应用到宏观尺度决策上对维护植被生态安全是有利的。

(3)在植被依赖地下水生长的区域,TDS 含量高低影响植物的生长状况;随着 TDS 的增大,植被生长发育会逐渐受到抑制。地下水 TDS > 7.5 g/L 的区域极不适宜植被生长,几乎无植物存在。因此,认定研究区生态植被的地下水水质阈值是 TDS 为 7.5 g/L(图 3)。

4 结论

(1)柴达木盆地内部平原荒漠植被为主要特征。绿洲生态植被受河流形成的地表水、地下水,以及大气降水控制,同时也明显受到了农业种植与城乡绿化的影响。

(2)柴达木盆地平原区天然植被的地下水位阈值为 5.3 m;其对各区块具有包容性,可供水资源开发利用时控制区域地下水位的宏观决策做参考。 ± 1.1 m 是初始盐渍化的水位埋深,0.3 ~ 0.4 m、0.8 ~ 0.9 m 分别是适宜水生与湿生植被、湿生耐盐碱植被的水位埋深区间;1.4 ~ 3.5 m 是适宜耐盐植被、中生植被及旱生植被的水位埋深区间;5.3 m 是旱生植被依赖地下水的最大水位埋深,水位埋深 5.3 m 以深区域的天然植被基本与地下水无关。

(3)柴达木盆地平原区天然植被生长的地下水水质阈值是 TDS 为 7.5 g/L。TDS ≤ 1.5 g/L 适宜植被生长,1.5 < TDS ≤ 5 g/L 较适宜植被生长,5 < TDS ≤ 7.5 g/L 基本不适宜植被生长,TDS > 7.5 g/L 不适宜植被生长。

参考文献:

- [1] 党学亚,张戈,常亮,等.柴达木盆地重点地区 1:5 万水文地质调查报告[R].西安:中国地质调查局西安地质调查中心,2015. [DANG X Y, ZHANG G, CHANG L, *et al.* The hydrogeological survey report to key areas in Qaidam Basin(1:50 000)[R]. Xi'an: Xi'an Center of Geological Survey, CGS, 2015. (in Chinese)]
- [2] 王永贵,郭宏业,李健,等.柴达木盆地地下水资源及其环境问题调查评价报告[R].北京:地质出版社,2008. [WANG Y G, GUO H Y, LI J, *et al.* Investigation and evaluation of groundwater resources and its environmental problems in Qaidam Basin[R]. Beijing:Geology Press,2008. (in Chinese)]
- [3] 杨泽元,王文科,黄金廷,等.陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(8):67-74. [YANG Z Y, WANG W K, HUANG J T, *et al.* Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the Northern Shaanxi Province[J]. The Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(8): 67-74. (in Chinese)]
- [4] 张茂省,卢娜,陈劲松.陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策[J].地质通报,2008,27(8):1299-1312. [ZHANG M S, LU N, CHEN J S. Ecological effects of vegetation during groundwater exploitation in the Northern Shaanxi Energy & Chemical Industry Base[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1299-1312. (in Chinese)]
- [5] 金晓媚,万力,张幼宽,等.银川平原植被生长与地下水关系研究[J].地学前缘,2007,14(3):197-203. [JIN X M, WAN L, ZHANG Y K, *et al.* A study of the relationship between vegetation growth and groundwater in the Yin-chuan Plain[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 197-203. (in Chinese)]
- [6] 金晓媚.黑河下游额济纳绿洲荒漠植被与地下水位埋深的定量关系[J].地学前缘,2010,17(6):181-186. [JIN X M. Quantitative relationship between the desert vegetation and groundwater depth in Ejina Oasis, the Heihe River Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 181-186. (in Chinese)]
- [7] 金晓媚,夏薇,郭任宏.柴达木河都兰区植被覆盖率变化特征[J].中国沙漠,2014,34(2):603-609. [JIN X M, XIA W, GUO R H. Variation of vegetation coverage in the Dulan Area of Qaidam River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 603-609. (in Chinese)]
- [8] 金晓媚,刘金韬,夏薇.柴达木盆地乌图美仁地区植被覆盖率变化及其与地下水的关系[J].地学前缘,2014,21(4):100-106. [JIN X M, LIU J T, XIA W. Variation of vegetation coverage and its relationship with groundwater in Wutumeiren Area of Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 100-106. (in Chinese)]
- [9] 陈志人,张维样.柴达木盆地生态系统的特征及其控制机理[J].旱区资源与环境,1987,1(2):115-122. [CHEN Z R, ZHANG W Y. The characters of ecosystem in Qaidam basin and its control mechanism[J]. Journal Arid Land Resources and Environment,

- 1987,1(2):115-122. (in Chinese)]
- [10] 刘燕华. 柴达木盆地水资源合理开发利用与生态保护[M]. 北京:科学出版社,2000. [LIU Y H. Water resource reasonable exploitation and environmental protection in Qaidam Basin [M]. Beijing:Science Press,2000. (in Chinese)]
- [11] 钟泽兵,周国英,杨路存,等. 柴达木盆地几种荒漠灌丛植被的生物量分配格局[J]. 中国沙漠,2014,34(4):1042-1048. [ZHONG Z B,ZHOU G Y,YANG L C,et al. The biomass allocation patterns of desert shrub vegetation in the Qaidam Basin[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(4): 1042-1048. (in Chinese)]
- [12] 孙世洲. 青海柴达木盆地及其周围山地植被[J]. 植物生态学与地植物学学报,1989,13(3):236-249. [SUN S Z. The vegetation of Qaidam Basin and its surrounding mountains[J]. Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica, 1989, 13(3):236-249. (in Chinese)]
- [13] 铁生年,马晓芳,王宁峰. 青藏高原沙漠化地区植物特性与分布状况分析[J]. 价值工程,2015(26):163-167. [TIE S N,MA X F,WANG N F. Analysis of Plant Characteristics and Distribution Status in Desertification Area of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Value Engineering, 2015 (26): 163-167. (in Chinese)]
- [14] 周笃君,褚金鳌. 柴达木盆地的罗布麻植物资源与开发利用[J]. 青海科技,1998,5(2):47-48. [ZHOU D J,CHU J A. *Bluish dogbane* resource and its development in Qaidam Basin [J]. Qinghai Science and Technology, 1998, 5(2): 47-48. (in Chinese)]
- [15] 朱莉华,方振堃,索有瑞. 柴达木盆地白刺特点及其开发利用前景[J]. 青海科技,2005(6):12-15. [ZHU L H, FANG Z K, SUO Y R. Characteristics and development prospect of *Nitraria tangutorum* Bobr in Qaidam Basin [J]. Qinghai Science and Technology, 2005(6):12-15. (in Chinese)]
- [16] 杨国柱,张洪军,尚永成. 柴达木地区芦苇草地的保护、培育和合理利用[J]. 中国草地,1994(6):58-61. [YANG G Z, ZHANG H J, SHANG Y C. The protection, cultivation and reasonable utilization of reed grassland [J]. China Grassland, 1994(6): 58-61. (in Chinese)]
- [17] 李修仓,胡顺军,李岳坦,等. 干旱区旱生芦苇根系分布及土壤水分动态[J]. 草业学报,2008(4):97-101. [LI X C, HU S J, LI Y T, et al. Study on the root distribution and soil moisture dynamics under *Phragmites* arid regions [J]. Acta Prataculturae Sinica,2008(4):97-101. (in Chinese)]
- [18] 时永杰. 我国西部荒漠化生态环境及其治理论文集[J]. 中兽医医药杂志,2003(增刊1):139-166. [SHI Y J. The ecological environment of desertification in western China and its governance [J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2003(Sup1):139-166. (in Chinese)]
- [19] 徐海峰,郭万香,杨国柱. 赖草根系的初步测定[J]. 青海草业,1994,3(1):25-27. [XU H F, GUO W X, YANG G Z. Preliminary determination of the root system of *Leymus* [J]. Qinghai Prataculture, 1994, 3(1): 25-27. (in Chinese)]
- [20] 王文全,贾渝彬,胥丽敏,等. 毛白杨根系分布的研究[J]. 河北农业大学学报,1997,20(1):25-29. [WANG W Q, JIA Y B, XU L M, et al. Study on the root distribution of *Populus tomentosa* [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1997, 20(1):25-29. (in Chinese)]
- [21] 成向荣,黄明斌,邵明安. 沙地小叶杨和柠条细根分布与土壤水分消耗的关系[J]. 中国水土保持学报,2008,6(5):77-83. [CHENG X R, HUANG M B, SHAO M A. Relationship between fine roots distribution and soil water consumption of *Populus simonii* and *Caragana korshinskii* plantation on sandy land [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(5):77-83. (in Chinese)]
- [22] 卢娜,金晓媚. 柴达木盆地植被覆盖分布规律及影响因素[J]. 人民黄河,2015,37(1):94-98. [LU N, JIN X M. Laws of vegetation distribution and evolutionary trend and analysis of the influencing factors in Qaidam Basin [J]. Yellow River, 2015, 37(1):94-98. (in Chinese)]

编辑:张若琳