DOI: 10.20103/j.stxb.202406131376

王平顺,臧旭超,燕亚平,韩学敏,李璐,厚富来,杨学东,季亚新,董少刚.干旱-半干旱煤矿区地下水位变化对土壤特征的影响及植被响应.生态学报,2025,45(2):802-812.

Wang P S, Zang X C, Yan Y P, Han X M, Li L, Hou F L, Yang X D, Ji Y X, Dong S G.Effects of groundwater level changes on soil characteristics and vegetation response in arid-semi-arid coal mining areas. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2):802-812.

干旱-半干旱煤矿区地下水位变化对土壤特征的影响 及植被响应

王平顺^{1,2}, 臧旭超³, 燕亚平⁴, 韩学敏^{1,2}, 李 璐^{1,2}, 厚富来^{1,2}, 杨学东^{1,2}, 季亚新^{1,2}, 董少刚^{1,2,*}

1 内蒙古大学生态与环境学院,呼和浩特 010021

2 内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室,呼和浩特 010021

3 内蒙古第一水文地质工程地质勘查有限责任公司,呼和浩特 010021

4 内蒙古生态环境科学研究院有限公司,呼和浩特 010021

摘要:干旱-半干旱地区采煤活动往往会导致含水层疏干、湖泊萎缩消失、植被衰退、地表荒漠化等一系列生态环境问题。煤矿 开采排水是引起地下水-土壤-植被系统发生演化的主要驱动力。以泊江海子流域为例,在水文地质及生态植被调查的基础上, 使用数理统计、线性回归、相关分析等方法揭示了煤矿开采活动影响下的地下水位变化对土壤特征的影响及地表植被的响应机 制。结果表明,地下水埋深与土壤含水率、土壤电导率、土壤有机质、土壤速效氮以及土壤速效钾之间均存在着显著的负相关 性。采矿活动导致土壤性质发生了改变,使其留存水分和营养物质的能力大幅度减弱,在采矿影响范围内的土壤含水率、有机 质、速效氮、速效钾等含量相较于矿区周边明显降低。在地下水位埋深<0.5m的湖滨带存在严重的土壤盐渍化,此处植被生长 所需水分主要来源于地下水,因此仅分布有少数几种喜水耐盐碱的植物;当地下水埋深在 0.5—7m 时,地表植被生长受地下水 和大气降水的双重影响,因此这些地区主要生长的是半依赖地下水型植物。当地下水埋深>7m 时,地下水难以借助毛细作用 力上升至植被根系,植被群落获取水分的主要条件为大气降水,这些地区主要生长着耐旱型植被。

关键词:地下水;地下水-土壤-植被系统;生态演化;煤矿区;泊江海子矿

Effects of groundwater level changes on soil characteristics and vegetation response in arid-semi-arid coal mining areas

WANG Pingshun^{1,2}, ZANG Xuchao³, YAN Yaping⁴, HAN Xuemin^{1,2}, LI Lu^{1,2}, HOU Fulai^{1,2}, YANG Xuedong^{1,2}, JI Yaxin^{1,2}, DONG Shaogang^{1,2,*}

1 School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

2 Key Laboratory of River and Lake Ecology of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010021, China

3 Inner Mongolia First Hydrogeological Engineering Geological Exploration limited liability company, Hohhot 010021, China

4 Inner Mongolia Academy of Ecological Environment Science limited liability company, Hohhot 010021, China

Abstract: Coal mining activities in arid-semi-arid regions often lead to a series of ecological and environmental problems such as aquifer desiccation, lake shrinkage and disappearance, vegetation decline, and surface desertification. Coal mining drainage is the main driving force that causes the evolution of groundwater-soil-vegetation system. In this paper, based on hydrogeological and ecological vegetation surveys, we used mathematical statistics, linear regression, correlation analysis

基金项目:国家自然科学基金项目(42267025);内蒙古自治区自然科学基金(2024MS04020)

收稿日期:2024-06-13; 网络出版日期:2024-10-11

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: groundwater@163.com

and other methods to reveal the effects of groundwater level changes on soil characteristics and the response mechanism of surface vegetation under the influence of coal mining activities, taking the Bojianghaizi watershed as an example. The results showed that there was a significant negative correlation between groundwater depth and soil moisture content, soil conductivity, soil organic matter, soil available nitrogen and soil available potassium. Mining activities have led to changes in soil properties, which has greatly weakened its ability to retain water and nutrients. The contents of soil water content, organic matter, available nitrogen and available potassium in the mining area are significantly lower than those in the surrounding areas. There is serious soil salinization in the lakeshore zone where the depth of groundwater table is <0.5m, and the water required for the growth of vegetation here mainly comes from groundwater, so there are only a few kinds of water-loving and saline-resistant plants; when the depth of groundwater is 0.5—7m, the growth of surface vegetation is subjected to the double influence of groundwater and atmospheric precipitation, so the main growth in these areas is semi-dependence on groundwater-type plants. When the depth of groundwater is >7m, it is difficult for groundwater to rise to the root system of vegetation by capillary force, and the main condition for vegetation communities to obtain water is atmospheric precipitation, so drought-tolerant vegetation mainly grows in these areas.

Key Words: groundwater; groundwater-soil-vegetation system; ecological evolution; coal mine area; Bojianghaizi Mine

干旱-半干旱区地下水系统对保障供水及维护区域生态环境稳定具有重要的作用[1-2]。在依赖地下水的 生态系统当中,地下水是当地植物的永久水源,对植物群落组成、生理特性和生态稳定具有着重要的控制作 用^[3]。地下水位以及水化学特征的变化通常对土壤中的诸多环境因子(如温度、含水率、含盐量、有机质、pH、 Eh 以及相关化学物质浓度等)与植被物种丰富度和覆盖度等具有明显的影响^[4-5]。如 Deng 等在研究中国干 旱区科尔沁草地退化的原因时发现,地下水位埋深在 3.5m 以内时,随着水位的下降植被覆盖度会明显降 低[6]。半干旱地区的地下水位下降会导致植被生物总量减少.若通过地下水补水等途径.使得地下水位上升 可改善这一状况^[7]。干旱-半干旱区地下水位的增加会有助于植被的生长和恢复,然而,当水位大幅度上升淹 没植被的根部后,会导致植被根部缺氧,从而引发植被死亡^[8]。地下水埋深除了会影响植被群落的生长状况 之外,还会与植被群落协同影响土壤的性质^[9]。Guan 等研究滨海湿地地下水埋深的变化对土壤含氮量的影 响时发现,整体上土壤含氮量是随着地下水埋深的减少而增加的,并且土壤含水率和植被物种丰富度高的土 壤会更有利于氮和有机物的积累^[10]。Maertens 等在研究阿根廷查科地区土壤盐渍化问题时发现,森林植被 的破坏使得该区域内地下水无法被有效吸收和利用,进而导致地下水位的上升,溶解在水中的盐分随着地下 水位的上升迁移到地表,并在水分蒸发后留存下来,最终引发了当地土壤的盐渍化问题[11]。当地下水位发生 变化时,土壤特征也会随之改变从而影响地表植被的生长^[12-13]。Qi在研究迁安市地下水埋深-土壤-植被的 关系时发现,当地下水位埋深<2.2m时,地表水分通过毛细管蒸发并进行盐分累积,会引发土壤盐渍化,进而 影响土地结构与土壤性质,导致植被多样性降低[14]。

干旱-半干旱地区的煤矿山开发活动常常导致区域地下水位大幅度下降、地表水干涸(湖泊消失)、地面沉降、植被物种灭绝等问题^[15-17]。煤矿山地质生态环境演变是人类活动对其系统的结构和功能损坏的综合响应^[18-19]。煤矿开采会使矿区含水层结构发生变化,破坏地下水原有的自然存储条件,引发地下水位下降,进而导致依赖地下水型生态系统发生演替^[20]。Thakur等在研究印度中央邦阿努普尔区的科特马煤矿时发现,随着煤矿开采活动的进行,当地土地和植被的脆弱性变得显著,原生植被覆盖度出现大幅度下降,植被种类数量也随之不断减少,并逐渐演替为次生植被^[21]。除此之外,煤矿开采活动还会显著改变矿区内的土壤性质,主要表现为矿区内的土壤结构被破坏,进而使土壤保存营养物质的能力大幅度减弱^[22]。煤矿开采活动导致的地面沉降会使得表层土壤中的有机质和营养盐分流失^[23]。Zhang等基于对中国昭谷煤矿场的180个土壤样品检测发现,随着土壤深度的增加(从<20cm到20—40cm,再到40—60cm),土壤有机质的含量依次减少,此外,土壤有机质含量还随着矿坑坡度和深度的增加而降低^[24]。除了煤矿区地下水埋深变化会影响植被长势及群落的分布之外,地下水水质同样对植被生态具有制约作用^[25]。如 Zerizghi等对南非格林赛德矿区的研

究表明,在煤炭开采过程中,重金属会进入矿区土壤和地下水,并对周边依赖地下水的植被及作物产生持续的 毒害作用,进而使植被枯萎死亡^[26]。

目前,大多数学者主要关注于地下水位变化对土壤性质或植被群落特征的影响研究,然而对地下水-土 壤-植被三者之间耦合关系的研究却相对较少。为了揭示干旱-半干旱煤矿区地下水位-土壤-植被系统的演变 机制,本研究以泊江海子流域为例,在水文地质、生态植被调查的基础上,分析地下水位埋深、土壤性质(土壤 含水率、土壤含盐量、土壤电导率、土壤有机质、土壤速效钾、土壤速效氮)及地表植被(植被覆盖度和植被丰 富度)之间的关系。本研究为研究煤矿山地下水-土壤-植被生态系统提供了一种新的研究思路,并为在类似 地区开展地下水-土壤-植被调查提供了一定的启示。此外,本研究不仅为全球类似矿山的可持续开发与环境 保护提供了科学依据,而且在指导煤矿区域生态治理和水资源合理利用方面具有重要意义。

1 研究区概况

泊江海子流域(109°15′59″—109°24′18″E,39°50′16″—39°53′5″N)位于中国内蒙古自治区鄂尔多斯市,地 处毛乌素沙地和库布齐沙漠接壤地带(图1)。该区属温带高原大陆性气候,太阳辐射强烈且干燥,风沙多,年 均气温在 5.2℃左右,年均降水量为 396mm/a,年均蒸发量为 2534mm/a。研究区地形整体是四周高中间低, 流域中部的桃-阿海子湖泊为区域内最低点。当地属高原半沙漠地貌特征,按形态可分为台地、沟谷、湖盆滩 地、沙地等地貌类型。流域内大部分地区为风积沙地,第四系广泛分布,白垩系岩段在研究区零星出露,区内 植被稀疏,为半荒漠地区。泊江海子煤矿位于流域北部,东西长约 13.2km,南北宽达 4.6km,面积约 59.69km²。 矿区已探查储矿量为 6.759×10⁶t,可开采矿储量 3.647×10⁶t,当前井田生产能力为 3×10⁶t/a。

区内潜水含水层主要由第四系风积沙和白垩系砂岩构成。受地形影响,流域内潜水由四周山地向中部的 湖泊(桃-阿海子湖泊)径流排泄。由侏罗系和三叠系岩层构成的承压含水层埋深大(平均厚度约为35m),与 潜水含水层(厚度主要为5—15m)之间存在厚度较大且分布稳定的隔水层,因此它们之间的水力联系并不密 切。受区域构造和沉积环境的影响,承压水总体上由南向北流动。

研究区土壤类型主要有栗钙土、草甸栗钙土、固定风沙土和粗骨土四种。受煤矿开发活动的影响,矿区原 有的典型植被已经退化,大部分已被沙生植被、灌丛植被所取代。流域内现主要生长的植物有戈壁针茅 (Stipa tianschanica Roshev. var. gobica (Roshev.) P. C. Kuo)、黄花蒿(Artemisia annua L.)、狗尾草(Setaria viridis (L.) P. Beauv.)、百里香(Thymus mongolicus (Ronniger) Ronniger)、冷蒿(Artemisia frigida Willd.)、羊草 (Leymus chinensis (Trin. ex Bunge) Tzvelev)、沙蒿(Artemisia desertorum Spreng.)、猪毛菜(Kali collinum (Pall.) Akhani & Roalson)、芨芨草(Neotrinia splendens (Trin.) M. Nobis, P. D. Gudkova & A. Nowak)、野苜蓿 (Medicago falcata L.)、尖头叶藜(Chenopodium acuminatum Willd.)等。

2 材料与方法

本研究以桃-阿海子湖泊为中心,沿着地下水流动路径上,在湖泊的南北两侧各布设一条样线,共布置了 12个样地(图1),并在每个样地开展了土样、植被和地下水位埋深调查。土样采集过程中使用的是表层土壤 调查法,在每个样地处挖开深度为5—20cm的土壤进行土壤采集。对于采集到的土壤样品主要检测含水率、 容重、pH、EC、有机质、速效氮和速效钾共7项指标(检测设备和标准见表1)。水文地质调查内容主要包括了 地下水水位、地下水含水层特征、包气带岩性等。在植被的调查中采用的是1m×1m的样方调查法,在每个样 地内均设置了3—4个样方。植被调查的内容包括植被种类、物种丰富度、优势种、覆盖度等指标。

3 结果与分析

3.1 地下水位埋深变化与土壤性质的关系

由于研究区面积小(760km²)、气候变化一致,根据流域地形地貌特征,在没有人为破坏干预的自然状态



图1 泊江海子区位图 Fig.1 Location map of Bojianghazi

下,理论上以桃-阿海子湖泊为中心,湖泊南北两侧的土壤理化指标和植被群落的种类及生长状况应具有一定 的对称性。泊江海子煤矿在 2008 年之前,矿区内地下水位埋深在 4—7m 左右。而从 2008 年后至今,由于受 煤矿开采影响,泊江海子流域地下水系统特征与往年自然条件下相比已经发生了显著改变。受地形影响,在 自然状态下该区域地下水位埋深距离桃-阿海子湖越近埋深越浅。然而采煤活动导致矿区中心处形成地下水 降落漏斗,矿区地下水位相较于周边地区明显下降(Y4、Y5)。受采矿影响明显的湖泊北侧,地下水位埋深从 16.05m(Y1)逐渐降低至7.20m(Y3),而后在矿区增大至23.19m(Y4),再向湖泊方向逐渐降至0.33m(Y8);未 受采矿影响的湖泊南侧,地下水位埋深则从 22.80m(Y14)逐渐降低至 0.47m(Y9)(图 2)。

表1 土壤检测指标测量方法、使用设备及行业标准			
Table 1 Soil testing index measurement methods, equipment and industry standards			
检测指标 Testing index	检测方法 Detect method	操作设备 Operation equipment	中国行业标准 China industry standards
土壤有机质 Soil organic matter	重铬酸盐氧化外加热法	恒温油浴锅	NY/T 1121.6—2006
土壤含水率 Soil moisture content	烘箱干燥法	烘箱	LY/T 1213—1999
土壤容重 Soil bulk density	环刀法	环刀	F-HZ-DZ-TR-0021
土壤 pH Soil pH	电极法	多参数分析仪	NY/T 1377—2017
土壤电导率 Soil electrical conductivity	电极法	多参数分析仪	НЈ 802—2016
土壤速效钾 Soil available potassium	火焰光度法	火焰光度计	NY/T 889—2004
土壤速效氮 Soil available nitrogen	碱性扩散法	扩散皿	_

http://www.ecologica.cn

经过对土壤、植被特征的统计分析后发现(图3),泊江海 子流域地下水位极限埋深为7m左右,从而可将研究区内 依赖地下水的植被系统与降水驱动的植被系统区分开 来^[27]。当地下水位在7m以内时,土壤含水率、电导率、 有机质、速效钾、速效氮、pH和植被覆盖度均随着地下水 位埋深的增加而明显减少;相反,当超出地下水极限埋深 时,各检测指标随地下水位埋深增大变化不明显。

3.1.1 地下水位埋深变化与土壤含水率、土壤电导率的关系

在研究区内距离湖泊最近的 Y8、Y9 处土壤含水 率、土壤电导率最高,分别达到 30.13%、5336.36µs/cm 和 28.67%、5257.57µs/cm;土壤含水率在 Y4、Y14 处最





低,都仅为1.86%;土壤电导率在Y1和Y14处最低,仅为2545.45 μ s/cm、1954.55 μ s/cm(图3)。湖泊南北两侧的土壤含水率、土壤电导率均在湖泊周边最高,当地下水埋深在7m以内时,二者均随着地下水位埋深的增大而减少,并在埋深>7m后趋于稳定。湖泊南侧土壤含水率和土壤电导率与离湖泊的距离之间的拟合方程分别为: $y=-1.13\ln(x-39.01)+12.50(R^2=0.999)$ 、 $y=-441.73x\ln(x-30.74)+6218.92(R^2=0.989)$ 。综合湖泊南北两侧,研究区域内土壤含水率和土壤电导率与地下水位埋深之间呈对数关系(图3),其拟合方程分别为: $y=-4.45\ln(x-0.31)+13.76(R^2=0.896)$ 、 $y=-446.78\ln(x-0.30)+3828.91(R^2=0.821)$ 。

已有研究表明,包气带中表层土壤的水分和盐分含量主要是由地下水位埋深和毛细上升高度二者共同决定的^[28]。首先,在毛细上升高度内,地下水和其溶解的盐分可以直接进入土壤^[29];其次,随着水分和盐分的进入改变了土壤的地球化学环境,导致原先土壤中的生物地球化学反应发生变化,进而对地表植被的结构和功能属性产生影响^[30]。此外,随着地下水埋深的增加,毛细上升高度将难以支撑水分及其所溶解盐分迁移至地表。因此,在湖泊南北两侧离湖泊最近的 Y8、Y9 处,由于其地下水位埋深最浅,且处于毛细水上升高度范围内,地下水能够借助毛细作用力将水分和盐分输送到表层土壤,进而使得土壤含水率和土壤电导率为研究区内的最高值。

3.1.2 地下水位埋深变化与土壤有机质、土壤速效氮、土壤速效钾的关系

土壤有机质、土壤速效氮、土壤速效钾是评价土壤肥力的重要指标,其与土壤的物理结构、化学性质以及 生物活性等紧密相关^[31-33]。尽管不同区域、不同尺度下的土壤肥力指标可能会有所差异,但已有研究表明, 在自然状态下,土壤有机质、土壤速效氮、土壤速效钾的含量主要受到植物与微生物固定和消耗水平的相对强 度的影响^[34-36]。土壤有机质、土壤速效氮、土壤速效氮含量在距离湖泊最近、地下水位埋深最浅的 Y8 和 Y9 处最高,分别为 60.90g/kg、387.04mg/kg、7.38mg/kg 和 64.70g/kg、390.81mg/kg、7.51mg/kg;土壤有机质与土 壤速效氮在地下水位埋深最大的 Y4 和 Y14 处最低,土壤速效钾在距离湖泊最远的 Y1 和 Y14 处最低,分别为 16.10g/kg、1.54mg/kg、29.44mg/kg 和 22.40g/kg、1.95mg/kg、30.32mg/kg(图 3)。在湖泊南侧,土壤有机质、土 壤速效钾和土壤速效氮与离湖泊的距离均表现为对数关系,其拟合方程分别为: $y = -10.53\ln(x+132.24) +$ 119.26($R^2 = 0.953$)、 $y = -51.56\ln(x-28.82) + 510.45(<math>R^2 = 0.995$)、 $y = -0.53\ln(x-37.64) + 7.68(<math>R^2 = 0.933$)。而 在受采矿影响的湖泊北侧,三者与离湖泊的距离关系并不明显。综合湖泊南部两侧,研究区域内三者与地下 水位埋深之间呈对数关系,其拟合方程分别为: $y = -10.35\ln(x-0.04) + 51.13(R^2 = 0.944)$ 、 $y = -67.37\ln(x-0.26) + 229.20(R^2 = 0.954)$ 、 $y = -0.88\ln(x-0.28) + 4.91(R^2 = 0.791)$ 。

由于泊江海子流域农田分布稀少,本次研究所选样地均为荒地(或沙地),植被群落处于自然生长状态,因此不存在人为外加营养源的干扰。由相关性分析可知(图4),研究区土壤有机质、土壤速效钾、土壤速效氮 含量与地下水位埋深之间均呈现出显著的负相关性(相关性系数分别为-0.85**、-0.78**、-0.76**),与植被



图 3 各采样点土壤特征

Fig.3 Soil characteristics of each sampling point

http://www.ecologica.cn



函4 地下小埕床-工壤口坝-值饭行证帽天口力们 Fig.4 Correlation analysis of groundwater depth-soil properties-vegetation characteristics

覆盖度之间呈现出显著的正相关性(相关性系数分别为0.86^{**}、0.76^{**}、0.83^{**})。在地下水位埋深较浅的区域内,由于植物覆盖度相对较高,土壤速效钾和速效氮不仅可以通过毛细作用随水分进入土壤,同时,丰富的植物残体也能为土壤提供有机质、速效氮和速效钾。湿润环境下的土壤微生物群落在功能上更为多样化,能够进行更多类型的代谢活动,更高效地分解地表植物残体以及其它有机物,从而增加土壤中有机质、速效氮与速效钾的含量^[37]。煤矿开发活动导致矿区处(Y4、Y5)地下水位从原先的4—7m 显著下降至20—24m,相较于湖泊南侧未开发影响区,矿区内地表土壤由于缺乏毛细作用所补给的水分和营养物质而土壤肥力相对较低。除此之外,煤矿开采活动会破坏土地结构和植被资源,这既会导致土壤与植被蓄水能力减弱,又会造成土壤中有机质的流失和损耗,土壤有机物等难以进行有效累积。此外,煤矿开采过程中所伴随的工业污染会对土壤、植被、微生物等环境因素产生负面效应,也不利于土壤有机质、土壤速效氮、土壤速效钾在土壤中的积累^[38—40]。

3.1.3 地下水位埋深变化与土壤 pH 的关系

矿区内 Y4、Y5 处土壤 pH 相较于其它采样点明显有所降低(Y4、Y5 处的 pH 分别为 6.78、7.53),在距离 湖泊最近的 Y8、Y9 处 pH 最高,分别为 10.22、9.89(图 3)。在未受煤矿开发活动影响的湖泊南侧,土壤 pH 与 离湖泊的距离表现为对数关系,其拟合方程分别为: $y=-0.29\ln(x+16.08)+11.04(R^2=0.907)$ 。通过对研究区 土壤 pH 拟合分析可知,随着地下水位埋深的减少,研究区土壤 pH 逐渐增大,土壤 pH 与地下水位埋深之间的 拟合方程为 $y=-0.63\ln(x+0.27)+9.81(R^2=0.766)$ 。

由于研究区采煤活动大量抽排地下水的行为已经导致矿区内原先密闭的地下环境变得开放,煤矿床中夹 杂着的硫铁矿和含硫有机物在氧气的作用下氧化产酸,并增加了矿物的溶解度,从而导致了矿区内土壤 pH 相对较低以及土壤电导率提升^[17]。

3.2 地下水埋深变化与植被的关系

在南北两侧距离湖泊最近的 Y8 和 Y9 处物种丰富度最低,分别仅生长了 4、5 种植物;在 Y6 和 Y10 处达 到最大,统计共生长了 18、19 种植物(图 5)。从 Y6 和 Y10 处起,随着与湖泊距离的增加,研究区域内的地表 植被物种丰富度开始逐渐降低。在矿区内 Y4、Y5 处的植被丰富度相较于矿区周边有所下降,其中,Y4 比 Y3

45 卷



图 5 各采样点植被特征 Fig.5 Vegetation characteristics of each sampling point

低出 7.14%, Y5 比 Y6 低出 33.33%。湖泊南北两侧在采样点 Y6 和 Y10 处分别测得植被覆盖度最大值为 80%、70%;在 Y4、Y14 处分别测得植被覆盖度最低值为 33%、29%。在湖泊附近 Y7 处,植被种类较低,其植被 覆盖度仅达到 40%。在矿区内采样点 Y4 和 Y5,其植被覆盖度相较于矿区周边明显降低,其中,Y4 比 Y3 低出 50.75%, Y5 比 Y6 低出 42.50%。通过对数据的拟合分析后发现,湖泊南侧植被覆盖度与离湖泊的距离之间的拟合方程为 y=-0.0042x+86.94(*R*²=0.931),而在受采矿影响的湖泊北侧,植被覆盖度与离湖泊的距离 关系并不明显。经综合分析,随着地下水位埋深的增加,植被覆盖度呈现显著减少的趋势,研究区域内植被覆 盖度与地下水位埋深之间符合线性关系,其拟合方程为:y=-1.78x+78.56(*R*²=0.561)。

在干旱半干旱地区,由于降水量少,水分蒸发量大,地下水资源常成为植被生长依赖的关键水源^[41]。在 地表-包气带-饱水带的层次关系中,植被根系主要分布在包气带中,包气带岩性及水文地球化学特征对植被 的生长状况具有重要影响^[42]。研究区地下水位埋深与植被覆盖度之间存在着显著的负相关性(相关性系数 为-0.923**)(图4)。在湖滨带地下水埋深<0.5m的区域内,由于土壤含水率高,蒸发强烈,导致水分不断散 失而盐分不断在表层土壤中累积,最终形成了高盐的土壤环境。在此区域内所生长的植被主要依赖地下水获 取水分,并且能够较强地适应高盐高碱的环境,因此植被种类较为稀少,主要为喜水耐盐型的赖草、芨芨草、野 苜蓿等(图6)。当地下水埋深在0.5—7m时,由于该处土壤有机质、土壤速效钾和土壤速效氮等含量相对较 高,并且处于毛细水上升高度的范围内,使得该区域土壤肥力水平高。这些区域内生长的植被种类相对丰富, 大部分植被除了从大气降水获取水分外,还能通过地下水获得补给,因此具备一定的耐旱能力。这些地区主 要生长的是半依赖地下水型植被,如戈壁针茅、黄花蒿、狗尾草、猪毛菜等。当地下水埋深>7m时,地下水难 以借助毛细作用力上升至植被根系,植被群落获取水分的主要条件为大气降水,从而使得植被群落从半依赖 地下水型转变为耐旱型,主要生长的植物种类为戈壁针茅、羊草、黄花蒿、狗尾草、百里香、沙蒿等。地下水位 变化引发的植被演替在矿区内(Y4、Y5)尤为显著。在没有进行采矿活动之前,矿区内 Y4、Y5 处的地下水位 埋深在4—7m,应生长着半依赖地下水型植物种类,例如黄花蒿、羊草、尖头叶藜等。由于煤炭开采活动大量



811

抽排地下水,导致矿区处地下水位骤降并形成了地下水降落漏斗,进而破坏了原生地下水-土壤-植物系统的 稳定性,促使矿区内的植被群落发生演变,现在此处多生长为羊草、戈壁针茅、黄花蒿、沙蒿等耐旱型植被。

4 结论

(1)研究区内地下水位埋深与土壤含水率、电导率、有机质、速效钾、速效氮、pH 和植被覆盖度之间均存 在着显著的负相关性。当地下水位埋深小于地下水极限埋深(7m)时,土壤含水率、电导率、有机质、速效氮、 速效钾、pH 以及植被覆盖度均随着地下水埋深的减少而增大;当地下水位埋深大于地下水极限埋深时,各检 测指标随地下水位埋深增大变化不明显。

(2) 在桃-阿海子湖泊北侧的煤矿区,由于开采煤炭需要大量抽排地下水,因此造成矿坑中心地下水埋深 骤增,水分和营养盐分难以借助毛细作用进入表层土壤当中。另外,矿区内的土壤结构被破坏,水分与营养物 质的蓄积能力大幅度减弱,表现为该处的土壤含水率、土壤有机质、土壤速效氮、土壤速效钾含量相对降低。 植被种类主要以耐旱型植被为主且植被覆盖度较低。

(3)湖泊南北两侧,在地下水位埋深<0.5m的湖滨带存在严重的土壤盐渍化,此处植被生长所需水分主要来源于地下水,因此仅分布有少数几种喜水耐盐碱的植物,如赖草、芨芨草、野苜蓿等;当地下水埋深在0.5—7m时,地表植被生长受地下水和大气降水的双重影响,这些地区主要生长的戈壁针茅、黄花蒿、狗尾草、猪毛菜等植物,物种丰富度较高。当地下水埋深>7m时,地表植被仅依靠有限的大气降水获取水分,这些地区主要生长着耐旱型植物,如戈壁针茅、羊草、黄花蒿、狗尾草、百里香、沙蒿等。

参考文献(References):

- [1] 陈俊芳, 吴宪, 杨佳绒, 刘啸林, 刘宇. 全球气候变化下干旱及复水对植物和土壤微生物的影响:进展与展望. 生态学杂志, 2023, 42 (12): 3038-3049.
- [2] 刘英, 雷少刚, 李心慧, 王藏姣, 宫传刚. 干旱矿区植被引导型修复中干旱阈值的生态机制. 煤炭学报, 2023, 48(6): 2550-2563.
- [3] 朱兴宇, 粟晓玲, 胡雪雪, 褚江东, 贾丹妮, 吴海江, 张特. 协同调控水-农业-生态的干旱区多水源优化配置. 农业工程学报, 2024, 40 (2): 239-248.
- [4] 于航,冯天骄,卫伟,王平.晋西黄土区土壤理化特征对长期植被恢复的响应.生态学报,2024,44(7):2873-2885.
- [5] 李中恺,李小雁,周沙,杨晓帆,付永硕,缪驰远,王帅,张光辉,吴秀臣,杨超,邓元红.土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展.中国科学:地球科学,2022,52(11):2105-2138.
- [6] Deng W, Chen M J, Zhao Y, Yan L, Wang Y, Zhou F. The role of groundwater depth in semiarid grassland restoration to increase the resilience to drought events: a lesson from Horqin Grassland, China. Ecological Indicators, 2022, 141: 109122.
- [7] 雷逸甦, 粟晓玲, 褚江东, 张特, 刘雨翰. 基于生态系统恢复力的干旱区植被生态需水阈值计算方法与应用. 湖泊科学, 2024, 36(2): 645-656.
- [8] Naumburg E, Mata-gonzalez R, Hunter R G, Mclendon T, Martin D W. Phreatophytic vegetation and groundwater fluctuations: a review of current research and application of ecosystem response modeling with an emphasis on great basin vegetation. Environmental Management, 2005, 35(6): 726-740.
- [9] 饶洁, 唐强, 冯韫, 韦杰, 贺秀斌. 三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式. 水土保持学报, 2024, 38(1): 310-318.
- [10] Guan Y N, Bai J H, Wang J J, Wang W, Wang X, Zhang L, Li X W, Liu X H. Effects of groundwater tables and salinity levels on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in coastal wetlands with different plant cover types in a Chinese Estuary. Ecological Indicators, 2021, 121: 106969.
- [11] Maertens M, De Lannoy G J M, Vincent F, Massart S, Giménez R, Houspanossian J, Gasparri I, Vanacker V. Spatial patterns of soil salinity in the central Argentinean Dry Chaco. Anthropocene, 2022, 37: 100322.
- [12] 郝帅,李发东.艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究.地理学报,2021,76(7):1649-1661.
- [13] 陈喜,黄日超,黄峰,刘秀强,张阳阳,张润润.西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究.水文地质工程地质,2022,49 (5):12-21.
- [14] Qi Z W, Xiao C L, Wang G, Liang X J. Study on ecological threshold of groundwater in typical salinization area of Qian'an County. Water, 2021, 13(6): 856.
- [15] 李禹凝, 王金满, 张雅馥, 朱秋萍, 王敬朋. 干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展. 土壤, 2023, 55(3): 494-502.
- [16] 李全生,李淋,方杰,周伟,雷少刚,包玉英,崔明.北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术.煤炭科学技术,2024,52(1): 323-333.

- [17] 王平顺, 苗新岳, 燕亚平, 董生旺, 董少刚. 内蒙古伊敏盆地地下水水化学特征及其成因. 干旱区研究, 2024, 41(3): 411-420.
- [18] 陈悦,董少刚, 王磊, 侯庆秋. 1979—2017 年泊江海子流域桃-阿海子湖泊面积变化及影响因素研究. 海洋湖沼通报, 2023, 45(1): 129-137.
- [19] 韩旭,周建伟,冯海波.贺兰山露天煤矿生态修复前后植物群落差异及地境结构研究.安全与环境工程,2022,29(1):234-241.
- [20] Sun K, Fan L M, Xia Y C, Li C, Chen J P, Gao S, Wu B Y, Peng J, Ji Y W. Impact of coal mining on groundwater of Luohe formation in Binchang mining area. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 8(1): 88-102.
- [21] Thakur T K, Dutta J, Bijalwan A, Swamy S L. Evaluation of decadal land degradation dynamics in old coal mine areas of Central India. Land Degradation & Development, 2022, 33(16): 3209-3230.
- [22] Rouhani A, Gusiatin M Z, Hejcman M. An overview of the impacts of coal mining and processing on soil: assessment, monitoring, and challenges in the Czech Republic. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(11): 7459-7490.
- [23] Pandey B, Mukherjee A, Agrawal M, Singh S. Assessment of seasonal and site-specific variations in soil physical, chemical and biological properties around opencast coal mines. Pedosphere, 2019, 29(5): 642-655.
- [24] Zhang H J, Liu W K, Zhang H B, Fan L X, Ma S C. Spatial distribution of soil organic matter in a coal mining subsidence area. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 2019, 70(2): 117-127.
- [25] Yang Y J, Erskine P D, Zhang S L, Wang Y J, Bian Z F, Lei S G. Effects of underground mining on vegetation and environmental patterns in a semi-arid watershed with implications for resilience management. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(17): 605.
- [26] Zerizghi T, Guo Q J, Tian L Y, Wei R F, Zhao C Q. An integrated approach to quantify ecological and human health risks of soil heavy metal contamination around coal mining area. The Science of the Total Environment, 2022, 814: 152653.
- [27] Feng H B, Duan Y, Zhou J W, Su D H, Li R, Xiong R M. Effects of groundwater level decline on soil-vegetation system in semiarid grassland influenced by coal mining. Land Degradation & Development, 2024, 35(6): 2297-2312.
- [28] Dong S G, Liu B W, Ma M Y, Xia M H, Wang C. Effects of groundwater level decline to soil and vegetation in arid grassland: a case study of Hulunbuir open pit coal mine. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(5): 1793-1806.
- [29] Yeh P J F, Eltahir E A B. Stochastic analysis of the relationship between topography and the spatial distribution of soil moisture. Water Resources Research, 1998, 34(5): 1251-1263.
- [30] Zhang X L, Guan T Y, Zhou J H, Cai W T, Gao N N, Du H, Jiang L H, Lai L M, Zheng Y R. Groundwater depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert riparian ecosystem in an arid area of China. Forests, 2018, 9(1): 34.
- [31] 范家伟,朱广宇,上官周平,邓蕾.黄土丘陵区刺槐林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性动态变化.水土保持学报,2023,37(3):19-26.
- [32] 乐易迅,胡敏杰,肖琳,赖兴凯,王硕,丁思龙,李婷婷.河口湿地红树林植被恢复对土壤养分动态的影响.水土保持学报,2022,36 (3):333-337.
- [33] 安宁,郭彬,张东梅,杨淇越,罗维成.河西走廊中段荒漠植被组成及土壤养分空间分布特征.干旱区研究,2024,41(3):432-443.
- [34] Yu H X, Le Roux J J, Jiang Z Y, Sun F, Peng C L, Li W H. Soil nitrogen dynamics and competition during plant invasion: insights from *Mikania micrantha* invasions in China. New Phytologist, 2021, 229(6): 3440-3452.
- [35] Zhang L, Lv J P. Land-use change from cropland to plantations affects the abundance of nitrogen cycle-related microorganisms and genes in the Loess Plateau of China. Applied Soil Ecology, 2021, 161: 103873.
- [36] Hassanzadeh Bashtian M, Karimi A, Sepehr A, Lakzian A, Caballero E R. Spatial relationship of landform surface features and biocrusts, and their effect on soil microbial biomass on an alluvial fan. Earth Surface Processes and Landforms, 2024, 49(4): 1348-1360.
- [37] Zhao Y D, Hu X. The diversity and function of microbial community in the sediment and terrestrial area of thermokarst lakes. CATENA, 2023, 233: 107505.
- [38] Zhang H, Liu W, Hu Q, Huang X. Multi-Scale integration and distribution of soil organic matter spatial variation in a coal-grain compound area. Sustainability, 2023, 15(4); 3780.
- [39] Semhi K, Al Abri R, Al Khanbashi S. Impact of sewage and mining activities on distribution of heavy metals in the water-soil-vegetation system. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(5): 1285-1296.
- [40] Mirlean N, Roisenberg A. Fluoride distribution in the environment along the gradient of a phosphate-fertilizer production emission (southern Brazil). Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29(3): 179-187.
- [41] 王星, 霍艾迪, 吕继强, 赵志欣, 陈建, 钟芳倩, 杨璐莹, 管文轲. 塔里木河干流植被覆盖度动态变化及驱动因素分析. 农业工程学报, 2023, 39(8): 284-292.
- [42] 胡顺, 凌抗, 王俊友, 乔树锋, 葛孟琰, 孙自永, 马瑞. 西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 22-31.