

青藏高原高寒草甸浅层地下水位对环境因子的响应特征 ——以青海海北站为例

戴黎聪^{1,2}, 柯浔^{1,2}, 曹莹芳^{1,2}, 张法伟¹, 杜岩功¹, 李以康¹,
郭小伟¹, 李茜¹, 林丽¹, 曹广民¹

1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100039

摘要: 青藏高原水资源丰富, 浅层地下水位是水源涵养功能的重要表征, 但其对全球气候变暖的响应特征尚不清楚。基于青海海北站高寒草甸 2012—2016 年浅层地下水位自动观测连续数据, 采用优势分析方法定量评估了降水、风速、水面蒸发、50 cm 土壤温度和气温等 5 个主要环境因子对地下水的影响。结果表明, (1) 季节尺度上, 地下水位表现为双峰双谷曲线趋势, 5—8 月 (生长季) 为丰水期, 8 月达到最高值(4.25±0.13) m, 1—4 月和 9—12 月 (非生长季) 为枯水期, 5 月达到最低值(4.78±0.06) m; 年际尺度上, 地下水位总体呈逐渐下降趋势, 且在 2014 年达到最高值(4.18±0.27) m。(2) 风速是影响地下水位变化最重要的环境因子, 占总贡献的 36.8%, 其次依次是蒸发 (27.7%), 气温 (16.6%) 和 50 cm 土壤温度 (9.5%), 而降水对地下水位影响微弱, 仅占总贡献的 9.3%; 除降水外, 各环境因子与地下水位均呈显著负相关 ($P < 0.05$)。(3) 地下水位与降水的年内和年际变异规律差异较大, 降水的季节和年际变异均大于地下水位。综上, 青藏高原东北隅高寒草甸浅层地下位位的变异与降水关联较小。研究结果可为青藏高原水资源合理管理和利用提供理论依据。

关键词: 青藏高原; 高寒草甸; 地下水位; 环境因子; 优势分析

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.09.022

中图分类号: X14

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2018) 09-1750-08

引用格式: 戴黎聪, 柯浔, 曹莹芳, 张法伟, 杜岩功, 李以康, 郭小伟, 李茜, 林丽, 曹广民. 2018. 青藏高原高寒草甸浅层地下水位对环境因子的响应特征——以青海海北站为例[J]. 生态环境学报, 27(9): 1750-1757.

DAI Licong, KE Xun, CAO Yingfang, ZHANG Fawei, DU Yangong, LI Yikang, GUO Xiaowei, LI Qian, LIN Li, CAO Guangmin. 2018. The response of shallow groundwater level to environmental factors on alpine meadow in Qinghai-Tibet Plateau: a case study on Qinghai Haibei station [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(9): 1750-1757.

地下水是世界上最大的淡水储存之一, 工业用水、居民用水和农业用水分别占地下水的 27%、36% 和 42% (Döll et al., 2012)。随着全球气候变暖和人类活动的加剧, 地下水资源发生一系列改变, 气候变化主要是通过改变水文过程 (降雨过程、蒸散过程及冻土消融过程等), 从而影响地下水位的收支 (Taylor et al., 2013; Green et al., 2011)。自 20 世纪 70 年代以来, 青藏高原气候发生暖干向暖湿的转变, 降水增多, 蒸发降低, 年均气温上升, 大面积冰川消融以及多年冻土退化严重 (徐晓明等, 2017), 导致高原地下水位分布格局在时间和空间上发生变化。尽管 IPCC 第三次和第四次评估报告提出, 地下水在保证生态安全和人类水资源的供应方面发挥着不可替代的作用 (Parry et al., 2007), 但关于气候变化对地下水的影响以及未来地下水变化预测的研究仍鲜见报道。随着水资源的愈加匮

乏以及地下水污染加剧, 地下水资源逐渐成为国际研究的热点 (吴建强等, 2017)。近年来, 许多学者采用模型方法模拟气候变化对地下水的影响, 并预测未来几十年地下水位的变化, 如 ANN 模型 (Daliakopoulos et al., 2005)、SVM 模型 (Mustafa et al., 2012)、RBF 模型 (Zhang et al., 2017; Evans et al., 2018) 等, 但所取得的成效并不理想。一方面由于模型的不确定性, 且不同模型的参数不同以及时空差异, 同时, 一些模型未考虑及一些重要的气象因子参数 (如风速、蒸发等); 另一方面由于地下水的补给比地表水复杂, 不仅受气候条件和人类活动影响, 还受植被、地形等因素影响, 导致不同模型模拟结果差异巨大。因此, 有必要结合野外观测井地下水位实测数据, 进一步明晰地下水位对环境因子的响应特征。

以往研究认为, 降水是影响地下水位的主要驱

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41730752; 31770530)

作者简介: 戴黎聪 (1993 生), 男, 硕士研究生, 主要从事水文生态学研究。E-mail: 18270821151@163.com

收稿日期: 2018-05-01

动因子,且可以在降水与地下水位之间建立一个参数方程,来表征降水与地下水位之间的关系(刘瑞国等,2009;张玲等,2008;王智磊等,2011)。同时,刘瑞国等(2009)研究也发现,降雨与地下水位在年内和年际间的变化规律都具有较好的一致性,即当降雨到达最大时,地下水位也达到最高,当降雨减少时,地下水位也相应下降。还有研究表明,气温和土温是影响地下水位变化的重要驱动因子,气温和土温可以通过改变蒸散过程,从而影响地下水位的波动(Tabari et al., 2012),且气温并不是一直都影响地下水位,只是当地下水位埋深较浅时,气温对地下水位才有显著的影响,当地下水位埋深较深时,气温对地下水位影响微弱(蒲健辰等,2004;傅志敏等,2010)。过去关于环境因子对地下水的研究多集中于低海拔非冻土地区(常娟等,2015;蒲健辰等,2004),而对寒区季节性冻土区域地下水位的研究较为薄弱,这可能是受严酷的气候条件所限制。由于季节的冻融作用显著影响了寒区水文地质环境,导致冻土区域地下水位的补给及分布特征明显不同于非冻土区域(常娟等,2015)。过去研究发现,在多年冻土区域,地下水的来源主要是冰川冻土的融化和雪山融水,而降水对地下水位影响微弱(郭凤清等,2016),且气温是影响地下水位变化最重要的环境因子。气温主要通过影响土壤的冻结与消融过程,从而间接影响地下水位的收支(杨文元等,2017)。风速作为影响蒸散的主要影响因子,可能通过影响蒸散和冻土的消融过程间接影响地下水位的变化。

青藏高原作为中国冰川和冻土的重要分布区域,其地下水资源丰富(Zou et al., 2017),在保证中国和东南亚水资源安全上具有重要的战略意义(赵林等,2010)。在全球气候变暖背景下,关于环境因子对青藏高原地下水位驱动的特征以及地下水位季节和年际动态的研究十分薄弱,且过去评估环境因子对地下水位的影响多是定性分析,定量分析较少,尤其是关于风速对地下水位的定量研究更是鲜见报道。因此,有必要研究该区域的地下水资源与环境因子的相互作用及其变化,定量探讨环境因子对青藏高原地下水位的影响,确定影响地下水位的主控因子,这对于揭示气候变暖对寒区水循环的影响具有重要的意义。

本文基于青海海北站高寒草甸2012—2016年地下水位自动连续观测数据,选取风速、降水、气温、蒸发、50 cm土温等5个主要环境因子,采用优势分析方法,明晰地下水位的季节和年际动态,定量评估各气象因子对青藏高原地下水位变异的贡献,揭示影响青藏高原地下水位的主控因子,为

保障中国青藏高原水资源安全,合理管理和利用提供重要的理论依据。

1 研究区概况

青海海北站矮嵩草草甸(37°37'N, 101°19'E)地处祁连山东段北支冷龙岭南麓,大通河河谷的西北部。南北两侧分布冷龙岭与大坂山,山地平均海拔4000 m,冷龙岭主峰岗什卡海拔5254.5 m,常年积雪,且区域内分布有季节性冻土,平均最大冻土深度约为2.2 m,平均冻结时间约为8个月,该区域发育有现代冰川。站区以山间滩地和丘陵低山为主,滩地海拔3200 m。受高原大陆性气候及祁连山的影响,海北站无明显四季之分,一年只有冷暖两季,夏季湿润多雨,冬季寒冷干燥,最热月(7月)平均气温为9.8℃;最冷月(1月)平均气温为-14.8℃。年内无绝对无霜期,相对无霜期仅20 d左右。年降水量在426~860 mm之间,多年平均降水量为590.1 mm,降水集中于5—9月,占全年降水总量的80%,年际和季节降水分布不均。全年日照时间为2462.7 h,年总辐射量为 5.8556×10^5 J·cm⁻²。该区域土壤类型为草毡寒冻锥形土,自1982年以来一直被作为冬季牧场,以矮嵩草(*Kobresia humilis*)为建群种,主要优势种有异针茅(*Stipa aliena*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*),次优势种有甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)和麻花苣(*Gentiana straminea*)等(郭凤清等,2017;戴黎聪等,2018)。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

环境因子、地下水位埋深和地上生物量数据来源于青海海北站。环境因子数据包括降水(52203, RM Young, USA)、1.5 m处风速(HMP45C, Vaisala, Finland)、蒸发、气温(Molis 520, Vaisala, Finland)和50 cm土壤温度(Hydra Probe II, Stevens, USA),其中,降水、风速、气温和50 cm土壤温度数据采集频率均为30 min,蒸发数据是通过小型标准蒸发器观测获得的每日数据;计算2012—2016年各环境因子每月平均值。地下水位埋深数据由LTC三参数电导率水位温度自动记录仪(LTC, Solinst Ltd., Canada)采集,其中一个传感器用来测定水下的压强变化,另一个用于大气压补偿,采集频率为30 min;地下水位埋深是浅层地下水位埋深(即2.6~6 m),下层为砂砾层,文中地下水位埋深表征地下水位的的高低,即地下水位埋深越深,表示地下水位越浅。地上生物量于2014—2015年每年生长季(5—9月)采集,采集方法为标准收获法,样方面积为50 cm×50 cm,重复10次,取其平均值。

2.2 分析方法

鉴于各环境因子之间存在显著共线性及交互

作用(表1),一般的多元线性回归已不适用,故采用R(3.3.1)中yhat和MBESS包中的优势分析(dominance analysis)方法(Budescu, 1993),定量估测5个气象因子(降水、气温、蒸发、50 cm土壤温度、风速)对地下水的影响,其基本原理是对自变量进行排秩和对各自变量相对重要性进行定量估算,基本思想为:假设有一对随机变量 x_i 和 x_j , x_h 表示 $p-2$ 个变量的任何一个子集(排除 x_j, x_h),当添加到 2^{p-2} 子模型的贡献增量大于 x_j 时的贡献增量时,则变量 x_i 优于 x_j ,即变量 x_i 的相对重要性高于 x_j 。与传统方法相比,优势分析方法平均了变量的直接效应、偏效应和总体效应,最大优势是在全面比较所有可能的子模型条件下,计算预测变量的相对重要性,且各预测变量的总平均贡献之和等于方差,各气象因子对地下水位的相对重要性为各气象因子的平均贡献占总平均贡献的比例。具体计算公式如下:

表1 各个变量之间的相关系数

Table 1 The correlation coefficients among the variables

相关系数 Correlation coefficient	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
GLD	0.137	0.388*	0.548**	0.628**	0.262
X_1		0.852**	0.688**	0.376*	0.262
X_2			0.889**	0.570**	0.969**
X_3				0.705**	0.791**
X_5				0.424*	-

GLD: 地下水位埋深; X_1 : 降水; X_2 : 气温; X_3 : 蒸发; X_4 : 风速; X_5 : 50 cm 土壤温度。*表示在 0.05 水平到达显著水平, **表示在 0.01 水平达到显著水平。表 3 中各符号意义与本表相同

GLD represent groundwater level depth, X_1 represent rainfall; X_2 represent air temperature; X_3 represent evaporation; X_4 represent wind speed; X_5 represent 50 cm soil temperature. * means reach a significant level at 0.05, ** means reach a significant level at 0.01 level. The symbols in table 3 have the same meaning as this table

$$D_{x_i}^{(k)} = \sum (p_{y \cdot x_i x_h}^2 - p_{y \cdot x_h}^2) / (p-1)k \quad (1)$$

$$D_{x_i} = \sum_{k=0}^{p-1} D_{x_i}^{(k)} x_i / p \quad (2)$$

$$p_{y \cdot x_1 \dots x_p}^2 = \sum_{j=1}^p D_{x_j} \quad (3)$$

式中, $D_{x_i}^{(k)}$ 表示 x_i 添加到 k 个变量组成的所有 $(p-1)k$ 个子模型中贡献的平均增量; x_h 为不包括 x_i 的 k 个变量任何子集; D_{x_i} 为 p 个子模型的 $D_{x_i}^{(k)}$ 的平均值; $p_{y \cdot x_1 \dots x_p}^2$ 为 D_{x_i} 之和。各自变量的总平均贡献占

因变量总方差的百分比为各变量的相对重要性。

假如有 3 个随机变量 x_1, x_2, x_3 , 计算 k 个变量的每个模型中各变量的平均贡献, 再对所有模型中的这些贡献进行求平均。其中 x_1 的重要性计算如下:

$$D_{x_1}^{(0)} = p_{y \cdot x_1}^2$$

$$D_{x_1}^{(1)} = [(p_{y \cdot x_1 x_2}^2 - p_{y \cdot x_2}^2) + (p_{y \cdot x_1 x_3}^2 - p_{y \cdot x_3}^2)] / 2$$

$$D_{x_1}^{(2)} = [(p_{y \cdot x_1 x_2 x_3}^2 - p_{y \cdot x_2 x_3}^2)]$$

$$D_{x_1} = (D_{x_1}^{(0)} + D_{x_1}^{(1)} + D_{x_1}^{(2)}) / 3$$

3 结果与分析

3.1 地下水位和降水季节变化

依据观测井数据, 季节尺度上, 2012—2016 年地下水位总体呈“双峰双谷”曲线趋势, 大致可分为两个阶段, 1—8 月为第一阶段, 9 月—翌年 1 月为第二阶段。在第一阶段中, 1—4 月由于植物开始返青, 蒸腾作用加强, 加之风速较大, 降水较少, 地表蒸发加强, 地下水位逐渐下降, 且在 5 月初地下水位到达第一个最低值, 为 (4.78 ± 0.06) m; 5—7 月(生长季), 随着冻土的消融完全, 地下水位得到补给, 表现为逐渐缓慢抬升趋势, 并在 8 月初地下水位达到第一个峰值, 为 (4.25 ± 0.13) m。第二阶段中, 8—10 月, 地下水位逐渐下降, 之后 11—12 月地下水位呈逐渐上升趋势(图 1A)。降水年内分配不均匀, 主要集中在生长季 5—9 月, 约占全年降水的 80%, 非生长季降雨较少(20%)(图 1A)。总体而言, 在季节尺度上, 降水与地下水位的变化规律差异较大, 降水变化趋势呈单峰型, 而地下水位变化表现为双峰双谷型, 且降水变异大于地下水位(表 2)。

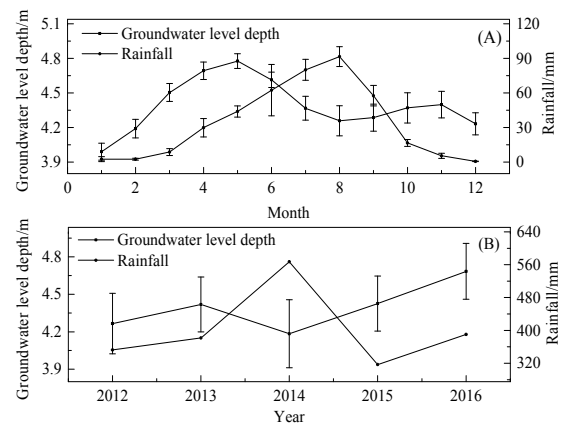


图1 地下水位和降水季节及年际变化

Fig. 1 The seasonal and interannual variation of precipitation and groundwater

表 2 地下水位埋深和降水的季节和年际变化特征

Table 2 Inter-annual and annual variation coefficient of groundwater level depth and rainfall

年份 Year	降水变异系数 Rainfall CV/%	地下水位埋深变异系数 Groundwater level depth CV/%
2012	109.9	5.8
2013	113.8	5.0
2014	110.2	7.1
2015	86.4	4.9
2016	116.6	4.8
2012—2016	21.6	4.4

3.2 地下水位和降水的年际变化

据 2012—2016 年观测的地下水位和降水的年际变化特征(图 1B), 地下水位变化趋势为波动型, 总体表现为逐渐下降趋势, 并在 2013 年出现一个波谷, 之后缓慢上升, 于 2014 年达到最高, 为 (4.18 ± 0.27) m; 而降水变化则与地下水位不同, 表现为先增加后减少, 并在 2014 年达到最大值, 为 567.2 mm。总体而言, 地下水位与降水变化不一致, 仅在 2014 年, 地下水位达到最大, 降水也达到最大, 具有较好的一致性。通过 2012—2016 5 年变异系数分析结果可知, 相对于降水变化, 地下水位年际变化较为稳定(表 2)。

3.3 地下水位季节变化主要影响因素

基于优势分析方法, 定量评估了降水 (X_1)、气温 (X_2)、蒸发 (X_3)、风速 (X_4) 和 50 cm 土壤温度 (X_5) 对地下水位的贡献, 同时结合相关分析, 进一步分析环境因子对地下水位的驱动特征。结果表明, 风速与地下水位呈显著负相关 ($r^2=0.38$, $P<0.01$) (图 2D), 且风速是影响地下水位变异的主要驱动气象因子, 占总贡献(变异总方差)的 36.8%, 而降水对地下水位变异贡献最小, 仅占总贡献 9.3% (表 3)。地下水位变异还受蒸发和气温影响, 且蒸发与地下水位呈极显著负相关 ($r^2=0.28$, $P<0.01$) (图 2C), 占总贡献(变异总方差)的 27.68%, 与单个因子对地下水位的贡献相比, 各因子之间的交互作用对地下水位影响更强(表 3)。

4 讨论和结论

4.1 气象因子对地下水位变异的影响

基于优势分析方法定量评估了地下水位对各环境因子的响应特征, 研究结果表明, 降水对地下水位的贡献最小, 这与一些学者的研究结果不一致, 过去研究者认为, 降雨与地下水位有很好的相关关系, 且降水是地下水的主要补给来源(么文等, 2017; 谢丽纯等, 2011; 肖德安等, 2009), 还有研究认为, 地下水位主要受人类生产生活用水影响, 如工

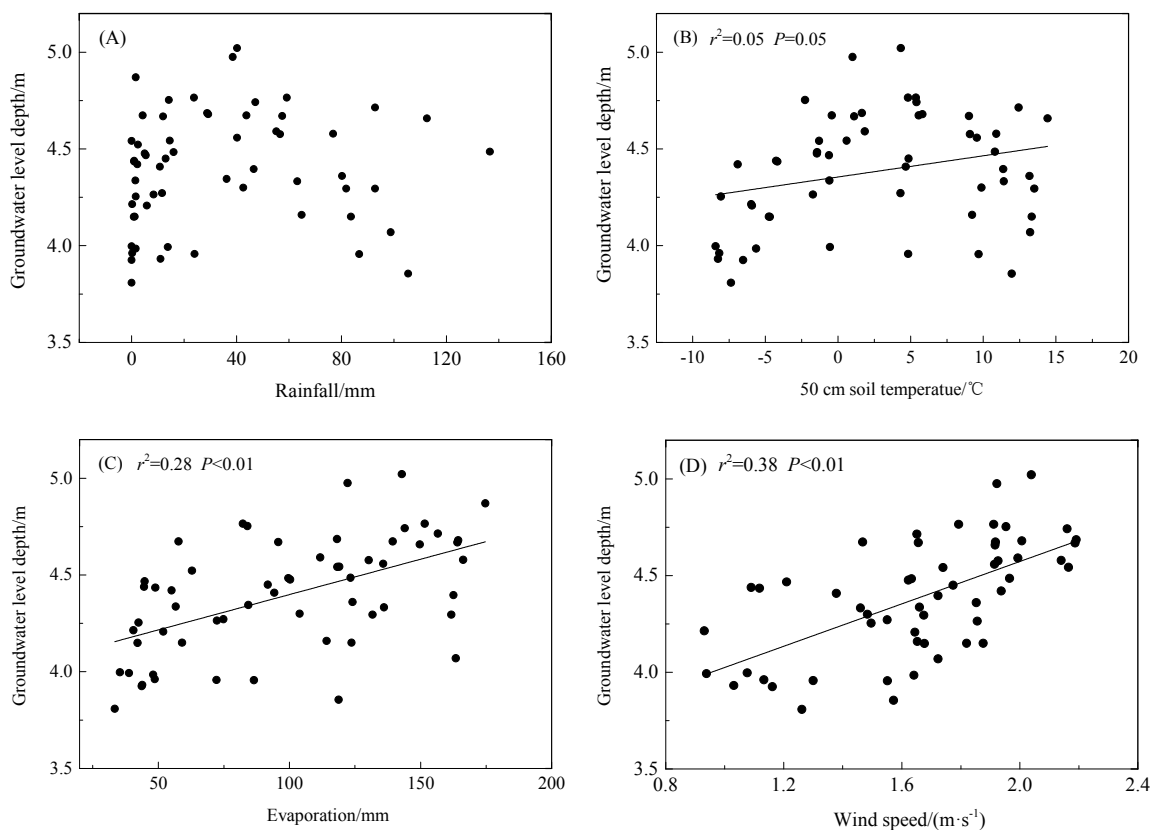


图 2 降水 (A)、50 cm 土壤温度 (B)、蒸发 (C) 和风速 (D) 与地下水位关系

Fig. 2 Relationship between groundwater and precipitation (A), 50 cm soil temperature (B), evaporation (C), wind speed (D)

表 3 5 个气象因子对地下水位的优势分析矩阵表
Table 3 The dominance matrix for the groundwater level with five weather variables

模型中变量 (X) Model variable	单个变量贡献 R^2	增值贡献 Add contribution				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
($k=0$), 平均贡献 Average contribution	-	0.019	0.150	0.300	0.394	0.069
X_1	0.019	-	0.269	0.391	0.387	0.083
X_2	0.150	0.137	-	0.197	0.245	0.212
X_3	0.300	0.109	0.047	-	0.116	0.078
X_4	0.394	0.011	0.001	0.022	-	0.000
X_5	0.069	0.033	0.293	0.309	0.325	-
($k=1$), 平均贡献		0.073	0.153	0.230	0.268	0.093
X_1X_2	0.288	-	-	0.123	0.171	0.132
X_1X_3	0.409	-	0.001	-	0.076	0.003
X_1X_4	0.405	-	0.054	0.080	-	0.025
X_1X_5	0.102	-	0.318	0.311	0.329	-
X_2X_3	0.347	0.063	-	-	0.094	0.054
X_2X_4	0.395	0.064	-	0.046	-	0.603
X_2X_5	0.362	0.057	-	0.039	0.069	-
X_3X_4	0.416	0.070	0.025	-	-	0.034
X_3X_5	0.378	0.035	0.023	-	0.072	-
X_4X_5	0.394	0.037	0.038	0.056	-	-
($k=2$), 平均贡献 Average contribution		0.054	0.076	0.109	0.135	0.047
$X_1X_2X_3$	0.410	-	-	-	0.077	0.037
$X_1X_2X_4$	0.459	-	-	0.029	-	0.020
$X_1X_2X_5$	0.419	-	-	0.028	0.060	-
$X_1X_3X_4$	0.486	-	0.002	-	-	0.000
$X_1X_3X_5$	0.413	-	0.035	-	0.073	-
$X_1X_4X_5$	0.430	-	0.049	0.055	-	-
$X_2X_3X_4$	0.441	0.046	-	-	-	0.011
$X_2X_3X_5$	0.401	0.046	-	-	0.051	-
$X_2X_4X_5$	0.431	0.048	-	0.021	-	-
$X_3X_4X_5$	0.449	0.036	0.003	-	-	-
($k=3$), 平均贡献 Average contribution		0.044	0.022	0.033	0.065	0.017
$X_1X_2X_3X_4$	0.487	-	-	-	-	0.006
$X_1X_2X_3X_5$	0.448	-	-	-	0.046	-
$X_1X_2X_4X_5$	0.479	-	-	0.014	-	-
$X_1X_3X_4X_5$	0.486	-	0.008	-	-	-
$X_2X_3X_4X_5$	0.452	0.041	-	-	-	-
($k=4$), 平均贡献 Average contribution		0.041	0.008	0.014	0.046	0.006
$X_1X_2X_3X_4X_5$	0.494	-	-	-	-	-
总平均贡献 Total average contribution		0.046	0.082	0.137	0.182	0.047
总平均贡献占因变量总方差的百分比 The percentage of the total average contribution to the total variance of the dependent variable		9.3	16.6	27.7	36.8	9.5

业、居民及农业用水 (严明疆等, 2010)。本研究结果之所以与其他研究结果存在较大的差异, 主要是由于以下两个方面的不同: 一方面是气候和地貌条件不同, 在低海拔地区, 由于太阳辐射弱, 年降水丰富, 地表蒸发相对较弱, 因此地下水位的收支主要由降水调节, 降水量变化会直接影响地下水位

的收支。而在青藏高原高海拔地区, 由于生长季风速较大, 太阳辐射强, 蒸散能力强, 降水量几乎都以蒸散形式全部返回大气中 (Zhang et al., 2017), 致使降水对地下水位的贡献较小。本研究地下水位观测井位于青藏高原东北隅, 祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷, 平均海拔 3 200 m, 年均温低

于零度，并且发育着并发育有现代冰川，为该区域地下水的补给提供重要来源。同时，地下水位还受岩性影响，该区域分布着季节性冻土，对寒区地下水的收支、运移和分布格局具有重要影响，比如冻土层作为寒区一种特殊的隔水层或弱透水层，一定程度上能够阻碍地表水和地下水的交换，当土壤冻结时，土壤导水率显著下降，致使降水在土层中的入渗率显著下降，最终导致降水对地下水位变化影响微弱（常娟等，2015）。还有研究表明，土壤冻结阶段，在水势梯度作用下，地下水会向土壤冻结锋面转移，导致地下水在土壤冻结阶段快速下降，而土壤融化阶段，由于冻土融水的补给，地下水位在冻土融化阶段呈抬升趋势（Ireson et al., 2013）。另一方面是由于人类活动影响不同，包括放牧、灌溉和土地利用等，青藏高原作为天然牧场，近年来，随着放牧强度不断加剧，草原退化严重，草毡层较厚，降水事件发生后，土壤表层水分进入深层土壤受抑制，且80%降水发生在生长季，而生长季太阳日照时数长，蒸发能力强，短时间内，多数降水来不及向深层土壤渗透就被以蒸发或蒸腾的形式返回大气中，致使降水不能及时补给地下水。当然，

还有研究表明，降水对地下水位的补给存在滞后现象，当降雨达到最大时，地下水位需要几个月，甚至几年时间才能达到最大（严明疆等，2010）。本研究之所以出现降水与地下水位相关性微弱的结果，也可能与降水对地下水位的补给存在滞后效应有关，未来需要进一步研究。

本研究表明，在所有环境因子当中，风速是影响青藏高原地下水位变化最重要的环境因子（表3和图3D），为了明确风速与地下水位的关系，本研究进一步对生长季的风速与生长季的地下水位以及非生长季的风速和非生长季的地下水位进行相关分析。结果发现，无论是生长季还是非生长季，风速与地下水位都存在极显著负相关（ $P < 0.01$ ）（图3A、B）。风速对地下水位的影响主要通过以下两个方面，一方面风速影响土壤水分蒸发和植物蒸腾过程，风速能够通过连续不断地波动扰动，加快表层土壤的空气流动，带走水汽饱和的空气带，换之以干燥的空气，从而加快地表水分的蒸发，且风速越大，土壤表面水分的蒸发越快（ $r^2 = 0.46$, $P < 0.01$ ）（图3C），植物蒸腾作用越强（ $r^2 = 0.86$, $P < 0.01$ ）（图4），最终影响地下水位的收支。另一方面，当风速

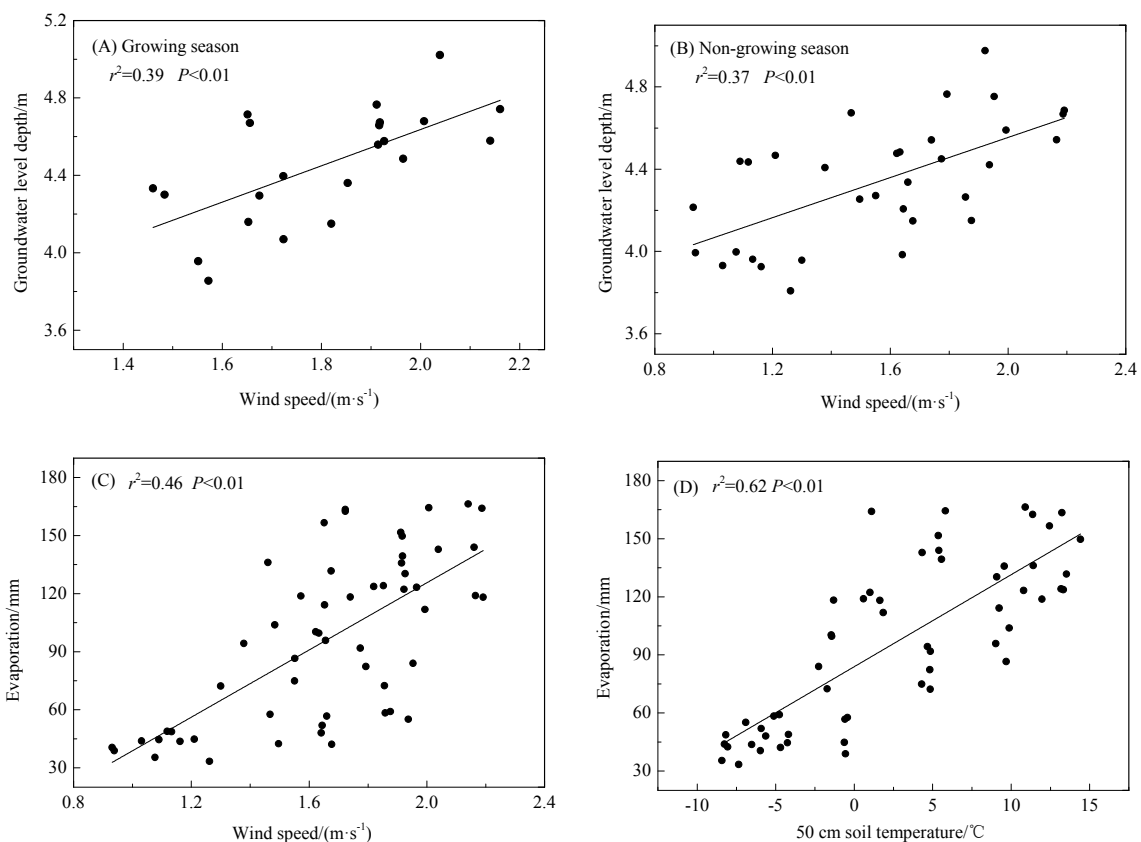


图3 生长季风速与生长季地下水位埋深关系 (A); 非生长季风速与非生长季地下水位埋深关系 (B); 风速与蒸发关系 (C); 风速与热通量的关系 (D)

Fig. 3 Relationship between growing wind speed and growing groundwater level (A); the relationship between non-growing wind speed and non-growing groundwater level (B); the relationship between wind speed and evaporation (C); the relationship between wind speed and thermal flux (D) at the seasonal scale

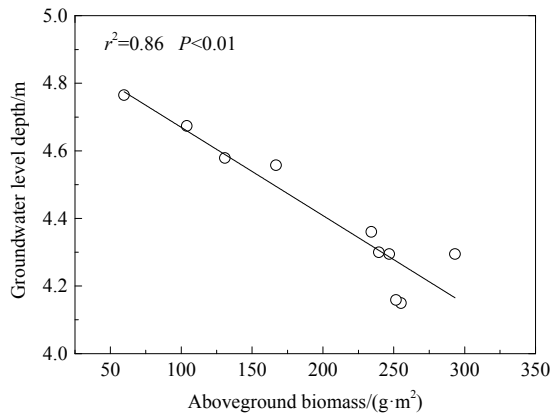


图4 地上生物量与地下水位埋深关系

Fig. 4 Relationship between aboveground biomass and groundwater level depth

大时,云量较少、辐射较强,进而加快了地表水分的蒸发,导致地下水位下降。当然,地下水位除了受风速影响,还受气温和50 cm土壤温度影响。气温和土温主要是通过影响蒸散和冻土冻结与融化过程,从而改变地下水位的收支。尽管气象因子对地下水位变化具有重要影响,但仅能解释49%的变异,仍有51%变异不能被其解释,这主要是由于地下水影响因素较为复杂,本研究仅考虑了环境因子和植被因素对地下水位影响,未来将结合冻土的冻结与消融过程以及地形等因素进一步明晰影响寒区地下水位变化的主控因子,为保障青藏高原水资源安全和合理管理、利用提供基础资料。

4.2 结论

季节尺度上,地下水位变化总体呈双峰双谷曲线趋势,生长季(5—8月)地下水位高于非生长季(1—4月和9—12月),8月初地下水位达到最高,约为(4.25±0.13) m,5月初地下水位达到最低,约为(4.78±0.06) m;年际尺度上,地下水位总体呈降低趋势,相比于降水年际变异,地下水位年际变异较小。

在各环境因子中,风速是影响地下水位最重要的环境因子,其次依次是蒸发、气温和土壤温度,而降水对地下水位影响微弱。尽管气象因子对地下水位的变异贡献较大,但5个环境因子(降雨、风速、蒸发、气温和50 cm土壤温度)对地下水位的变异贡献只有49.4%,仍有50.6%的方差变异不能被解释。

参考文献:

- BUDESCU D V. 1993. Dominance analysis: A new approach to the problem of relative importance of predictors in multiple regression [J]. *Psychological Bulletin*, 114(3): 542-551.
- DALIAKOPOULOS I N, COULIBALY P, TSANIS I K. 2005. Groundwater

- level forecasting using artificial neural networks [J]. *Journal of Hydrology*, 9(1-4): 229-240.
- DÖLL P, HOFFMANN-DOBREV H, PORTMANN F, et al. 2012. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations [J]. *Journal of Geodynamics*, 59-60: 143-156.
- EVANS S G, GE S, VOSS C I, et al. 2018. The Role of Frozen Soil in Groundwater Discharge Predictions for Warming Alpine Watersheds [J]. *Water Resources Research*, 54(3): 1599-1615.
- GREEN TR, TANIGUCHI M, KOOI H, et al. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater [J]. *Journal of Hydrology*, 405(3): 532-60.
- IRESON A M, VAN G, FERGUSON G, et al. 2013. Hydrogeological processes in seasonally frozen northern latitudes: understanding, gaps and challenges [J]. *Hydrogeology Journal*, 21(1): 53-66.
- MUSTAFA M W, SULAIMAN M H, SHAREEF H, et al. 2012. Reactive power tracing in pool-based power system utilising the hybrid genetic algorithm and least squares support vector machine [J]. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 6(2): 133-141.
- PARRY M. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability: Part of the Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- TABARI H, SOME'E B S. 2012. Investigation of groundwater level fluctuations in the north of Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 66(1): 231-243.
- TAYLOR R G, SCANLON B, DOLL P, et al. 2013. Ground water and climate change [J]. *Nature Climate Change*, 3(4): 322-329.
- ZHANG F W, LI H Q, WANG W Y, et al. 2017. Net radiation rather than surface moisture limits evapotranspiration over a humid alpine meadow on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Ecohydrology*, 12(2): e1925.
- ZOU D F, ZHAO L, SHENG Y, et al. 2017. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere* 11(6): 2527.
- 常娟, 王根绪, 李春杰, 等. 2015. 青藏高原连续多年冻土区的冻结层上水季节动态及其对活动层土壤冻融过程的响应特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 45(4): 481-493.
- 戴黎聪, 柯浔, 曹莹芳, 等. 2018. 关于生态功能与管理的生物土壤结皮研究[J]. *草地学报*, 26(01): 22-29.
- 傅志敏, 向衍, 周志芳. 2010. 影响近地表气温的地下水临界埋深[J]. *人民黄河*, 32(12): 7-9.
- 郭凤清, 曾辉, 丛沛桐. 2016. 青藏高原地下水的来源、分类、研究动向及发展趋势[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 36(3): 160-165.
- 郭凤清, 孙书洪, 曾辉, 丛沛桐. 2017. 海北高寒草甸返青期土壤温度与水动力动态变化. *生态环境学报*, 26(3): 408-414.
- 刘瑞国, 王文. 2009. 地下水位变化与降水的关系分析[J]. *地下水*, 31(5): 42-44.
- 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 2004. 近百年来青藏高原冰川的进退变化[J]. *冰川冻土*, 26(5): 517-522.
- 王智磊, 孙红月, 刘永莉, 等. 2011. 降雨与边坡地下水位关系的时间序列分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 45(7): 1301-1307.

- 吴建强, 王敏, 陈宇, 等. 2017. 平原河网地区地下水脆弱性评价体系构建及应用[J]. 生态环境学报, 26(11): 1821-1828.
- 肖德安, 王世杰. 2009. 土壤水研究进展与方向评述[J]. 生态环境学报, 18(3): 1182-1188.
- 谢丽纯, 陈建耀, 付丛生, 等. 2011. 华南滨海小流域降雨入渗对地下水的补给分析[J]. 生态环境学报, 20(8-9): 1259-1267.
- 徐晓明, 吴青柏, 张中琼. 2017. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 39(1): 1-8.
- 严明疆, 王金哲, 李德龙, 等. 2010. 年降水量变化条件下农灌引水与开采对地下水位影响[J]. 水文地质工程地质, 37(3): 27-30.
- 杨文元, 郝培静, 朱焱, 等. 2017. 季节性冻融区井渠结合灌域地下水动态预报[J]. 农业工程学报, 33(4): 137-145.
- 么文, 吴淑梅. 2017. 地下水位与降水量的变化规律及其影响[J]. 内蒙古科技与经济, (13): 51-52.
- 张玲, 贾在强, 欧阳秋明. 2008. 章丘泉水地下水位与降水关系分析[J]. 安徽农业科学, 36(27): 11931-11932.
- 赵林, 丁永建, 刘广岳, 等. 2010. 青藏高原多年冻土层中地下冰储量估算及评价[J]. 冰川冻土, 32(1): 1-9.

The Response of Shallow Groundwater Level to Environmental Factors on Alpine Meadow in Qinghai-Tibet Plateau: A case study on Qinghai Haibei Station

DAI Licong^{1,2}, KE Xun^{1,2}, CAO Yingfang^{1,2}, ZHANG Fawei¹, DU Yangong¹, LI Yikang¹, GUO Xiaowei¹, LI Qian¹, LIN Li¹, CAO Guangmin¹

1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: The water resources in Qinghai-Tibet plateau are abundant, and shallow groundwater plays an important role in plateau hydrologic cycle. However, few studies had conducted on the responses of shallow groundwater level to global warming in this special region. Our research conducted on alpine meadow in the northeast corner of Qinghai-Tibet plateau, and applied dominance analysis to quantitatively evaluate the contributions of rainfall, wind speed, evaporation, 50 cm soil temperature and air temperature to groundwater level. The results showed that, (1) On a seasonal scale, the groundwater level was characterized by a double peak and double valley relationship within a year, which decreased significantly during the non-growth season (January to April, October to December) and increased during growth season (May to September), with the maximum and minimum value of groundwater level occurred in May (4.78 ± 0.06) m and August (4.25 ± 0.13) m, respectively. On a interannual scale, the groundwater level showed a show slightly downtrend from 2012 to 2016, with the highest value occurred in 2014 (4.18 ± 0.27) m. (2) The wind speed was the most important factors affecting the variation of groundwater level among five environmental factors, which accounted for 36.8% of total variation, then followed by evaporation (27.7%), air temperature (16.6%), 50 cm soil temperature (9.5%). However, rainfall exerted little impact on the variation of groundwater level, which only accounted for 9.3% of total variation. Moreover, all environmental factors were significantly negative relate to groundwater level except rainfall. (3) The groundwater level was more stable than rainfall, and the variation of rainfall was larger than groundwater both on a seasonal scale and inter-annual scales. Our studies suggested that the shallow groundwater level would be less affected by rainfall on alpine meadow in Qinghai-Tibet plateau, which could provide scientific proofs to manage and utilize water resources in Qinghai-Tibet plateaus in future.

Key words: Qinghai-Tibet plateau; alpine meadow; groundwater level; environmental factors; dominance analysis