

半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析

张璐¹, 朱仲元^{1,2*}, 张圣微^{1,2,3}, 王慧敏¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古自治区农牧业大数据研究与应用重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要: 土壤水分是岩石圈—生物圈—大气圈—水圈间水分循环的重要环节, 是半干旱草原型流域植物生长的主要限制因子。该研究基于内蒙古锡林郭勒盟锡林河流域野外实测土壤水分数据, 利用主成分分析和冗余分析方法, 对不同土壤类型垂直剖面土壤水分变化特征及其潜在环境影响因子进行了对比分析。结果表明, 黑土、红砂土、栗钙土、盐土间土壤水分含量呈依次增大趋势; 随着土层深度加深, 土壤水分变异性减弱, 且各层土壤水分变异性随时间变化受到土壤类型的影响较大; 主成分分析表明海拔、植被高度和坡度等包含了解释土壤水分变异 68.50% 的信息; 冗余分析识别出海拔和植被高度是土壤水分变异的关键潜在环境驱动因子。该研究可为半干旱草原型流域生态水文过程研究提供数据和理论支持。

关键词: 土壤; 干旱; 水分; 草原; 锡林河流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.13.015

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-13-0124-09

张璐, 朱仲元, 张圣微, 等. 半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 124-132.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.13.015 <http://www.tcsae.org>

Zhang Lu, Zhu Zhongyuan, Zhang Shengwei, et al. Analysis of soil moisture variation and its influencing factors in semi-arid steppe watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 124-132. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.13.015 <http://www.tcsae.org>

0 引言

草地生态系统是自然界能量流动、物质循环和自我修复的重要组成部分, 对维系生态平衡、发展地区经济具有重要地理价值。然而在气候变化和人类活动的双重影响下, 覆盖世界陆地约 8% 的温带半干旱草原在持续退化^[1]。内蒙古草原是中国北方重要的生态安全屏障, 对防治内陆荒漠化侵蚀起到关键作用^[2-3]。水分是制约该地区植物生长和分布的主要环境因子^[4-5], 近年来由于极端气候和不合理放牧, 土壤水分时空分布状态越发复杂, 导致原本脆弱的生态系统面临更大挑战^[6-7]。因此, 探究半干旱草原型流域土壤水分分布规律, 对退化草场的治理、生态修复措施的完善具有十分重要的理论和现实意义^[5,8]。

半干旱草原型流域土壤水分受气候、植被、地形、土壤类型及人类活动等多种因素的干扰, 导致“土壤—植物—大气连续体”的水分传输过程较为复杂^[9-12]。多年来, 对于半干旱草原土壤水分异质性开展了很多研究, 这些研究对促进草地生态水文循环的认识具有重要意义^[13]。A 等^[14]在内蒙古东北部草甸草原上研究了土壤水分与蒸

散量的关系, 以及植被覆盖度对这种关系的影响, 并指出全球气候变化将导致生态干旱的加剧。Jian 等^[15]研究植被恢复对半干旱地区生态系统水平衡的响应和影响作用, 指出了解植被变化对不同土层深度土壤水分的影响, 对区域水资源优化配置尤为重要。此外, Blyth 等^[16]利用水文模型模拟土壤空间蓄水量方程, 指出地形和土壤类型可用来解释土壤水分的变化。而土壤水分地面观测具有准确度高、操作简单的特点, 是气候—植被—土壤水分变化关系研究中的关键环节^[17]。因此, 选用时域反射仪 (Time Domain Reflectometry, TDR) 定点获取土壤水分^[18], 从气候—植被—地形以及土壤类型间的耦合机制出发, 对土壤水分异质性及其影响因素展开研究, 可为解释半干旱草原型流域复杂生态科学问题提供思路^[14,19-20]。自然环境因素对土壤水分异质性的影响程度随时间、地点的变化而变化^[21], 半干旱草原型流域拥有独特的生态环境与其他地区有显著差异, 且土壤水分异质性及其影响因素尚未查清。

综上, 本研究根据锡林河流域情况及研究目标, 获取野外实测数据, 利用多元统计分析等方法, 揭示半干旱草原型流域土壤水分变异特征及其关键潜在环境影响因子, 旨在为草原型流域优化生态保护措施、深入开展生态水文过程方面的研究提供数据支撑和理论支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

锡林河发源于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗境内, 属内陆河 (43°26'N~44°39'N, 115°32'E~117°12'E),

收稿日期: 2020-03-19 修订日期: 2020-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51779116); 地区科学基金项目 (51669018, 51869015); 内蒙古自然科学基金杰出青年培育基金 (2019JQ06); 中国科学院“西部之光”青年学者计划

作者简介: 张璐, 主要从事干旱半干旱地区水文生态过程研究。

Email: 971568173@qq.com

*通信作者: 朱仲元, 博士, 教授, 从事水文水资源与草原生态研究。

Email: 1428825390@qq.com

全长 268.1 km, 流域面积 6 263 km²。锡林河以库尼苏曼为分界, 库尼苏曼以上为上游, 流经丘陵地带, 河道异常弯曲, 间或有沼泽地。库尼苏曼以下为中下游, 河水折向北流, 形成河间盆地, 最后注于白音淖尔湖。锡林河流域地处中纬度西风气流带, 属中温带半干旱大陆性气候, 季节变化明显, 多年平均降水量为 276.3 mm, 最小降水量为 121.1 mm, 最大降水量为 511.7 mm。利用联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 推荐的 Penman-Monteith^[22] 公式计算锡林河流域潜在蒸散发得出, 多年平均潜在蒸散发量为 1 105.6 mm, 最小潜在蒸散发量为 978.2 mm, 最大潜在蒸散发量为 1 243.5 mm。锡林河流域土壤类型以栗钙土和红砂土为主, 植被以草原为主, 大针茅 (*Stipa grandis*)、羊草 (*Leymus chinensis*) 群落是最主要的群落类型^[23]。

1.2 样点布设及采样

为使采样尽可能包含整个流域地形、土壤类型、植物群落和降水等的分布情况, 首先利用中国 1:100 万土壤类型图 (国家青藏高原科学数据中心, <http://westdc.westgis.ac.cn>, 2016), 计算并提取出锡林河流域 12 种不同土壤质地, 经分析后将相近性质的土质组合, 划分出 4 种土壤类型, 在此基础上, 按照每种土壤类型所占研究区面积比例, 选择具有典型代表性区域作为试验样地, 共布设垂直和横切河流断面采样点 55 个 (图 1)。其中, 栗钙土占流域总面积 74.30%, 布设采样点 34 个; 红砂土占流域总面积 15.35%, 布设采样点 7 个; 盐土占流域总面积 4.93%, 布设采样点 6 个; 黑土占流域总面积 5.42%, 布设采样点 8 个, 因黑土南北分布跨度较大, 故样点数相应增加。利用全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 记录每个采样点的海拔和经纬度。坡度、坡向数据使用全国数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据计算获得 (<http://www.gscloud.cn>); 气象数据来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>)。

试验开展于 2019 年 5 月, 在保证选取土壤质地均一旦完整的前提下, 去除地表覆盖物及浮土后, 每个采样点均埋设 2 m 的 TDR 测管, 分别在 5、10、20、30、40、50、80、100、120、150 和 180 cm 处, 使用德国 IMKO 公司生产的 TDR (仪器型号: TRIME-PICO-IPH) 对不同深度的土壤水分进行测量。本研究对锡林河流域 59 a 日降水数据统计分析后发现, 土壤水分与降雨量关系密切, 考虑到该区域降雨一般集中在 6—9 月, 为避免不同季节采样 (特别是雨季前和雨季后) 所得到的结果可能存在较大差异, 故研究在 5 月末集中降雨之前完成 TDR 测管的安装。待土层稳定后, 于 7 月 22 日至 10 月 20 日进行土壤水分数据取样, 确保每次取样前 5 d 及取样期间均未发生降雨, 其中 7 月和 8 月每月取样 2 次, 其余月份每月取样 1 次, 每次取样分 3 组同时进行, 需 3 d 完成。在每个土壤水分采样点周围随机选取 3 个典型植被代表区域, 进行 1 m×1 m 草本植被样方调查, 每 2 个样方方向

间呈 60°, 记录样方内植物名称、高度、盖度等指标数据; 地上现存量采用刈割法测定, 带回实验室后在 65 °C 恒温下烘 48 h, 分别称量各样方内植物干质量, 将 3 个样方的平均值作为该采样点植被地上生物量的代表值 (简称地上生物量)。植被调查在采样期 7—10 月每月进行 1 次, 与当月土壤水分采样同期, 并确保样点位置误差控制在 10 m 以内。

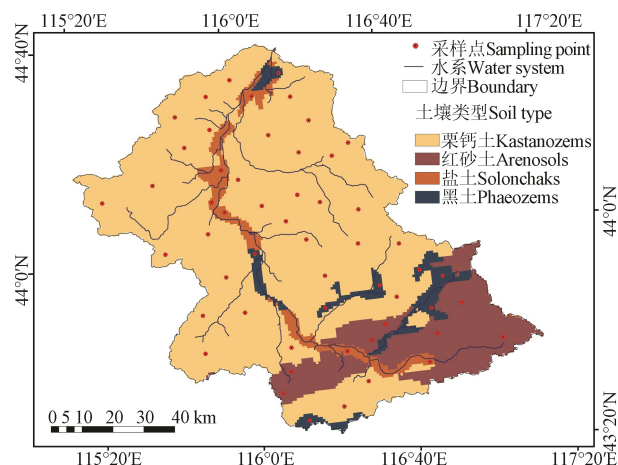


图 1 研究区采样点分布及土壤类型图

Fig.1 Distribution of sampling points and soil types in study area

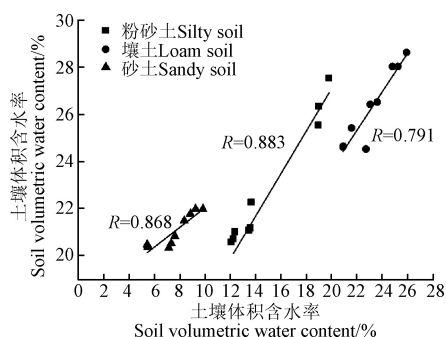
1.3 仪器率定

TDR 测管在采样点安装后, 利用原状土柱率定法^[24]对 TDR 进行率定。随机选取样点, 利用直径为 28 cm, 高为 45 cm 的自制取土器, 采集 3 个原状土柱。将土柱分为上、中、下 3 层, 分别用于测定 3 种土壤含水状态 (饱和、湿润和干燥状态) 的土壤体积含水率。为便于水分下渗, 原状土柱带回实验室后, 在准备放置土柱的桶底打孔, 布设过滤层, 并用尼龙滤布包裹土柱下端, 放入桶内安装 TDR 测管 (图 2a)。向桶内均匀注水, 浸泡至土柱表面有明显水渗出, 说明此时土柱已达到饱和状态, 然后让土柱自然脱水, 直到桶底没有明显水渗出后的第 1 天、第 2 天和第 7 天, 使用与野外相同型号的 TDR 和体积为 100 cm³ 的环刀, 分别测定不同土壤含水状态下 15 cm 土柱的平均土壤体积含水率, 同时利用自封袋采集扰动土。扰动土带回实验室后, 晾干、碾碎、均匀混合后, 过 2 mm 筛, 使用德国 SYMPATEC 气流干法激光粒度仪 (HELOS-RODOS) 测定其粒径, 根据美国制 (USDA) 粒级划分标准划分土壤质地。由于 TDR 测量 15 cm 土柱平均土壤体积含水率, 为减小误差, 每次测定均重复取样 3 次, 利用环刀法采样时, 垂直、水平各取样 3 次, 其中每 2 个环刀水平方向间呈 60°, 烘干后取平均值。对比分析获得的 27 组 TDR 原始测量值与对应环刀法测量的土壤平均体积含水率值, 绝对误差在 ±4% 范围内的数据占比为 81.2%, 满足《土壤水分监测仪器基本技术条件》中野外比测得数据合格性的要求^[25]。通过 EXCEL 软件, 计算并拟合率定关系式 (图 2b), 拟合公式的决定系数均 > 79%, 拟合优度较好, 其中砂土中存在 2 个分布于线性 (砂土) 上方的离群点, 明显改变了拟合曲线

的斜率, TDR 测得的土壤体积含水率明显高于环刀法测得的土壤体积含水率, 可能是砂土中的石英含量对土壤水分测量值产生了影响^[26]。整体说明采集原状土带回实验室进行仪器率定的方法是可行的, 保证了率定公式所用的土壤水分数据从饱和到干燥的完整覆盖。



a. 率定装置
a. Calibration device



b. 率定结果
b. Calibration results

注: 图 2b 中 x 轴土壤体积含水率为环刀法测量值, y 轴土壤体积含水率为时域反射仪 (TDR) 测量值。

Note: In Fig.2b the x-axis is soil volumetric water content which was measured by the ring knife, and the y-axis is soil volumetric water content which was measured by the Time Domain Reflectometry (TDR).

图 2 时域反射仪 (TDR) 率定装置与率定结果

Fig.2 The Time Domain Reflectometry (TDR) calibration device and calibration results

1.4 数据处理及分析方法

梯度分析是生态群落多元统计分析中最常用的方法, 依照响应变量是否受到解释变量的约束分为非约束性分析和约束性分析。主成分分析 (Principal Component

Analysis, PCA), 是最常见的非约束性分析, 主要用于数据的降维。约束性分析, 因能反映并揭示环境因子与响应变量之间的关系而被广泛应用^[27]。对研究变量进行降趋势对应分析 (De-Trend Correspondence Analysis, DCA) 得到变量梯度长度最大值均 <3 , 故约束性分析选择冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA)。本研究以土壤体积含水率作为响应变量, 潜在环境影响因子 (包括海拔、植被高度、植被盖度和降水等) 作为解释变量, 通过多元统计分析的方法, 利用 PCA 对解释变量进行降维度分析, 并基于 R 语言 Vegan 包中 RDA 方法, 分析解释变量与响应变量之间的关系; ANOSIM 分析用于检验组间差异是否显著大于组内差异; 方差膨胀因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 分析方法在进行环境因子分析前, 对自相关环境因子进行剔除; 利用前项选择法剔除变量间的共线性, 识别响应变量与代表性解释变量之间的关系; 采用 999 次蒙特卡罗 (Monte Carlo) 随机置换对约束轴及变量相关性等进行显著性检验。此外, 利用 SPSS 软件通过经典统计参数来描述土壤水分的统计分布情况; 利用 Origin 9.0 进行 logistics 方程拟合及图件处理。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分统计特征

基于研究区 0~180 cm 土层深度的土壤水分数据, 采用经典统计学方法得到土壤水分统计学特征值 (表 1)。整体上看, 在 7—10 月采样期, 剖面土壤体积含水率最大值出现在 100~120 cm, 为 30.65%, 最小值出现在 0~5 cm, 为 1.02%, 变化范围较大; 土壤水分数据的偏度为 0.26~1.62, 表明数据在右侧分散, 存在较多大于均值, 峰度为 -0.18~2.96, 表明数据分布较为陡峭, 存在极值。从变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 上来看, 随着土层深度的增加, 土壤水分变异系数先增大后减小, 可能浅层土壤水分更容易受到气候、人类活动等的影响, 加之流域内植被根系因土壤类型的不同而差异明显, 使得浅层土壤水分具有更大的空间变异性。柯尔莫哥洛夫—斯米诺夫 (K-S) 检验结果表明, 不同深度的土壤水分数据均服从正态分布 ($P>0.05$)。

表 1 不同深度土壤水分统计学特征

Table 1 Statistical characteristics of soil moisture at different depths

土层深度 Soil depth/cm	土壤水分 Soil moisture						
	最小值 Minimum value/%	最大值 Maximum value/%	平均值 Mean value/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV Coefficient of Variation/%	柯尔莫哥洛夫—斯米诺夫检验 K-S test
(0,5]	1.02	12.97	7.86	1.62	0.88	80.92	0.172
(5,10]	1.21	15.71	8.76	0.50	-0.38	35.89	0.119
(10,20]	1.16	18.08	7.84	0.26	-0.18	59.63	0.074
(20,30]	1.52	21.36	7.60	0.46	-0.29	78.07	0.122
(30,40]	2.60	20.28	7.38	0.55	-0.64	83.42	0.127
(40,50]	2.14	18.18	6.47	0.56	-0.63	86.48	0.138
(50,80]	1.44	16.05	6.42	0.36	-1.52	86.24	0.176
(80,100]	2.18	21.74	7.31	0.68	-0.43	85.79	0.130
(100,120]	2.64	30.65	8.23	1.59	2.96	85.46	0.185
(120,150]	2.18	28.43	9.59	1.00	1.48	71.67	0.124
(150,180]	2.51	29.28	10.29	1.08	2.31	62.87	0.128

选取顺延河流流向采样点 25 个, 其中流域上游采样点主要分布于红砂土与黑土中, 流域中下游采样点分布于盐土与栗钙土中。对采样点不同土壤类型剖面平均土壤体积含水率分析后发现, 土壤水分在盐土和栗钙土中含量较高, 红砂土和黑土次之, 且不同土壤类型间土壤水分变化有明显差别。其中, 盐土土壤水分变化范围较大, 红砂土次之, 栗钙土最小(图 3a)。郭焱^[20]研究认为锡林郭勒盟 0~50 cm 土壤水分分布从西南至东北均呈条带状逐渐增加的趋势, 与此研究不同的是, 锡林河河流流向由东南至西北在中下游转折后流向东北方向, 虽然与土壤水分从西南至东北均呈条带状逐渐增加的研究结论略有不同。值得一提的是, 在河流流向转折点区域, 土壤水分含量较高, 可能是该区域正处于巴彦宝力格盆地, 地下水可持续性较强, 是锡林河河谷平原主要富水区^[28], 但由于降水由西南至东北在水文年均呈减小趋势^[29], 该地区地下水是地表水的补给源^[30], 因此土壤水主要受到地下水的补给。锡林河流域土壤水分来源单一, 且降水在空间上分布不均匀, 故整理这 25 个采样点的降水格点数据, 分析牧草生育期 4—10 月累积降水量与对应采样点垂直剖面平均土壤体积含水率的关系。采用 logistic 方程拟合二者的关系, 拟合结果表明, 二者之间存在较显著的相关性(图 3b)。拟合得到参数 $a=1.74$ 、 $b=21.50$ 、 $P=3.10$ 和 $x_0=398.72$, 表达式如式(1)所示

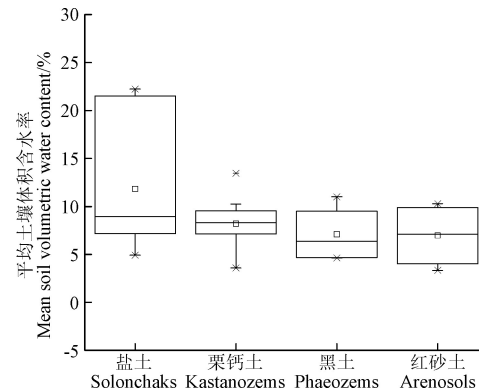
$$y=b+(a-b)/\{1+[(x/x_0)^P]\} \quad (1)$$

式中 y 为 4—10 月累积降水量, mm; x 为垂直剖面平均土壤体积含水率, %; a 为土壤体积含水率的最低值, %; b 为土壤体积含水率的最大变化范围, %; x_0 与采样点降水量均值 392.05 mm 非常接近。

2.2 不同时段不同土壤类型土壤水分变异特征

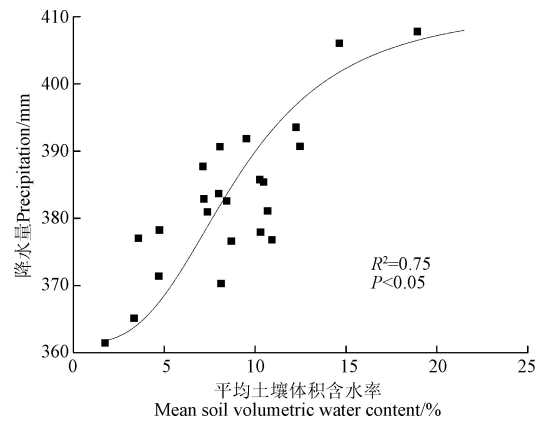
7—10 月, 研究区 4 种土壤类型土壤体积含水率垂直剖面分布特征如图 4 所示。不同土壤类型土壤体积含水率水平方向差异较大, 同一土壤类型土壤体积含水率垂直方向变化明显。总体来看, 锡林河流域平均土壤体积含水率介于 0.83%~16.69%, 整体偏低, 4 种土壤类型土壤水分含量由高到低依次为盐土、栗钙土、红砂土、黑土。采样时段内, 流域土壤水分含量随时间变化由大到小依次为 8 月、10 月、7 月、9 月, 其中 8 月是锡林河流域降雨量大且降雨最频繁的时期, 土壤水分含量达到采样期

最高值; 7 月和 9 月是土壤水分迅速下降期, 土壤水分含量偏低; 10 月为土壤水分恢复期, 土壤水分含量开始恢复至稳定状态。



a. 平均土壤体积含水率变化趋势

a. Changes of mean soil volumetric water content



b. 平均土壤体积含水率与降水量的关系

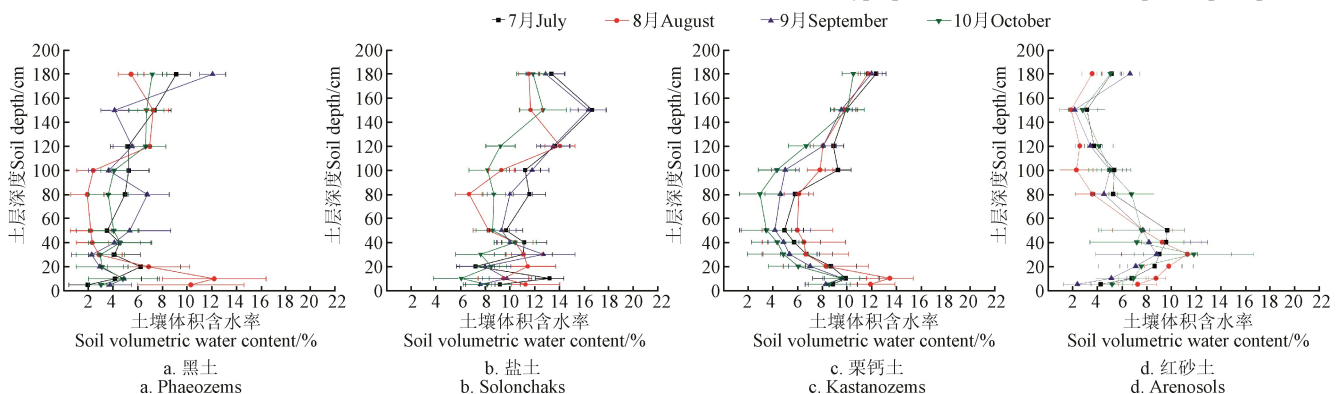
b. Relationship between mean soil volumetric water content and precipitation

注: 图 3a 中, 横坐标从右向左表示从上游到中游, 箱图中横线位置从下至上分别表示最小值、下四分位数、中位数、上四分位数、最大值, $\square$ 表示均值, * 表示特异值。

Note: In Fig.3a, the abscissa from right to left indicates from upstream to middle and downstream, which the horizontal lines indicate the minimum value, bottom quartile, median, top quartile, and maximum value from bottom to top, and $\square$ represents mean value, * represents outlier.

图 3 不同土壤类型剖面平均土壤体积含水率变化趋势及其与降水量的关系

Fig.3 Variation of mean soil volumetric water content within different soil type profiles and its relationship with precipitation



注: 误差线代表标准差。

Note: The error bar represents standard deviation.

图 4 不同时段不同土壤类型土壤水分垂直剖面变异特征

Fig.4 Variation characteristics of vertical profile of soil moisture in different soil types at different periods

土壤体积含水率标准差结果表明,土壤水分的变异性在垂直剖面存在较大差异。总体来看,0~50 cm 浅层土壤体积含水率的变异性大于深层土壤体积含水率,原因在于:牧草根系主要分布于0~50 cm 土层中,土壤水分受气候、植被及植被根系的影响较大^[31-32],深层土壤通气性差,吸收热量不足,不利于根系生长,土壤水分受到土壤本身稳定物理属性的影响较大,从而变异性减弱,这与侯琮等^[13]认为土壤水分垂向变异主要发生在60 cm 以上土层中的研究结果较为相似。黑土、盐土和红砂土的土壤体积含水率在表层0~30 cm 出现最大变异,栗钙土的土壤体积含水率在30~50 cm 变异性最大,且随着土层深度增加,4种土壤类型土壤水分变异性呈先增强后减弱的趋势。随着时间的推移,4种土壤类型土壤水分变异性差异较大,由大到小依次表现为:黑土8月、7月、9月、10月;盐土9月、8月、7月、10月;栗钙土8月、7月、9月、10月;红砂土10月、9月、8月、7月。黑土与盐土不同土层深度土壤水分随时间变化略有不同。其中,黑土分布于河谷平原区、山间阶地及盆地,地下水可持续性差^[28],8月份是锡林河流域植被生长最茂盛的时期,由于黑土养分高且持水性好,该区域植被对土壤水分的需求较高,10~50 cm 土层土壤水分被植被过度消耗,且得不到地下水及时补给,导致土壤水分含量整体偏低,土壤水分异质性受到植被和地下水的影响较大,故该区域应减少对地下水的开采,增强其植被承载能力^[33]。而7月、9月和10月,土壤水分变化幅度较小,表明该时段黑土区域土壤水分状态较稳定。盐土的土壤水分含量较高,可能是由于采样点多分布于河流主干道附近,地形低洼,潜育特征较明显,土壤水分变异受到地表水及地下水的影响较大。采样期内,盐土0~40 cm 浅层土壤水分变化差异较大,深层土壤水分变化趋势相似,可能是由于盐土本身土壤温度升温较慢,且植被易受到盐分胁迫,不利于其生长,在该区域建议增加种植耐盐型植物,对改善土壤性质、促进养分积累和循环具有积极意义^[34]。栗钙土与红砂土的土壤水分随时间变化具有一定的趋同性。采样时段内,栗钙土的土壤水分在20~50 cm 均呈减小趋势,且土壤水分在植被生长中期(8月)的变异性最大,在植被生长后期(10月)的变异性最小,可能是该区域大面积覆被为草,土壤水分变异性受到植被生长阶段的影响较大;由于砂土本身持水性较差,且红砂土区域植被覆盖度较低,导致浅层土壤水分易受到蒸发作用的影响,含量较低,故根系为利用深层土壤水分,生长较深,土壤水分变异随时间变化具有延迟性^[32]。

2.3 土壤水分变异的环境影响因子分析

2.3.1 潜在环境影响因子统计分析

通过PCA获得3个包含68.50%原始信息的主成分。其中,主成分1(Principal Component 1, PC1)的解释率为40.00%,主成分2(Principal Component 2, PC2)的解释率为15.60%(图5),说明提取的主成分与原始变量相关性较大,具有一定的代表性。

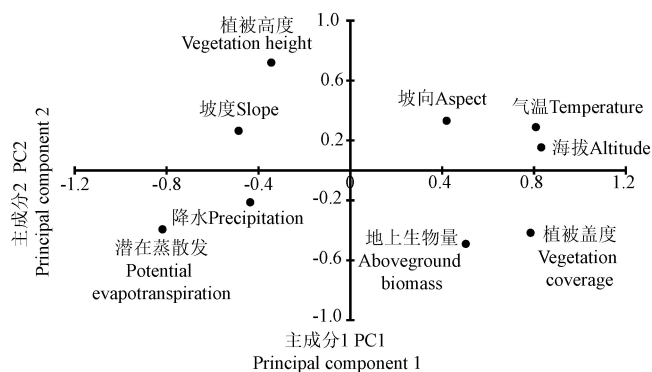


图5 潜在环境影响因子主成分载荷图

Fig.5 Principal component load diagram of potential environmental impact factors

PCA 计算结果表明(表2),PC1 包含海拔、潜在蒸散发、气温和植被盖度的最大信息,其中海拔、植被盖度和气温呈正向分布,潜在蒸散发呈负向分布。适宜的光照和水热条件会促进植被生长^[35],从而增强植被对降水的再分配作用,且地面覆被增加将会减缓裸露地面的直接蒸发作用,张圣微等^[36]研究也表明,锡林河流域内应减少牲畜放牧数,减缓人类活动造成植被群落演替从而降低草地覆盖度和土壤水分的无效散失,随着全球气候的暖干化,潜在蒸散发对土壤水分变异性的贡献逐渐增加,将会导致半干旱草原型流域植被的不断退化,故减少载畜量,增加流域植被覆盖度,对促进土壤—植被—大气系统中的水分—能量—物质耦合循环具有积极意义^[37]。

表2 潜在环境影响因子主成分分析

Table 2 Principal component analysis of potential environmental impact factors

变量 Variables	主成分 Principal component		
	1	2	3
海拔 Altitude	0.832	0.177	0.183
坡度 Slope	-0.486	0.263	0.603
坡向 Aspect	0.421	0.334	0.715
植被高度 Vegetation height	-0.344	0.719	-0.040
地上生物量 Aboveground biomass	0.509	-0.476	0.232
植被盖度 Vegetation coverage	0.782	-0.406	0.224
降水 Precipitation/mm	-0.436	-0.214	0.165
气温 Temperature	0.804	0.287	-0.266
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	-0.818	-0.394	0.222
特征根 Characteristic root	3.604	1.40	1.161
解释率 Interpretation rate/%	40.00	15.60	12.90
累积解释率 Cumulative interpretation rate/%	40.00	55.60	68.50

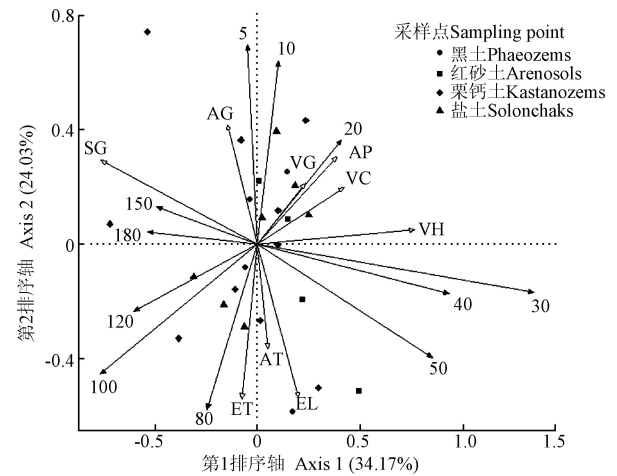
PC2 综合了植被高度和地上生物量的最大信息,能在一定程度上反映植被对土壤水分变异的影响,植被高度在第二主成分上呈正向分布,地上生物量呈负向分布。植被高度和地上生物量在不同海拔地区均呈现显著的相

关作用^[38], 植被越高表明其根系较发达, 根系利用土壤水分的速率加快, 可减缓土壤水分的运移, 具有固水固土的作用, 这与 Wu 等^[39]在研究干旱草原植被对土壤水文过程的影响结果相似, 而地上生物量越多表明植被对土壤水分的需求较多, 可能导致土壤水分变异性增强。PC3 为坡度和坡向, 在第三主成分上均呈正向分布。坡度和坡向对土壤水分变异产生一定的影响, 这与郭欣欣等^[9]研究结果相似, 地形因子影响降雨的下渗作用及地表产流和壤中流, 不同的土壤镶嵌结构以及植被多样性可控制坡面生态水文过程, 且 Qiu 等^[40]研究认为在土壤水分含量较低的地区, 地形因子的影响作用将更加显著。因此, 按照贡献率大小, 锡林河流域土壤水分变异的潜在环境影响因子, 分别为气象因素、植被因素以及坡度和坡向。

2.3.2 识别土壤水分变异的关键潜在环境驱动因子

为进一步了解潜在环境影响因子对土壤水分的影响, 并识别土壤水分变异的关键潜在环境驱动因子, 本研究按照土壤类型将采样点划分为 4 组, 并对土壤类型在环境因子中进行赋值处理(栗钙土为 1; 红砂土为 2; 盐土为 3; 黑土为 4), 将土壤类型作为协变量, 剥离其在环境影响因子对土壤水分作用下的干扰, 观测潜在环境因子对土壤水分的影响。通过 999 次 Monte Carlo 随机置换检验对各排序轴逐一进行检验, 并进行 P 值校正, 最终得到前两个排序轴均达到显著水平($P < 0.05$)。第一排序轴的解释率为 34.17%, 第二排序轴的解释率为 24.03%, 说明第一、第二排序结果可靠。前项选择法对潜在环境因子进行筛选, 9 项因子中, 只有海拔($P = 0.031$)和植被高度($P = 0.048$)对不同土壤类型采样点土壤水分的影响达到显著水平($P < 0.05$), 而其他环境因子未达到显著水平($P > 0.05$), 表明海拔和植被高度是影响土壤水分变异的关键潜在环境驱动因子。不同土层深度土壤体积分含水率及潜在环境影响因子的分布在 RDA 排序图中可以很好的表现出来(图 6), 前两个排序轴可以解释土壤水分变异的 58.20%。对 0~20 cm 土层深度的土壤水分产生正向影响的潜在环境因子主要有坡向、降水和地上生物量, 产生负向影响的潜在环境因子主要有海拔、气温和潜在蒸散发, 表明 0~20 cm 表层土壤水分更容易受到降水、太阳辐射、气温和植被生长的影响^[41]; 30~50 cm 土层深度的土壤水分主要受到植被高度和海拔的正向影响以及坡度的负向影响。随着土层深度的增加, 土壤温度与太阳辐射、气温的关联度逐渐降低, 植被汲取养分的能力减弱, 根系在此深度分布较少, 可能是植被的冠层结构和群落分布影响降雨入渗和土地蒸发过程, 从而对土壤水分产生了间接的影响^[32,41]。随着坡度的增加, 土壤水分与养分的流失速度加快, 且不利于降雨入渗^[41]; 80~180 cm 深层的土壤水分主要受到坡度和潜在蒸散发的正向影响, 植被高度的负向影响, 主要原因在于锡林河流域降水稀少, 深层土壤水分的补给源主要为地下水, 一定的坡度及热量传递, 将会增加地下水的侧向流补给并促进水分流动^[28,30], 而徐满厚等^[42]对草甸植被的研究

显示, 植被的生长对土壤水分热传递产生调节作用, 导致深层土壤水分变异性受到影响。采样点大致集中分布在降水较频繁、植被较丰富以及高海拔、高气温、蒸发强的两大区域, 体现了干旱半干旱地区草原型流域的典型特征, 说明样点布设具有一定的区域代表性。



注: 实心箭头代表不同土层土壤体积分含水率; 空心箭头代表影响因子; VH 代表植被高度, cm; VG 代表地上生物量, ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$); VC 代表植被盖度, %; AP 代表降水, mm; AT 代表气温, $^{\circ}\text{C}$; ET 代表潜在蒸散发, mm; EL 代表海拔, m; AG 代表坡向, ($^{\circ}$); SG 代表坡度, ($^{\circ}$)。

Note: Solid arrows represent the soil volumetric water content of different soil layers; hollow arrows represent influencing factors; VH represents the vegetation height, cm; VG represents aboveground biomass, ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$); VC represents the vegetation coverage, %; AP represents the precipitation, mm; AT represents the temperature, $^{\circ}\text{C}$; ET represents the potential evapotranspiration, mm; EL stands for altitude, m; AG stands for aspect, ($^{\circ}$); and SG stands for slope, ($^{\circ}$).

图 6 潜在环境影响因子及土壤体积分含水率冗余分析 (RDA) 排序图

Fig 6 Redundancy Analysis (RDA) sorting ordination of potential environmental impact factors and soil volumetric water content

土壤水分状态受到土壤物理属性、基岩裂隙分布以及地下水含水层的影响外, 与气候条件、植被生长及地形地理密切相关^[43]。草原型流域覆被大部分为草, 林地、耕地星点分布^[7], 冗余分析识别出海拔和植被高度是锡林河流域关键潜在环境驱动因子, 原因在于, 海拔会在一定程度上影响土壤的性质和养分含量以及植被与气候的变化, 从而进一步对土壤水分产生影响, 国内外研究表明海拔与土壤水分含量呈显著相关关系^[38,40,44]。植被对维护生态脆弱地区的安全至关重要^[6], 锡林河流域植被以草为主, 叶片面积小, 植被高度能在一定程度上反映植被的生长状况, 与地上生物量息息相关^[38]。植被生长的旺盛, 表明植被根系较发达, 可减缓土壤水分的运移, 具有防治水土流失的作用^[39]。在干旱半干旱草原型流域, 增强土壤储水能力, 适度放牧, 对促进四水转换, 调节牧草产量与土壤水分的关系具有积极作用, 在全球温暖化的进程中, 土壤水分对气候调节有直接影响^[37,43]。因此, 为防治水土流失, 改善流域气候条件, 应因地制宜考虑在不同土壤类型中制定不同的生态保护和恢复措施, 只有土壤水分条件得到改善, 才可以有效提高草原植被生产力, 促进当地农牧业发展^[36]。

3 结 论

1) 锡林河流域土壤水分含量介于 0.83%~16.69%, 整体偏低, 流域内 4 种土壤类型的土壤体积含水率由高到低依次表现为盐土、栗钙土、红砂土、黑土, 且不同土壤类型间土壤水分变化差异明显; 采样时段内, 流域土壤水分动态变化由大到小依次表现为 8 月、10 月、7 月、9 月。

2) 锡林河流域土壤水分变异性受到土壤类型的影响较显著。相同点在于, 随着土层深度的增加, 土壤体积含水率的变异性先增强后逐渐减弱, 0~50 cm 浅层土壤体积含水率的变异性大于深层土壤体积含水率。不同点在于, 随着时间的变化, 4 种土壤类型的土壤水分变异性差别较大, 由大到小依次表现为: 黑土 8 月、7 月、9 月、10 月; 盐土 9 月、8 月、7 月、10 月; 栗钙土 8 月、7 月、9 月、10 月; 红砂土 10 月、9 月、8 月、7 月。

3) 锡林河流域土壤水分变异的三大潜在环境影响因素, 研究将其分别划分为影响土壤水分散失的气象因素、植被因素及坡度和坡向。整体上在控制土壤类型对土壤水分的影响下, 海拔和植被高度是流域土壤水分变异的关键潜在环境驱动因子。

[参 考 文 献]

- [1] Liu Shuang, Gong Peng. Change of surface cover greenness in China between 2000 and 2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(22): 2835-2845.
- [2] 黎明扬, 刘廷玺, 罗艳云, 等. 半干旱草原型流域表层土壤饱和导水率传递函数及遥感反演研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 90-100.
Li Mingyang, Liu Tingxi, Luo Yanyun, et al. Pedo-transfer function and remote-sensing-based inversion saturated hydraulic conductivity of surface soil layer in Xilin River Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 90-100. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张圣微, 申芮, 陈哲, 等. 锡林郭勒草原植被生产力估算及其影响因素: 以巴拉噶尔河流域为例[J]. 中国草地学报, 2015, 37(4): 66-73.
Zhang Shengwei, Shen Rui, Chen Zhe, et al. Estimation of vegetation productivity in Xilingol steppe and analysis of the influencing factors: A case study in Balgar River Basin[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(4): 66-73. (in Chinese with English abstract)
- [4] Baldwin D, Manfreda S, Keller K, et al. Predicting root zone soil moisture with soil properties and satellite near-surface moisture data across the conterminous United States[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 393-404.
- [5] 李小雁. 水文土壤学面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5): 557-562.
Li Xiaoyan. Opportunity and challenges for hydrogeology[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(5): 557-562. (in Chinese with English abstract)
- [6] Fan Jiaqi, Xu Yan, Ge Haoyuan, et al. Vegetation growth variation in relation to topography in Horqin sandy land[J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106215-106224.
- [7] 张阿龙, 高瑞忠, 刘廷玺, 等. 高原内陆河流域气候水文突变与生态演变规律: 以内蒙古锡林河和巴拉格尔河流域为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5254-5263.
- [8] Zhang Along, Gao Ruizhong, Liu Tingxi, et al. Identification on hydrometeorology mutation characteristics and ecological evolution pattern of the plateau inland river basin-taken Xilin river and Balager river of Inner Mongolia for instance[J]. China Environmental Science, 2019, 39(12): 5254-5263. (in Chinese with English abstract)
- [9] Du Chuanli, Liu Xiaodong, Wu Wanli. CLM3-simulated soil moisture in East Asia and its possible response to global warming during 1979 through 2003[J]. Science in Cold and Arid Regions, 2009, 1(1): 51-58.
- [10] 郭欣欣, 付强, 卢贺, 等. 东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 123-130.
Guo Xinxin, Fu Qiang, Lu He, et al. Spatial variability and its controlling factors of soil moisture on cropland-forestland mixed hillslope in black soil area of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 123-130. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316.
Wang Yunqiang, Shao Mingan, Liu Zhipeng. Spatial variability of soil moisture at the regional scale in the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 310-316. (in Chinese with English abstract)
- [12] Choi M, Jacobs M. Spatial soil moisture scaling structure during soil moisture experiment 2005[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(6): 926-932.
- [13] 李小雁. 干旱地区土壤—植被—水文耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1721-1730.
Li Xiaoyan. Soil-vegetation-hydrological coupling, response and adaptation mechanism in arid areas[J]. Science in China: Earth Science, 2011, 41(12): 1721-1730. (in Chinese with English abstract)
- [14] 侯琼, 沈建国, 乌兰巴特尔. 典型草原区土壤水分变化特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(6): 42-48.
Hou Qiong, Shen Jianguo, Ulaan Baatar. Analysis of soil moisture characteristics and influencing factors in typical grassland areas[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(6): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [15] A Yinglan, Wang Guoqiang, Liu Tingxi, et al. Spatial variation of correlations between vertical soil water and evapotranspiration and their controlling factors in a semi-arid region[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 53-63.
- [16] Jian Shengqi, Zhao Chuanyan, Fang Shumin, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 206: 85-96.
- [17] Blyth E M, Finch J, Robinson M, et al. Can soil moisture be mapped onto the terrain?[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(5): 923-930.
- [18] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth Science Reviews, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [19] 赵燕东, 高超, 刘卫平, 等. 基于相位检测的高盐碱与高有机土壤水分传感器研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 151-158.
Zhao Yandong, Gao Chao, Liu Weiping, et al. Study of moisture sensor for high saline-alkali soil and high organic soil based on phase detection[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 151-158. (in Chinese with English abstract)
- [20] Albertson J D, Kiely G. On the structure of soil moisture time

- series in the context of land surface models[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 243(1/2): 101-119.
- [20] 郭焱. 锡林郭勒草原土壤含水量分布特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2018.
- Guo Tao. Study on Distribution Characteristics of Soil Water Content in Xilingol Grassland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [21] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. *山地学报*, 2003, 21(2): 149-156.
- He Qihua, He Yonghua, Bao Weikai. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 149-156. (in Chinese with English abstract)
- [22] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Irrigation and Drainage Paper NO.56[M]. Rome, Italy Allen: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998.
- [23] 席小康, 朱仲元, 郝祥云. 锡林河流域草原植物群落分类及其多样性分析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1320-1326.
- Xi Xiaokang, Zhu Zhongyuan, Hao Xiangyun. Grassland plant communities classification and diversity analysis in the Xilin River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1320-1326. (in Chinese with English abstract)
- [24] 智永明, 韩继伟, 邓超, 等. 基于原状土柱土壤水分传感器率定方法的研究[J]. *水文*, 2016, 36(4): 48-52.
- Zhi Yongming, Han Jiwei, Deng Chao, et al. Soil moisture sensor calibration method based on undisturbed soil column[J]. *Hydrology*, 2016, 36(4): 48-52. (in Chinese with English abstract)
- [25] 全国水文标准化技术委员会、水文仪器分技术委员会. 土壤水分(墒情)监测仪器基本技术条件: GB/T 28418-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [26] Tian Zhengchao, Ren Tusheng, Horton Robert, et al. Estimating soil bulk density with combined commercial soil water content and thermal property sensors[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 196: 104445-104452.
- [27] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [28] 郭中小, 魏永富, 廖梓龙, 等. 锡林河流域地下水位管理阈值研究[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(3): 479-486.
- Guo Zhongxiao, Wei Yongfu, Liao Zilong, et al. Threshold values of groundwater level management in the Xilin River Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3): 479-486. (in Chinese with English abstract)
- [29] 多兰, 于瑞宏, 张艳霞, 等. 锡林河流域降水量时空动态及对 NDVI 的影响[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(5): 63-72.
- Duo Lan, Yu Ruihong, Zhang Yanxia, et al. Temporal and spatial dynamics of precipitation in Xilin River Basin and its effect on NDVI[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(5): 63-72. (in Chinese with English abstract)
- [30] 赵坤. 草原内陆河浅滩—深潭序列中地表水—地下水交换对降水的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- Zhao Kun. Response of Surface Water-Groundwater Exchange to Rain falls in Riffle-Pool Sequence in Grassland Inland River[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [31] 乔江波, 朱元骏, 贾小旭, 等. 黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 515-522.
- Qiao Jiangbo, Zhu Yuanjun, Jia Xiaoxu, et al. Spatial variability of soil water for the entire profile in the critical zone of the Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 515-522. (in Chinese with English abstract)
- [32] 纪文瑶. 内蒙古草原生物量、地下生产力及其与环境因子关系研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2013.
- Ji Wenyao. The Study of Biomass, Belowground Productivity and Their Relationship with Environmental Factors in Inner Mongolia Grassland[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [33] 韩少杰, 王恩姮, 罗松, 等. 植被恢复对典型黑土表层土壤压缩性和承载能力的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(2): 31-34.
- Han Shaojie, Wang Enheng, Luo Song, et al. Effects of vegetation recovery on topsoil compressibility and load support capacity of typical black soil[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(2): 31-34. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘雅辉, 孙建平, 马佳, 等. 3 种耐盐植物对滨海盐土化学性质及微生物群落结构的影响[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2020[2020-4-23]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0049>.
- Liu Yahui, Sun Jianping, Ma Jia, et al. Effects of 3 salt-tolerant plants on chemical properties and microbial community structure of coastal saline soil[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020[2020-4-23]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0049>. (in Chinese with English abstract)
- [35] 马龙, 王静茹, 刘廷玺, 等. 2000—2012 年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 162-172.
- Ma Long, Wang Jingru, Liu Tingxi, et al. Response relationship between vegetation and climate factors in Horqin sandy land from 2000 to 2012[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 162-172. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张圣微, 张睿, 刘廷玺, 等. 锡林郭勒草原植被覆盖度时空动态与影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 253-260.
- Zhang Shengwei, Zhang Rui, Liu Tingxi, et al. Dynamics of fractional vegetation cover and its influence factors in Xilingol steppe[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 253-260. (in Chinese with English abstract)
- [37] 杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 390-397.
- Yang Dawen, Cong Zhentao, Shang Songhao, et al. Research advances from soil water dynamics to ecohydrology[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 390-397. (in Chinese with English abstract)
- [38] 高露, 张圣微, 朱仲元, 等. 放牧对干旱半干旱草原植物群落结构和生态功能的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 205-211.
- Gao Lu, Zhang Shengwei, Zhu Zhongyuan, et al. Effects of grazing on plant communities and ecological functions in typical steppe[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 205-211. (in Chinese with English abstract)
- [39] 武高林, 刘宇, 杨 Zheng, 等. 根通道指示土壤基质水入渗能力对弃采复垦土壤的影响[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 133-139.
- [40] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of*

- Hydrology, 2011, 240(3/4): 243-263.
- [41] 唐敏. 黄土丘陵区坡地土壤水热特征及其耦合效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- Tang Min. Characteristics of Soil Moisture and Temperature and Their Coupling Effects on Sloping Land in Loess Hilly Region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [42] 徐满厚, 刘敏, 薛娟, 等. 增温、刈割对高寒草甸地上植被生长的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 231-236.
- Xu Manhou, Liu Min, Xue Xian, et al. Effects of warming and clipping on the growth of aboveground vegetation in an Alpine meadow[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(2): 231-236. (in Chinese with English abstract)
- [43] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318.
- Lei Zhidong, Hu Heping, Yang Shixiu. A review of soil water research[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311-318. (in Chinese with English abstract)
- [44] 吴小刚, 王文平, 李斌, 等. 中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化[J/OL]. 土壤学报, 2020[2020-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200323.0951.002.html>.
- Wu Xiaogang, Wang Wenping, Li Bin, et al. Altitude gradient of soil organic carbon in forest soil in the mid-subtropical zone of China[J/OL]. Acta Soil Science, 2020[2020-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20200323.0951.002.html>. (in Chinese with English abstract)

Analysis of soil moisture variation and its influencing factors in semi-arid steppe watershed

Zhang Lu¹, Zhu Zhongyuan^{1,2*}, Zhang Shengwei^{1,2,3}, Wang Huimin¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, China;

3. Data Research Laboratory of Inner Mongolia Autonomous Region and Large Agricultural Applications, Hohhot 010018, China)

Abstract: Soil moisture is an important part of the lithosphere-biosphere-atmosphere-hydrosphere, and which is the main limiting factor for plant growth in watersheds of the semi-arid steppe as well. This study aimed to explore the characteristics of soil moisture variation and its potential environmental impact factors. This study had a significant effect on maintaining steppe ecosystem health, such as promoted the understanding of the eco-hydrological cycle of grassland and degraded grassland restoration. The Xilin River Basin located in the middle east of Inner Mongolia was chosen as the study area. The experiments had been performed in May 2019. Two meters of soil moisture detection tube was buried at each sampling point after removing the ground cover and floating soil. Besides, the soil moisture measurement depth was set from 0 cm to 180 cm. Soil moisture data were observed by using the Time Domain Reflectometry (TDR) at 55 sampling points from July 22 to October 20 in 2019 after the soil layer was stabilized. Three replications were performed at each sample point. Such a soil survey was conducted within 3 days by twice a month in July and August, and once a month in the remaining months. Meanwhile, vegetation investigations were executed once a month, including vegetation height, vegetation coverage, and aboveground biomass. Besides, 3 original soil samples were brought back from the field for calibrating the TDR in the laboratory. It was indicated that the TDR was reliable with guaranteed that the soil moisture data used in the calibration formula was ranged from saturation to dryness completely. Based on the observed soil moisture and affiliated data in the field the characteristics of soil moisture changed in the vertical profiles, as well as its potential environmental impact factors were analyzed and compared among 4 soil types by using Principal Component Analysis (PCA) and Redundancy Analysis (RDA). The results indicated that the soil moisture in the Xilin River Basin was low overall. The changes in soil moisture at different soil depths over time were similar in kastanozems and arenosols while they had a great difference in solonchaks and phaeozems. Moreover, the soil moisture content of Phaeozems, Arenosols, Kastanozems, and Solonchaks increased sequentially of the basin. The variability of soil moisture in each layer was greatly affected by the soil type, and the variability weakens as the depth of the soil layer increases. At the same time, great differences in the variability of soil moisture among 4 soil types were found after the changes in soil moisture in different sampling periods were compared and analyzed. PCA indicated that 3 principal components containing information such as altitude, vegetation height, and slope, etc., which were sufficient to explain 68.50% of the soil moisture variation where PC1 and PC2 accounted for 40.00% and 15.60% respectively. In detail, the PC1 included altitude, potential evapotranspiration, air temperature, and vegetation coverage, and the PC2 integrated information of vegetation height and aboveground biomass, and the PC3 was slope and aspect. Consequently, the meteorological factors that affected soil moisture evaporation, vegetation factors, and slope and aspect factors were summarized as the main potential environmental impact factors of soil moisture variations in the Xilin River Basin. Altitude and vegetation height was defined as the key above-ground potential environmental factors driving the soil moisture variation by RDA. Meanwhile, the impact factors that affected soil moisture changes at different depths were different. The results of this study were conducive to understanding the soil moisture conditions and its distribution of different soil types in the Xilin River Basin, and also would provide data and theoretical support for the study of eco-hydrological processes in the semi-arid grassland watersheds.

Keywords: soil; drought; water content; grassland; Xilin River