

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0092

张阳阳,陈喜,高满,等.基于元数据分析的西北干旱区生态地下水埋深及其影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):57-65. ZHANG Y Y, CHEN X, GAO M, et al. Meta-analysis of ecological depth to groundwater table and its influencing factors in arid region of northwest China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 57-65. (in Chinese)

基于元数据分析的西北干旱区生态地下水埋深及其影响因素

张阳阳^{1,2}, 陈喜^{1,2,3}, 高满^{1,2}, 刘秀强^{1,2}

(1. 天津大学 表层地球系统科学研究院, 天津 300072; 2. 天津市环渤海关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072; 3. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要:综合现有文献研究成果,基于元数据分析方法研究不同植被的适宜、极限生态地下水埋深。选择乔木、灌木和草本等3种植被类型中的13种植物,分析适宜、极限生态地下水埋深的统计分布、生物多样性和丰富度指数,推求生态地下水埋深与植物根系和土壤质地的关系,得出:西北地区适宜和极限生态地下水埋深均值分别为2.9、5.5 m,控制范围分别为2.3~3.9、4.0~7.2 m;适宜、极限生态地下水埋深与植物根系具有显著的相关关系,适宜生态地下水埋深还取决于植物根系伸展速率与地下水埋深下降速率的相对关系;土壤质地控制毛细管上升高度及地下水埋深以上水分供给能力,是确定生态地下水埋深的重要因子。

关键词:生态地下水埋深;根系深度;土壤质地;西北干旱区;元数据分析

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Meta-analysis of ecological depth to groundwater table and its influencing factors in arid region of northwest China

ZHANG Yangyang^{1,2}, CHEN Xi^{1,2,3}, GAO Man^{1,2}, LIU Xiuqiang^{1,2}

(1. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Science and Sustainable Development of Bohai Rim, Tianjin 300072, China;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A meta-analysis was conducted based on the existing literature dataset. The dataset includes thirteen kinds of plants and three types of vegetations (arbor, shrub, herbal). We identified the relationship between groundwater table depth and species diversity, species richness, and root depth with soil texture. The results showed that: the ecological depth to the groundwater table is quietly the same in different methods; the suitable ecological depth to the groundwater table is 2.9 m, and the intimidating ecological depth to the groundwater table is 5.5 m, respectively, while the fluctuation range is 2.3~3.9, 4.0~7.2 m; the suitable and intimidated ecological depth to groundwater table both have a typical correlation with root depth; based on current research, the relationship between the rate of root growth and decline of groundwater table depth determines the status of plant growth. The soil texture control capillary rise and groundwater supply capacity, which is an important factor of ecological depth to the groundwater table.

收稿日期:2019-09-28 修回日期:2019-11-25 网络出版时间:2019-12-12
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191212.1112.002.html>
基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0406101)
作者简介:张阳阳(1995—),女,河南周口人,主要从事生态水文学研究。E-mail: yangyangzhang@tju.edu.cn
通信作者:陈喜(1964—),男,江苏淮安人,教授,博士,主要从事地下水及水文数值模拟研究。E-mail: xi_chen@tju.edu.cn

Key words: ecological depth to groundwater table; root depth; soil texture; arid region in northwest of China; meta-analysis

干旱地区降水量少、蒸发强烈,地下水是维系植物生长的关键水源^[1]。近年来人类过量开采地下水,造成地下水位下降,引发植被退化和荒漠化问题愈发严重^[2]。研究干旱区维持植物生长的地下水位(埋深)的临界值,对干旱区生态环境修复和水资源可持续利用具有重要意义^[3-4]。

植物与地下水位变化依存关系见图 1,地下水位埋深过大或者过小,对植物的生长都不利。地下水位埋深过大,毛管水断裂,植物根系不能吸收足够的水分,植被生长受到抑制;地下水位埋深过小,在强烈蒸发作用下,地下水中的盐分随毛管上升水运移到土壤表层,使土壤发生盐渍化,进而抑制植被生长^[5]。适宜生态地下水位埋深指毛管上升水达到可供植物根系吸收利用的高度,满足植物正常生长所需水分,且不会引起盐渍化;极限生态地下水位埋深指毛管上升水不能被植物吸收利用,植物生长受到抑制的临界值。

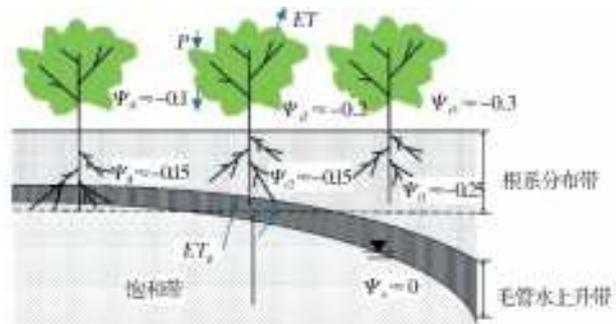


图 1 植物利用地下水概化图^[17]

Fig. 1 General map of groundwater utilization by plants

生态地下水位埋深的确定有多种方法,包括直接测定方法^[6]、遥感解译法^[7]、同位素分析法^[8]、水文模型法^[9]等。直接测定法和遥感解译法通过测定植物外在生长特征(植被根系、生物量、覆盖度等)对地下水位埋深响应解析二者之间的关系;同位素分析法和水文模型法定量分析植物蒸腾量、水分来源及其与地下水位埋深之间的关系,解析地下水位变化对植被的影响程度。已有成果大都在特定条件和地点,采用特定方法针对某些植物和植被类型进行观测分析,得出的生态地下水位埋深差异较大^[14-16]。如:在额济纳流域,根据实验站详细的植被根系、地下水位埋深、土壤含水率等监测数据,利用相关分析和水平衡计算,得出维持植物良好生长的生态地下水位埋深为 2.0~4.0 m、极限地下水位埋深为 3.5~

4.0 m^[13];而根据遥感解译的 NDVI 与实测地下水位埋深关系,得出该流域适宜生态地下水位埋深为 2.0~5.0 m、极限生态地下水位埋深为 5.5 m^[14]。在塔里木河下游,利用间歇性输水期间遥感 NDVI 数据与实测地下水位进行分析,得出维持乔木和灌木生长的地下水位埋深小于 7.0 m,满足草本植物生长的地下水位埋深小于 6.0 m^[15];而根据塔里木河下游 19 种植物样方调查、地下水位观测,采用物种丰富度和生物多样性指数分析方法得出的适宜生态地下水位埋深为 4.0~6.0 m,极限生态地下水位埋深为 6 m^[16]。在整个西北干旱区,不同学者得出的适宜和极限生态地下水位埋深也存在差异:张丽等^[17]通过建立植物生长与地下水位之间的对数正态分布模型,提出适宜生态地下水位埋深应保持在 2.0~4.0 m; Zhang 等^[18]指出西北地区地下水位埋深在 3.0~5.0 m 才能使植被保持良好的生长。Fan 等^[19]提出适宜生态地下水位埋深在温带荒漠区为 1.5~4.0 m,暖温带荒漠区为 2.0~4.5 m。

在此基础上对不同植物类型生态地下水位埋深的综合分析和系统总结很有必要。元数据分析(meta-analysis)是对相关文献中的统计指标进行再分析,寻求一个综合结论^[22]。基于文献检索数据的元数据分析方法,综合阐述干旱区不同植物和植被类型的适宜、极限生态地下水位埋深分布特征及其控制因子,为生态修复和地下水资源管理提供科学依据。

1 数据收集与分析方法

1.1 数据来源

针对西北干旱区(包括内蒙古、新疆、青海、甘肃、陕西和宁夏),从中国知网(CNKI)和科学引文索引(Science Citation Index)数据库中检索目标文献,以“生态水位(ecological water table and/or depth)”“地下水位埋深(depth to groundwater table)”“河岸带植被(riparian plant)”“地下水依赖型生态系统(groundwater dependent ecosystems)”“西北干旱区(arid region in northwest of China)”“根系深度(root depth)”作为关键词,收集发表论文中有关植被类型、根系深度、适宜和极限地下水位(埋深)的文献,并摘录相关数据。

收集文献 45 篇,涉及植物 26 种,隶属于乔木、灌木和草本植被,见图 2。摘录的不同植物数据量

差异较大,为保证数据的代表性和合理性,剔除数据量小于3以及根系深度、适宜和极限生态地下水埋深等欠缺的植物类型,选取13种植物(图2中字体加黑的植物)为本次研究的典型植物,其中胡杨、怪柳和芦苇属于傍生在河、湖周围的岸生植物。



图2 西北干旱地区3种植被类型和主要植物类型
Fig.2 Main species and types of plants in northwest China

文献摘录的根系深度、适宜和极限生态地下水埋深数据往往是某一变化范围,为保证此类数据的可用性,取变化范围的最小值、最大值、平均值进行分析。此外收集土壤特性数据,并按照美国农业部土壤特性划分标准进行分类,文献中大部分研究区土壤以砂土和砂壤土为主,其中又以砂土为多数。最终得到植物适宜生态地下水埋深数据298个、极限生态地下水埋深数据260个、根系数据171个、土壤类型数据58个。

1.2 分析方法

1.2.1 生态地下水埋深确定方法

直接统计法:基于摘录的数据,统计13种植物的适宜和极限生态地下水埋深,计算其平均值、变化范围。根据划分的植被类型(乔木、灌木和草本),统计每一类型植被适宜、极限生态地下水埋深平均值及变化范围。

物种多样性和丰富度指数法:采用香农-维纳多样性指数和辛普森多样性指数^[23-24]

$$A_i = \frac{a_i}{A} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

$$SW = -\sum A_i \times \log_2 A_i \quad (2)$$

$$S = 1 - \sum_{i=1}^m A_i^2 \quad (3)$$

式中: a_i 、 A 分别为群落中*i*植物类型的物种数量和

所有种类的总数量; A_i 为*i*植被类型中物种数量数占群落植物种类总数的比例; SW 为香农-维纳多样性指数; S 为辛普森多样性指数。

分析不同地下水埋深下多样性指数 SW 、 S 变化,选择 SW 、 S 最大值对应的地下水埋深作为适宜生态地下水埋深。

1.2.2 生态地下水埋深影响因素分析方法

图1中植物根系所能利用的水分取决于植物内在生理结构(根系深度(R_d))、外在影响要素(土壤质地、地下水埋深(G_d)),其中土壤质地决定地下水面上毛细管水上升高度。

首先,根据元数据点绘13种典型植物根系深度 R_d 均值与适宜(G_{ds})、极限(G_{di})生态地下水埋深均值相关图,采用*t*检验方法,分析在显著性水平 $p=0.05$ 条件下 R_d 与 G_{ds} 、 G_{di} 均值之间的相关性,求出 R_d 与 G_{ds} 、 G_{di} 的函数关系。

其次,根据土壤类型,依据樊自立等^[25]提出的适宜、极限生态地下水埋深下根系含水量应分别保持在70%和65%~70%田间持水量(θ_f)以上,设定土壤含水量分别达到 θ_f 、67.5% θ_f 时,推求对应的适宜、极限生态地下水埋深。

在稳态条件下,采用B-C模型^[26](brook-corey model)分析土壤含水率(θ_f 、67.5% θ_f)及其相应的地下水埋深间关系为

$$h = \begin{cases} h_b \left(\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{-\lambda} & \theta(h) < \theta_s \\ h_b & \theta(h) = \theta_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ_r 、 θ_s 分别为残余含水率、饱和含水率; h_b 为进气吸力(土壤从饱和状态脱水,当空气开始进入土壤孔隙时对应的临界吸力值); λ 为与土壤特性相关的形状系数; $\theta(h)$ 为吸力为*h*时的土壤含水率。根据式(4),计算 θ_f 、67.5% θ_f 下相应的 h_f 、 $h_{67.5\%}$,则推求的适宜和极限生态地下水埋深分别为: $G_{ds1} = h_f + R_d$ 、 $G_{di1} = h_{67.5\%} + R_d$ 。

2 分析结果

2.1 典型植物(植被)生态地下水埋深

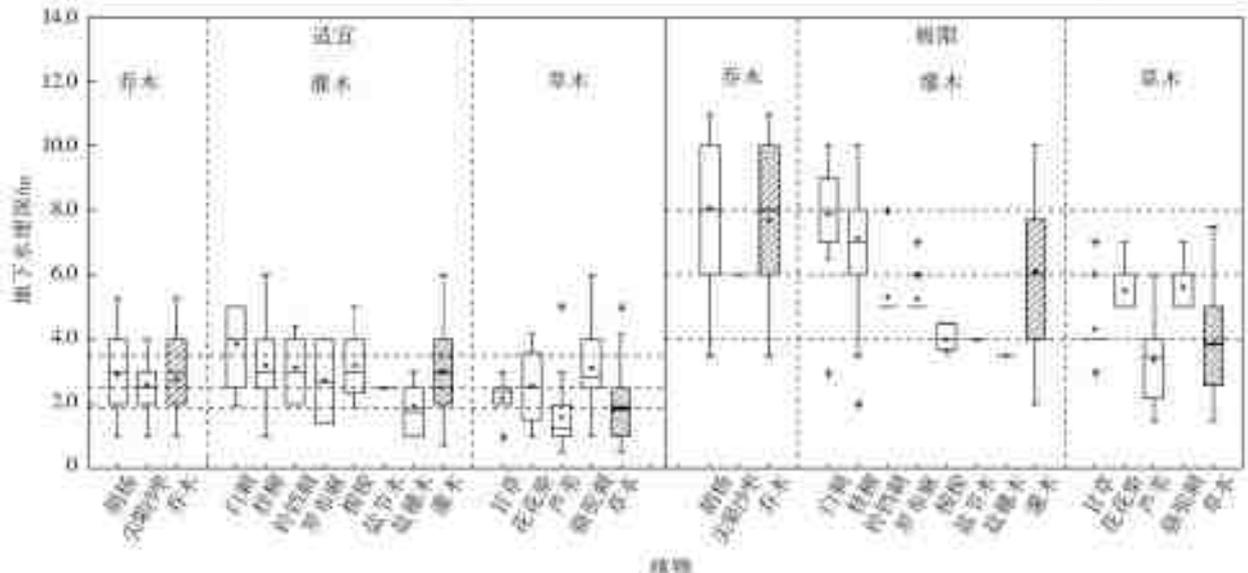
13种植物及3种植被类型适宜(G_{ds})、极限(G_{di})生态地下水埋深分布见图3。 G_{ds} 的25%分位数、中位数、75%分位数平均值分别为1.9、2.5、3.5 m, G_{di} 的对应值分别为4.0、6.0、8.0 m(图3中虚线),整体而言 G_{ds} 、 G_{di} 范围分别为1.9~3.5、4.0~8.0 m。

从植被类型角度,乔木、灌木和草本 G_{ds} 平均值

分别为 2.8、3.0、1.9 m, 25%~75%分位数范围乔木、灌木为 2.0~4.0 m, 草本为 1.0~2.3 m。乔木、灌木和草本 G_{ds} 平均值分别为 7.7、6.0、3.8 m, 25%~75%分位数范围分别为 6.0~10.0、4.0~7.0 m、2.5~4.5 m。乔木和灌木的 G_{ds} 差异不大, 草本对缺水环境的忍耐力小于乔木和灌木^[27]。

从物种角度, 水生植物芦苇常生长在地下水埋深浅的位置, G_{ds} 、 G_{di} 均值最小, 分别为 1.6、3.4 m。白刺沙包对干旱环境的忍耐力强^[28], G_{ds} 均值最大为 3.9 m, G_{di} 均值为 7.9 m, 与胡杨接近。 G_{ds} 、 G_{di} 以及两者之间差值大小, 反映其对地下水利用的灵活性^[29]。从 25%~75%分位数变化范围来看, 岸生植

物胡杨、柽柳、芦苇 G_{ds} 、 G_{di} 变化范围大, 25%~75%分位数变化范围分别达 2 m 和 4 m, G_{ds} 、 G_{di} 均值差大于 4 m, 表明岸生植物对水利用的灵活性高于其他植物。其中: 胡杨在地下水位埋深大时, 主根吸收深部地下水维持生长^[30]; 柽柳和芦苇在水源充沛时利用浅埋深地下水, 缺水时柽柳可利用埋深 6.0 m 以下地下水^[31]。耐旱性强的白刺 G_{ds} 、 G_{di} 变幅以及两者之间差值也大, 白刺沙包具有发达的侧根和向下延伸的主根, 对水的利用也表现出较高灵活性, 在降水量多的地区利用浅层土壤水, 在降水量少的地区利用深部地下水^[32]。骆驼刺 G_{ds} 、 G_{di} 均值大于其他草本植物。



注: 图中横虚线分别为不同植物 25%、50%、75%分位数平均值。

图 3 典型植物生态地下水埋深分布箱型

Fig. 3 Box-plot of ecological depth to water table for typical species and types of plants

根据式(1)~(3)计算物种多样性和丰富度随地下水埋深的变化。物种数量及种类随地下水埋深变化可分为 5 个阶段, 见图 4: (1) 地下水埋深 0.5~1.2 m, 以 1 年生草本以及多年生草本中水生植物(如芦苇)为主。(2) 地下水埋深由 1.2 m 增至 2.2 m, 灌木种类增加, 乔木种类基本不变, 草本植物

种类(如芦苇、甘草)略有减少。(3) 地下水埋深由 2.2 m 增至 3.0 m, 灌木种类迅速增加, 且大于草本种类。(4) 地下水埋深由 3.0 m 增至 4.2 m, 多为灌木种类植被, 且受地下水埋深变化影响极小, 但草本植物迅速减少, 仅有耐旱的骆驼刺、花柴存在。(5) 地下水埋深大于 4.2 m, 3 种植物种类数量迅速减少。

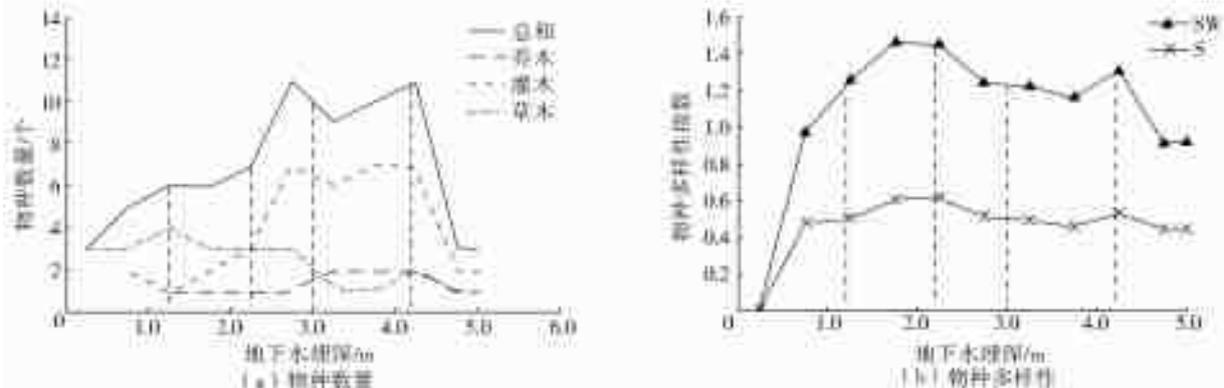


图 4 物种数量和物种多样性随地下水埋深变化

Fig. 4 Species number and diversity under different depths to groundwater table

水位下降速率,植物用水不受限制;处于极限生态地下水埋深时, $\Delta y/\Delta x > 1.0$, 说明植物根系伸展速率慢于地下水埋深速率,植物生长受到抑制。

2.2.2 根据土壤质地及根系深度推求结果

西北荒漠植被多处于流域下游或中下游,土壤多为风砂土^[36],不同流域和土壤沉积深度粉粒含量存在差异,主要为砂壤土和轻壤土。表 1 中依据文献中植物和土壤类型,以及对应的 B-C 模型参数值^[37],采用 1.2.2 节方法计算适宜和极限生态地下水埋深(G_{ds1} 、 G_{di1}),并与上述统计的适宜和极限生态地下水埋深(G_{ds} 、 G_{di})进行比较。结果表明, G_{ds} 与 G_{ds1} 之间差异在轻壤土中最大、砂壤土中次

之、风砂土中最小。

如图 7 所示: G_{ds1} 分布范围为 2.3~4.1 m,平均值为 3.3 m; G_{di1} 25%~75%分位数范围为 3.6~8.1 m,平均值为 5.2 m。乔木、灌木和草本 G_{ds1} 平均值分别为 4.0、3.2、2.4 m,25%~75%分位数范围分别为 3.3~4.2、2.3~4.0、1.7~3.1 m。乔木、灌木和草本 G_{di1} 平均值分别为 6.5、5.0、3.8 m,分布范围分别为 6.1~7.0、3.4~5.3、3.3~5.0 m。采用单因素方差分析方法分别将 G_{ds1} 与 G_{ds} 、 G_{di1} 与 G_{di} 进行差异性检验,得到 p 值分别为 0.16、0.67,均大于 0.05,说明 G_{ds1} 、 G_{di1} 值与统计的 G_{ds} 、 G_{di} 值无显著差异,见图 8。

表 1 典型植物及植被类型的根深和生态地下水埋深
Tab. 1 Ecological depth to groundwater table for typical vegetation species and types

植被类型	植物	土壤类型	h_b/m	λ	f	h_l/m	$h_{f67.5\%/m}$	R_d/m	G_{ds1}/m	G_{di1}/m	G_{ds}/m	G_{di}/m
乔木	胡杨	风砂土、砂壤土	0.08	0.53	0.11	1.3	3.8	3.0±1.3	4.3±1.3	6.8±1.3	2.8±1.2	8.1±2.1
	尖果沙枣	风砂土	0.07	0.59	0.09	1.1	2.7	1.7±1.2	2.8±1.2	4.4±1.2	2.6±1.0	6.0±0
灌木	白刺	风砂土、砂壤土	0.08	0.53	0.11	1.3	3.8	3.3±0.4	4.6±0.4	7.1±0.4	3.9±1.2	7.9±1.6
	怪柳	砂壤土、轻壤土	0.12	0.77	0.17	0.4	0.9	2.6±1.2	3.0±1.2	3.5±1.2	3.2±1.3	7.1±2.0
	铃铛刺	风砂土	0.07	0.59	0.09	1.1	2.7	2.0±0.8	3.1±0.8	4.7±0.8	3.1±0.9	5.3±1.0
	罗布麻	风砂土	0.07	0.59	0.09	1.1	2.7	2.4±0.5	3.5±0.5	5.1±0.5	2.7±1.0	5.3±0.7
	梭梭	轻壤土	0.15	0.32	0.21	1.4	7.2	2.4±1.3	3.8±1.3	9.6±1.3	3.2±1.0	4.0±0.4
	盐节木	风砂土	0.07	0.59	0.09	1.1	2.7	1.5±0.5	2.6±0.5	4.2±0.5	2.5±0	4.0±0
	盐穗木	风砂土、轻壤土	0.11	0.46	0.20	0.5	1.6	1.2±0.4	1.7±0.4	3.8±0.4	1.9±0.8	3.5±0
草本	甘草	风砂土	0.07	0.59	0.09	1.1	2.7	1.6±0.5	2.7±0.5	4.3±0.5	2.2±0.7	4.3±1.0
	花花柴	风砂土	0.07	0.59	0.09	1.1	2.7	2.9±0.2	4.0±0.2	5.6±0.2	2.5±1.4	5.5±1.0
	芦苇	风砂土、轻壤土	0.11	0.46	0.20	0.5	1.6	1.2±0.7	1.7±0.7	2.8±0.7	1.6±1.0	3.4±1.2
	骆驼刺	轻壤土	0.15	0.32	0.21	1.4	7.2	4.0±0	5.4±0	11.2±0	3.1±1.6	5.6±0.9

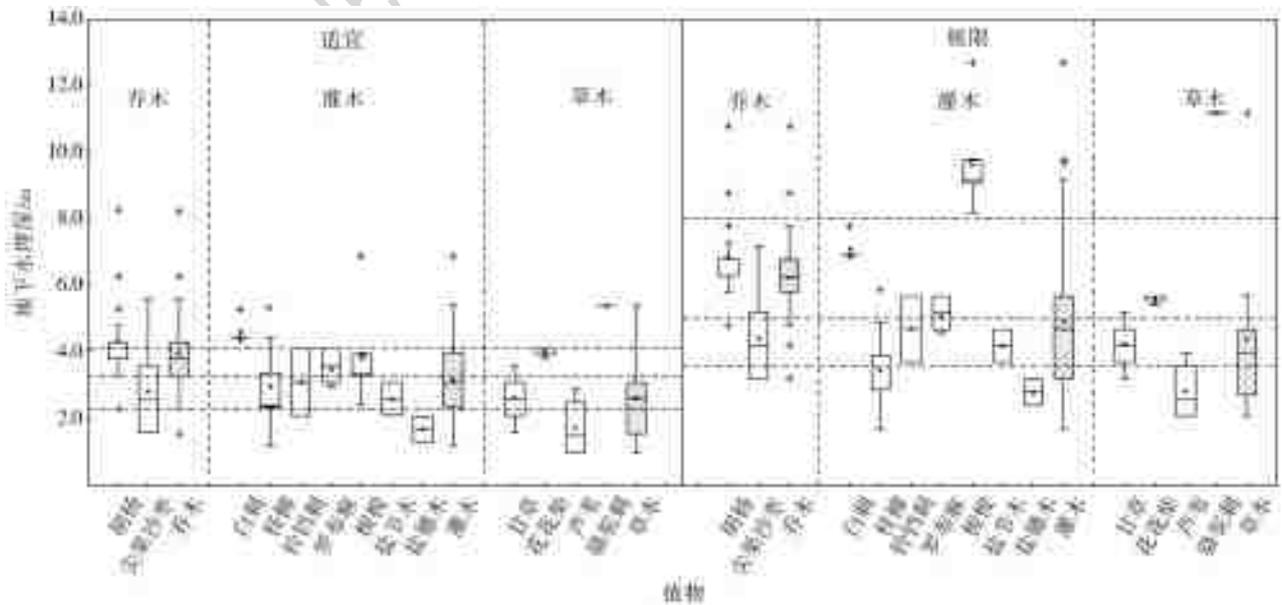


图 7 根系深度和适宜含水率推求的生态地下水埋深

Fig. 7 Ecological depth to groundwater table estimated by root depth and critical soil moisture

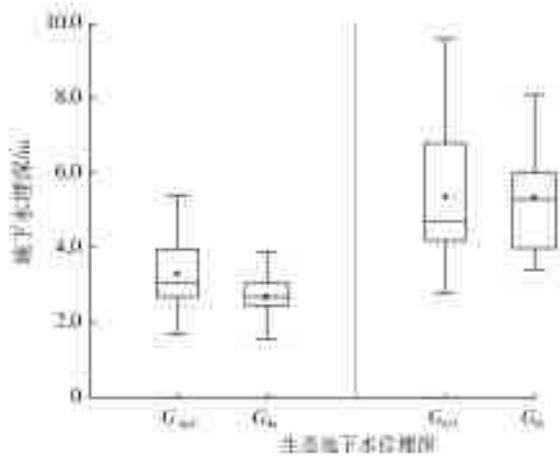


图8 根系深度和适宜含水率推求的生态地下水埋深与统计方法推求结果比较

Fig. 8 Comparison of ecological depth to groundwater table between estimates based on root depth and critical soil moisture and statistical results

2.3 不同方法结果对比

按植物种类和植被类型不同分析方法所得的

生态地下水埋深分布见表2。根据3种植被类型和各种植物种类推求的适宜生态地下水埋深的平均值接近,但前者变化范围的下限大,说明仅根据植被类型推求的生态地下水埋深均化了不同植物种类对地下水埋深变化的适应性。物种数量和生物多样性方法考虑不同植物对地下水埋深变化的响应,确定的适宜生态地下水埋深变化范围大。不同方法各有优缺点,元数据直接统计方法简单,但需要众多观测资料;依据根系深度和土壤质地推求适宜生态地下水埋深方法,考虑了适宜、极限生态地下水埋深的物理成因,但需确定植被生长的适宜水分条件;生物多样性角度确定生态地下水埋深的方法直观,但需要可靠的植被状态遥感解译和地下水埋深资料。因此,实际应用中应根据资料条件选择合适的方法推求适宜和极限生态地下水埋深。平均来看,适宜和极限生态地下水埋深均值分别为2.9、5.5 m,控制范围分别为2.3~3.9、4.0~7.2 m。

表2 不同分析方法下生态地下水埋深

Tab. 2 Ecological depth to groundwater table from different methods

单位:m

分析方法		适宜生态地下水埋深		极限生态地下水埋深	
		变化范围	平均值	变化范围	平均值
元数据直接统计	各种植物	1.9~3.5	2.5	4.0~8.0	6.0
	3种植被	2.5~3.9	2.7	4.0~6.0	5.4
根系深度和土壤质地推求	各种植物	2.3~4.1	3.3	3.6~8.1	5.2
	3种植被	2.7~3.8	3.2	4.2~6.8	5.4
物种数量、物种多样性		1.9~4.2		>4.2	
平均		2.3~3.9	2.9	4.0~7.2	5.5

3 结论

以中国西北地区的典型植物和植被类型为研究对象,采用元数据分析方法,系统分析了西北干旱区适宜、极限生态地下水埋深的分布特征及其控制因素,得出如下结论。

(1)从乔木、灌木和草本等3种植被类型中13种植物适宜、极限生态地下水埋深的3种分析方法(直接统计、根据生物多样性和丰富度指数以及植物根系和土壤质地推求)结果来看,西北地区适宜和极限生态地下水埋深均值分别为2.9、5.5 m。

(2)地下水埋深逐渐增大,首先对浅根系的草本植物生长产生胁迫,其次为深根系的灌木和乔木。维持西北地区生物多样性,地下水埋深应控制在适宜的变化范围,适宜和极限生态地下水埋深控制范围分别为2.3~3.9、4.0~7.2 m。

(3)适宜、极限生态地下水埋深与植物根深相

关性以及推求的根系伸展速率随地下水埋深下降速率变化表明,植被生长状况与地下水埋深变化速率有依存关系,因此,地下水开采管理不仅要控制地下水水位或埋深,而且要控制其下降速率。

参考文献:

- [1] EAMUS D, ZOLFAGHAR S, VILLALOBOS-VEGA R, et al. Groundwater-dependent ecosystems: recent insights from satellite and field-based studies[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(10): 4229-4256. DOI:10.5194/hess-19-4229-2015.
- [2] SCANLON B R, KEESE K E, FLINT A L, et al. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(15): 3335-3370. DOI:10.1002/hyp.6335.
- [3] HILLERISLAMBERS R, RIETKERK M, VAN DEN BOSCH F, et al. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems[J]. Ecology, 2001, 82(1): 50-61.

- DOI:10.1890/0012-9658(2001)082[0050:VPFISA] 2.0.CO;2.
- [4] CHEN Y, CHEN Y, XU C, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater dynamics and riparian vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2): 170-177. DOI:10.1002/hyp.7429.
- [5] 张雪妮, 吕光辉, 王庭权, 等. 荒漠区垂直河岸带植物多样性格局及其成因[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 5966-5974. DOI:10.5846/stxb201401160128.
- [6] COOPER D J, SANDERSON J S, STANNARD D I, et al. Effects of long-term water table drawdown on evapotranspiration and vegetation in an arid region phreatophyte community[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 325(1-4): 21-34. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.09.035.
- [7] 李小玉, 宋冬梅, 肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异[J]. *地理学报*, 2005, 60(2): 319-327.
- [8] SONG L, ZHU J, LI M, et al. Sources of water used by *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees based on stable isotope measurements in a semiarid sandy region of northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016(164): 281-290. DOI:10.1016/j.agwat.2015.10.018.
- [9] LAIO F, TAMEA S, RIDOLFI L, et al. Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 1. Stochastic water table dynamics[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(5). DOI:10.1029/2008WR007292.
- [10] 常兆丰, 汪杰, 王耀琳, 等. 民勤绿洲边缘植被恢复与重建初探[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(2): 171-175. DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2006.02.033.
- [11] ORELLANA F, VERMA P, LOHEIDE S P, et al. Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater-dependent ecosystems: groundwater-dependent ecosystems[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(3): 1-24.
- [12] SNYDER K. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105(1-3): 227-240. DOI:10.1016/S0168-1923(00)00193-3.
- [13] FENG Q, PENG J, LI J, et al. Using the concept of ecological groundwater level to evaluate shallow groundwater resources in hyperarid desert regions: Using the concept of ecological groundwater level to evaluate shallow groundwater resources in hyperarid desert regions[J]. *Journal of Arid Land*, 2012, 4(4): 378-389. DOI:10.3724/SP.J.1227.2012.00378.
- [14] JIN X M, SCHAEPMAN M E, CLEVERS J G P W, et al. Groundwater table depth and vegetation in the Ejina area, China[J]. *Arid Land Research and Management*, 2011, 25(2): 194-199. DOI:10.1080/15324982.2011.554953.
- [15] 古力米热·哈那提, 王光焰, 张音, 等. 干旱区间歇性生态输水对地下水位与植被的影响机理研究[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 726-733. DOI:10.12118/j.issn.1000-6060.2018.04.07.
- [16] HAO X M, CHEN Y N, LI W H. Indicating appropriate groundwater tables for desert river-bank forest at the Tarim River, Xinjiang, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 152(1-4): 167-177. DOI:10.1007/s10661-008-0305-7.
- [17] 张丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(1): 112-115.
- [18] ZHANG X, GUAN T, ZHOU J, et al. Groundwater table depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert riparian ecosystem in an arid area of China[J]. *Forests*, 2018, 9(1): 34. DOI:10.3390/f9010034.
- [19] FAN Y. Groundwater in the Earth's critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes: Groundwater at large scales[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3052-3069. DOI:10.1002/2015WR017037.
- [20] WANG Y, CHEN M, YAN L, et al. Critical depth of groundwater recharge for vegetation in semi-arid areas[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 237: 032091. DOI:10.1088/1755-1315/237/1/032091.
- [21] 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.
- [22] EVARISTO J, MCDONNELL J J. Prevalence and magnitude of groundwater use by vegetation: A global stable isotope meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12. DOI:10.1038/srep44110.
- [23] 古丽努尔·沙布尔哈孜, 尹林克, 严成. 塔里木河下游人工胡杨林生态恢复过程的初步研究[J]. *干旱区地理*, 2004, 27(3): 384-387. DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2004.03.020.
- [24] CHEN Y, LI W, XU C, et al. Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin[J]. *Environmental Earth Sciences*,

- 2015, 73 (2): 547-558. DOI: 10. 1007 /s12665-013-3002-y.
- [25] 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, 27(1): 8-13. DOI:10. 13826 /j. cnki. cn65-1103 /x. 2004. 01. 002.
- [26] 韩祥伟,邵明安,王全九. 简单入渗法在确定 Brooks-Corey 水分特征曲线模型参数中的应用研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):506-508.
- [27] 满苏尔·沙比提,胡江玲. 新疆渭干河-库车河三角洲绿洲地下水特征对天然植被的影响分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2):422-428.
- [28] 李新乐,吴波,张建平,等. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(15):1-8. DOI:10. 5846 /stxb201808121721.
- [29] LOHEIDE S P, GORELICK S M. Riparian hydroecology: A coupled model of the observed interactions between groundwater flow and meadow vegetation patterning; Meadow vegetation patterning[J]. Water Resources Research, 2007, 43(7):931-936. DOI:10. 1029 /2006WR005233.
- [30] SI J, FENG Q, CAO S, et al. Water use sources of desert riparian *Populus euphratica* forests[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(9): 5469-5477. DOI:10. 1007 /s10661-014-3796-4.
- [31] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等. 新疆塔里木河下游怪柳、芦苇对生态输水的响应[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 595-601.
- [32] 赵鹏,徐先英,纪永福,等. 民勤绿洲边缘不同演替阶段白刺灌丛水分利用动态[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 168-175. DOI: 10. 13448 /j. cnki. jalre. 2019. 252.
- [33] 彭守兰,曾凡江,王会提,等. 潜水埋深对疏叶骆驼刺 (*Alhagi sparsifoli*) 幼苗生长和叶片形态的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 396-404. DOI: 10. 7522 /j. issn. 1000-694X. 2013. 00331.
- [34] 陈斌,刘茂松,黄峥,等. 西北干旱区灌草型白刺-芨芨草群落根系分布与互作[J]. 生态学杂志, 2017, 36(10): 2692-2698. DOI: 10. 13292 /j. 1000-4890. 201710. 014.
- [35] 冯起,司建华,李建林,等. 胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7):765-772.
- [36] 丁菡. 我国干旱荒漠植被区土壤生态特性研究[D]. 南京:南京林业大学, 2003.
- [37] RAWLS W J, GISH T J, BRAKENSIEK D L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics[J]. Advances in Soil Science, 1991, 16:213-234.