

# 西辽河流域通辽平原区地下水埋深与 植被及土壤特征的关系

朱永华<sup>1</sup>, 张生<sup>1</sup>, 孙标<sup>1</sup>, 赵胜男<sup>1</sup>, 张颖<sup>2</sup>, 刘志强<sup>3</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 呼和浩特环境科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 通辽市水利规划设计研究院, 内蒙古 通辽市 028000)

**摘要:** [目的] 揭示地下水埋深与植物群落特征及土壤理化特性相关关系, 为西辽河流域通辽平原区生态环境健康和谐发展提供依据。[方法] 运用时空替代和土壤单重分形等方法, 定量分析植被群落和土壤颗粒变化特征, 并探讨二者对地下水埋深变化的响应机理。[结果] 不同地下水埋深条件下植被特征与多样性指标值大小顺序为  $2-3\text{ m} > 1-2\text{ m} > 0-1\text{ m} > (>4\text{ m}) > 3-4\text{ m}$ ; 研究区表层土壤粒度组成以粉粒为主, 其中粉粒含量在  $52.03\% \sim 84.78\%$  之间, 土壤颗粒平均粒径从大到小依次为  $3-4\text{ m}, >4\text{ m}, 0-1\text{ m}, 1-2\text{ m}$  和  $2-3\text{ m}$ , 颗粒分形维数分别为  $2.34 \sim 2.49$  之间; 分选级别分别为较差、差、较差、较差和差; 偏度等级分别为近于对称、近于对称、近于对称、负偏和负偏; 各种样地峰态均属很尖窄。[结论] 研究区植被群落的演替表现为随着地下水补给条件的变化呈非地带性草甸植被向地带性典型草原植被的演替过程, 地下水埋深  $2-3\text{ m}$  处为植被演替临界范围。

**关键词:** 地下水埋深; 植被; 土壤; 通辽平原区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)01-0029-08

中图分类号: P641, Q149

**文献参数:** 朱永华, 张生, 孙标, 等. 西辽河流域通辽平原区地下水埋深与植被及土壤特征的关系[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 29-36. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.005; Zhu Yonghua, Zhang Sheng, Sun Biao, et al. Relationship between groundwater depth and characteristics of vegetation and soil in Tongliao Plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 29-36.

## Relationship Between Groundwater Depth and Characteristics of Vegetation and Soil in Tongliao Plain

Zhu Yonghua<sup>1</sup>, Zhang Sheng<sup>1</sup>, Sun Biao<sup>1</sup>, Zhao Shengnan<sup>1</sup>, Zhang Ying<sup>2</sup>, Liu Zhiqiang<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Hohhot City Environmental Science Research Institute, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Water Conservancy Planning and Design Research Institute, Tongliao, Inner Mongolia 028000 China)

**Abstract:** [Objective] To explore the relationship between groundwater depth and plant community characteristics and soil physicochemical property, in order to provide a basis for the healthy and harmonious development of ecological environment in Tongliao Plain of West Liaohe River basin. [Methods] Based on the methods of space-time substitution and soil single fractal, the vegetation community characteristics and soil physicochemical property were quantitatively analyzed, and their response mechanism to the change of groundwater depth was discussed. [Results] ① The order of the vegetation diversity indexes under different groundwater depth was showed as:  $2-3\text{ m} > 1-2\text{ m} > 4\text{ m} > 3-4\text{ m} > 0-1\text{ m}$ . ② The topsoil particles were mainly composed of silt with the content between  $52.03\%$  and  $84.78\%$ . The average size of soil particles was

收稿日期: 2018-07-10

修回日期: 2018-09-03

资助项目: 水利部公益性行业科研专项“半干旱区水循环与水生态安全关键技术研究”(201501031); 国家自然科学基金项目“冻融过程中湖泊污染物多介质迁移转化规律及机制研究”(51339002, 51569019, 51509133); 内蒙古自然科学基金项目(2016MS0406, 2017BS0510)

第一作者: 朱永华(1986—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士生, 主要从事水环境科学与工程研究。E-mail: Yh\_Z@imau.edu.cn。

通讯作者: 张生(1960—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境科学与工程研究。E-mail: Shengzhang@imau.edu.cn。

ranked as: 3—4 m, >4 m, 0—1 m, 1—2 m and 2—3 m. ③ The kurtosis were all very narrow. The fractal dimensions were between 2.34 and 2.49. The distributions of soil particle size were all in poor sorting. Correspondingly, the skewness were nearly symmetrical, nearly symmetrical, nearly symmetrical, negative sand negative, respectively. [Conclusion] With the change of groundwater recharge conditions, the succession of vegetation community in the study area is a process from non-zonal meadow vegetation to the zonal typical steppe vegetation. The critical range of vegetation succession is 2—3 m underground water depth.

**Keywords:** groundwater depth; vegetation; soil; Tongliao Plain

西辽河流域农牧交错带主要分布于中国“三北”地区,是空间上农牧并存,时间上农牧交替的广阔地带。其复杂的自然与人为因素,形成了区域降水—入渗—蒸发的水文循环过程,地表水资源匮乏,地下水超采严重,生态环境十分脆弱<sup>[1]</sup>;由于不断增强的人类作用,地下水水位快速下降和植被退化现象不断加剧,逐渐成为制约当地可持续发展最严重的生态环境问题<sup>[2-3]</sup>。植被退化的本质是生态系统生物地球化学循环过程的改变以及生态系统功能的丧失。在诸多植被分布和演替的限制环境因子中,水分是主要的因素之一,而地下水埋深和土壤理化特征必然对于土壤水分具有重要影响作用<sup>[4]</sup>。所以地下水和植被及土壤相关关系的研究逐渐成为生态水文学研究重点和重点<sup>[5-7]</sup>。

围绕地下水与植被的关系,国外研究较多的是地下水对植物群落构成的影响<sup>[8]</sup>、植被形态特征与地下水埋深的响应关系<sup>[9]</sup>等方面;国内研究较多的是地下水水质对植被土壤的影响以及植被生产力、植被恢复等与地下水的相关关系。对于西辽河流域通辽平原区,研究主要围绕生态水位、适宜水位,生态警戒水位和盐渍临界深度与植被的关系<sup>[10]</sup>等方面。研究大多聚焦杨树、榆树和小叶锦鸡等乔灌木与地下水之间的关系<sup>[11]</sup>,然而针对大流域宏观的下层草本植被与地下水埋深之间关系的研究还很有限。例如,一些模型<sup>[12]</sup>确定下边界条件时,往往定性地认为根部长度为下边界值,有待进一步明确。

受环境和人类活动等因素控制的土壤粒度特征作为土壤理化性质的重要指标之一,可用于揭示土壤中物质的迁移状况,并在生态环境的研究中得到了广泛应用<sup>[13-15]</sup>。许多研究结果已表明,受土地利用方式<sup>[15]</sup>、放牧强度和地表覆盖度等<sup>[16]</sup>多因素的共同影响,土壤细颗粒物被逐步分移出去,从而导致出现粗粒化现象及土壤颗粒粒度分布发生变化。近几年,土壤颗粒分形特征被广泛地应用到土壤粒度特征拓展研究方面,其不但能够表征土壤理化特征,还能较好地地表征土壤特性空间变异等<sup>[17]</sup>。因此,基于土壤

颗粒机械组成数据,运用分形维数方法,能够有效揭示土壤理化特征变化。

然而,以往的研究很少在地下水埋深变化的条件下,综合考虑地下水—植被—土壤间的响应关系,无法充分认知不同地下水埋深条件下,草原区植被特征与土壤物理特性的协同关系及其变异规律。为此,本研究以西辽河流域通辽平原区为研究对象,在摸清其草本植被概况的基础上,基于实测资料,运用时空替代和土壤单重分形等方法,尝试将地下水埋深值,即包气带厚度作为研究条件,对应分析地下水位埋深与植物及土壤地表特征的相关关系,以期草原生态系统的恢复提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西辽河流域通辽平原区是内蒙古交错带的重要组成部分,地处 120°~124°E,42°~45°N 之间,总面积约为 3.30×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,其中草地面积多达 1.40×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。气候上呈暖温带半湿润气候向中温带半干旱气候过渡,年降雨量变化在 350—450 mm 之间,且时空分布不均,呈西北向东南增加趋势,时间上 80% 的降水出现在 6—9 月<sup>[18]</sup>;年平均蒸发量为 1 817.4 mm(20 cm 蒸发皿实测值);研究区属西辽河水系,主要支流包括老哈河、西拉木伦河、乌力吉木仁河、教来河、新开河等,但多数河流已经呈常年断流状态;土壤类型主要为潮土、风沙土和沙质栗钙土,分别为 27.48%,38.25%和 22.16%;沙丘、沙地、丘间低地和甸子地共同构成研究区主要地貌类型。植被的斑块化分布和空间异质性较强,草本植被以羊草(*Leymus chinensis*)、三穗藎草(*Carex tristachya*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、早熟禾(*Poa annua*)和虎尾草(*Chloris virgata*)等为优势种。

### 1.2 样地选择及采样

补给水源作为植被演替的驱动因素,尤其是地下水对植被的补给作用的变化,将研究区演替的植被群

落分为:受降水和地下水共同补给的非地带性草甸植被和仅受降雨补给的地带性草原植被。本文采用空间代替时间的方法,结合上述植被分类,基于研究区土壤类型分布,于 2017 年的 7 月、8 月,在西辽河流域通辽平原区范围内,借助平原区遥感影像中草地利用类型分布图,以典型草本植物群落为调查采样点,随机布设 50 m×50 m 采样点 79 个。在每个样地内,随机设置 3 个 1.0 m×1.0 m 的植被样方,用于调查与测定植被地表特征,诸如株数、盖度和生物量等指标。同时,在每个样方中,用土钻(规格:L 为 1 m,d 为 10 cm)钻取地表土壤 0—10 cm 处的样品,分别装入网袋带回实验室测量土壤理化性质指标,共计 237 份土样。与此同时,利用土钻测量每个采样点的地下水埋深数据。

### 1.3 样品测定

(1) 土壤养分测定。土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾外加热法测定(NY/T85-1988);土壤全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法测定(NY/T83-1987);土壤全磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定(NY/T88-1988)。

(2) 土壤粒径的测定。取风干土样放入 Master-sizer3 000 激光衍射粒度分析仪(重复性误差≤±0.5%,准确性误差≤±1.0%)取样槽中,测定土壤粒径的体积百分比。根据美国农业部(USAD)制土壤质地分级标准划分土壤质地:极粗砂粒(1 000~2 000 μm)、粗砂粒(500~1 000 μm)、中砂粒(250~500 μm)、细砂粒(100~250 μm)、极细砂粒(50~100 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm)。

### 1.4 物种多样性分析

选取植被丰富度指数、群落种类多样性指数、均匀度指数和 Hill 多样性指数作为反映物种多样性变化指标,公式如下:

Margalef 丰富度指数:

$$D=(S-1)/\ln N \quad (1)$$

Shannon 群落种类多样性指数:

$$D=-\sum_{i=1}^s(p_i \ln p_i) \quad (2)$$

Alatalo 均匀度指数:

$$D=\left[1/\sum_{i=1}^s\left(\frac{N_i}{N}\right)^2-1\right]/\left[e^{-\sum_{i=1}^s\frac{N_i}{N}\ln\frac{N_i}{N}}-1\right] \quad (3)$$

Hill 多样性指数:

$$N_a=\left(\sum_{i=1}^s P_i^a\right)^{1/1-a} \quad (4)$$

式中:D——多样性指数;S——样方中物种总数;

N——样方中全部种的株数;P——植被密度;i——第 i 种植被;r——调查样方个数;N<sub>a</sub>——物种相对丰度 P<sub>i</sub> 在可变参数为 a(相应权重)时的 Hill 多样性指数,可变参数 a≥0,≠1,且规定 a=0 时,N<sub>a</sub>=S,S——样方内的物种数;a=1 时,N<sub>a</sub>=e<sup>D</sup>,D——Shannon-Wiener 多样性指数;a=2 时,N<sub>a</sub>=1/D,D——Simpson 多样性指数;且随着 a 的增大,Hill 多样性指数的值受低丰度物种的影响逐渐减小,丰度高的物种对群落多样性的贡献率占主导地位。

### 1.5 土壤参数分析

(1) 表征土壤粒级组成和质地信息的函数土壤颗粒体积分形维数(D<sub>v</sub>),其分形维数的表达式为

$$\lg[V_{(r<R_i)}/V_t]=(3-D_v)\lg(R_i/R_{\max}) \quad (5)$$

式中:R<sub>i</sub>——两筛分粒级间粒径的平均值;R<sub>max</sub>——最大粒级土粒的平均直径;V<sub>(r<R<sub>i</sub>)</sub>——小于 R<sub>i</sub> 的累积土粒体积。V<sub>t</sub>——土壤各粒级体积的总和。

(2) 土壤粒度参数计算。

① 粒径(φ),其公式为:

$$\varphi=-\log_2 d \quad (6)$$

式中:d——颗粒直径(mm)。

② 平均粒径(d<sub>0</sub>),其公式为:

$$d_0=\frac{(\varphi_{16}+\varphi_{50}+\varphi_{84})}{3} \quad (7)$$

(3) 表征土壤颗粒分布的离散程度,其值越小表示土壤颗粒分布越集中,颗粒分选性越好的标准偏差(σ<sub>0</sub>),按照标准偏差 σ<sub>0</sub> 取值大小一般划分为 7 个分选级别:σ<sub>0</sub><0.35,分选性极好;0.35<σ<sub>0</sub>≤0.50,分选性好;0.50<σ<sub>0</sub>≤0.71,分选较性好;0.71<σ<sub>0</sub>≤1.00,分选性中等;1.00<σ<sub>0</sub>≤2.00,分选性较差;2.00<σ<sub>0</sub>≤4.00,分选性差;σ<sub>0</sub>>4.00,分选性极差。其公式为:

$$\sigma_0=\frac{(\varphi_{84}-\varphi_{16})}{4}+\frac{(\varphi_{95}-\varphi_5)}{6.6} \quad (8)$$

(4) 表征样品粒度分布集中状态指标峰态(K<sub>g</sub>),其取值范围划分为 6 个峰态等级:K<sub>g</sub>≤0.67,很宽平;0.67<K<sub>g</sub>≤0.9,宽平;0.9<K<sub>g</sub>≤1.11,中等;1.11<K<sub>g</sub>≤1.56,尖窄;1.56<K<sub>g</sub>≤3.00,很尖窄;K<sub>g</sub>>3.00,极尖窄。其公式为:

$$K_g=(\varphi_{95}-\varphi_5)/2.44(\varphi_{75}-\varphi_{25}) \quad (9)$$

(5) 表征土壤颗粒粒度频率曲线的对称性的指标偏度(SK),其划分为 5 个等级:-1.0≤SK<-0.3,极负偏;-0.3≤SK<-0.1,负偏;-0.1≤SK<0.1,近于对称;0.1≤SK<0.3,正偏;0.3≤SK<1.0 极正偏。其公式为:

$$SK = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} + 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} + 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \quad (10)$$

(6) 表征各样地土壤粒度累积频率间平均距离 ( $D$ ), 其公式为:

$$D = \sqrt{\sum(P-P)^2 / (k-1)} \quad (11)$$

式中:  $P$ ——某一样地土壤的粒度累积频率;  $(k-1)$ ——自由度;  $k=5$ 。

## 1.6 数据处理

采用 Excel2007, SPSS 19.0 和 Origin 9.1 等软件进行数据分析及制作图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被特征变化分析

2.1.1 植被地表特征 由表 1 可知, 随着植被演替过程的发生, 样方中植被优势种从羊草、苔草和隐子草逐渐演变到以早熟禾、虎尾草和灰绿藜为优势种

表 1 通辽平原区不同地下水埋深条件下草地植被状况

地下水埋深范围/m	生物量 $B/g$	植被盖度 $C/\%$	优势种植被	种群植被数量
0—1( $n=8$ )	174.4±68.96	42.48±20.68	羊草、委陵菜和碱蓬等	13
1—2( $n=12$ )	193.62±87.96	47.39±22.84	羊草、寸草苔、隐子草、山苦菜、无芒雀麦、虎尾草和碱蒿等	20
2—3( $n=18$ )	263.06±74.66	55.77±23.15	狗尾草、虎尾草、蒙古羊茅、稗草、早熟禾和碱蒿等	26
3—4( $n=19$ )	74.51±83.12	33.95±18.11	柔毛蒿、早熟禾、狗尾草、稗草、虫实和蒺藜等	15
>4( $n=22$ )	110.48±24.67	40.91±13.52	早熟禾、柔毛蒿、狗尾草、稗草、冷蒿、灰绿藜、蒺藜、碱蒿和虫实等	18

注:  $n$  为样点数。

2.1.2 植被多样性变化特征 在植被演替过程中, 水分补给条件对研究区草原植物群落多样性、均匀度及丰富度等指数影响较大。香浓指数、均匀度指数和丰富度指数是表述物种多样性最常用的指数<sup>[19]</sup>。由表 2 可知, 随着草地地下水埋深的增加, 植被的多样性、优势度指数及均匀度指数均呈现出先增加后降低的趋势。说明当草地地下水埋深为 2—3 m 时, 物种的多样性呈最大值, 群落组成最为复杂, 且稳定性最高。而植被地下水埋深在 0—1 m 时, 多种植被多样性指数反而处于低水平, 说明地下水埋深较低会造成群落组成单一、稳定性降低。以地下水埋深 2—3 m 为界限区间, 物种多样性指数、优势度指数以及均匀度指数出现中间高、两边低的趋势。与此同时。在地下水埋深 >4 m 处, 植被多样性指数略有回升, 说明植被类型已经演替到另一类型。通过分析研究区物种多样性指数与地下水埋深的关系, 揭示了随着地下水埋深梯度的增加, 物种多样性呈波动式变化, 两者具有密切关系。

的草地类型, 呈现出温带草甸草原和典型草原在自然状态之下的一种演替形态。说明随着补给水分(特别是地下水)条件的变化, 研究区植被群落演替表现为非地带性草甸植被向地带性典型草原植被的演替过程。

不同地下水埋深条件下, 草地地上群落生物量及植被盖度变化显著。随着水分补给情况的变化, 生物量和盖度呈显著先升高后降低的趋势。生物量和盖度在地下水埋深 2—3 m 处出现峰值。经调查, 在地下水埋深 0—1 m 处, 出现的植物种为 13 种, 主要包含隐子草群落; 在地下水埋深 1—2 m 处, 出现的植物种为 20 种, 主要有羊草、隐子草和寸草苔等群落; 随着地下水埋深的不断增加, 多年生的羊草、隐子草等优势建群种不再出现, 种群植被数量略有下降, 具有指示草地退化的一年生早熟禾、虎尾草等群落开始出现, 一年生的植被在样方中所占比重逐渐增大。

表 2 通辽平原区不同地下水埋深条件下草地多样性指数

地下水埋深变化范围/m	丰富度指数 $I_M$	多样性指数 $I_S$	均匀度指数 $I_A$
≤1	0.73±0.08	0.44±0.06	1.59±0.42
1—2	0.80±0.36	0.59±0.29	1.56±0.94
2—3	0.81±0.31	0.60±0.32	1.65±0.70
3—4	0.63±0.39	0.40±0.21	1.49±0.98
>4	0.69±0.40	0.42±0.24	1.53±0.89

大部分学者<sup>[20]</sup>基于 3 种指数对植被与气候、地下水与土壤水等进行了研究。但由于这些指数都是基于一定样方内单一的指标计算得出, 其之间的相关性显著, 因此对于揭示植被与各个环境因子的内在规律具有一定的限制性。为了更加客观的揭示地下水埋深与植被多样性之间的关系, 本文选取了具有可变参数的 Hill 多样性指数进行研究。通过野外调查和室内数据整理, 分析不同地下水埋深相对应调查点的 Hill 多样性指数分布情况(详见图 1)。

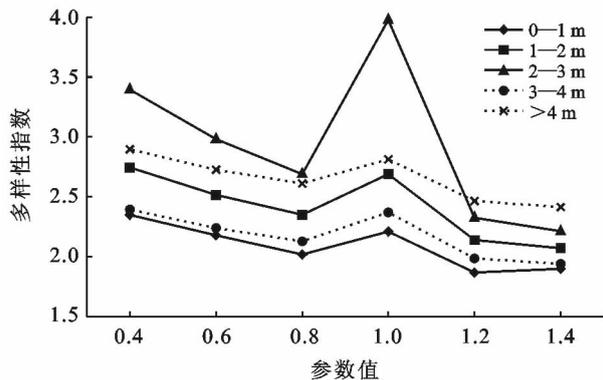


图 1 通辽平原区不同参数条件下草地 Hill 多样性指数

随着参数的增大,各埋深梯度上的多样性指数整体呈下降趋势。各个埋深处多样性指数变化趋势大体相同,降低幅度随着参数的增大逐渐减小,多样性指标值大小顺序为 2—3 m>1—2 m>0—1 m>( >4 m)>3—4 m;这也从另一方向证明了表 2 的结论,该区域植被地下水埋深值并不是越小越好,地下水水位过高反而会减低群落的结构稳定性。由地下水埋深 2~3 m 处的多样性指数可知,在这范围内,物种分布均

匀,结构稳定,且多种多样性指数均为最大值。

## 2.2 不同地下水埋深条件下土壤粒度组成及理化特征

由表 3 不同地下水埋深条件下土壤理化特征可知,本研究不同地下水埋深条件的土壤粒度组成均表现为以黏粒、粉粒和极细粒为主,粉粒平均体积百分含量分别为 81.42%,61.83%,84.78%,62.77%和 52.03%。对颗粒组成进一步分析,地下水埋深 2—3 m 处粉粒平均含量呈最大值,随着地下水埋深的升高,粉粒含量呈下降趋势,大于 4 m 处的粉粒平均含量最低。黏粒平均百分含量除在 0—1 m 地下水埋深处较高外,其余样地黏粒平均百分含量均在 10% 以下;各样地表层粗砂和极粗砂含量为 0,极细粒、细砂和中砂含量随着地下水埋深的增加呈先减少后增加趋势,地下水埋深 2—3 m 处为拐点。以上结果表明研究区土壤颗粒随着地下水埋深的增加呈先变细后变粗的趋势。再通过对土壤化学特征分析可知,土壤氮、磷和碳含量在地下水埋深 0—2 m 处均呈波动变化,在 3 m 以上处呈递减趋势,且在 0—1 m 处呈最大值。

表 3 通辽平原区不同地下水埋深条件下草地土壤参数

地下水埋深值/m	0—1	1—2	2—3	3—4	>4
含氮量(TN)/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.54	0.77	0.92	0.40	0.50
含碳量(SOC)/(g·kg <sup>-1</sup> )	9.71	7.97	8.79	3.42	4.52
含磷量(TP)/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.34	0.37	0.51	0.16	0.15
黏粒含量/%	14.77	7.78	8.83	8.19	6.63
粉粒含量/%	81.42	61.83	84.78	62.77	52.03
极细粒含量/%	3.79	10.29	5.23	12.23	12.42
细砂含量/%	0.02	18.65	0.17	16.14	23.59
中砂含量/%	0.00	1.45	0.00	0.66	5.34
粗砂含量/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
极粗砂含量/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 2.3 不同地下水埋深条件下土壤粒度参数

由表 4 可知,本研究区不同地下水埋深条件下的样地土壤平均粒径数值分别为 4.12, 3.07, 2.99, 4.81, 4.22 μm。由此可知,地下水埋深 3—4 m 处的样地土壤平均粒径最大,其次为在 >4 m, 0—1 m 和 1—2 m 处的样地,最小值出现在 2—3 m 处。这表明伴随着植被对地下水补给的需求不同,造成地表植被特征发生变化的同时,土壤的平均粒径也呈现不断粗化的趋势。标准偏差大小顺序依次为 (>4 m)>1—2 m>3—4 m>0—1 m>2—3 m,其分选级别分别为较差、差、较差、较差和差。偏度等级分别为近于对称、近于对称、负偏和负偏。除 3 m 以下处外,其余样地土频率曲线形态不对称,样地波峰偏向粗

粒度一侧,细粒一侧有一低的尾部,颗粒以粗组分为主,其中地下水埋深 3—4 m 处土壤颗粒组成较 >4 m 处草地更粗,颗粒组成以粉粒为主,仅含有少量黏粒,土壤颗粒分布较不对称,总体偏向于粗颗粒的一侧,人为扰动对土壤粗化作用明显。各种样地峰态均属很尖窄,地下水埋深 1—2 m 和 3—4 m 处的样地土壤颗粒分布较其他样地集中。由表 3 可知,各样地中粉粒为优势颗粒,这与其偏度为近于对称(数值均为近于 0 的负数)一致。这表明颗粒组成向细粒物质集中,而地下水埋深 3 m 以上处表现为向粗颗粒集中,极细砂和细砂含量增多,其偏度也表现为负偏。由于土壤分形维数数值大小与黏粒、粉粒等细颗粒含量呈正相关,与砾石、极粗沙等粗颗粒含量呈负相关关

系<sup>[21]</sup>,研究区不同地下水埋深条件下的土壤分形维数变化不大,但地下水埋深 0—1 m 和 3—4 m 处分形维数呈最小值,2—3 m 处其值最大,这也与表 3 中各种样地颗粒组成粗细情况一致。

表 4 不同地下水埋深条件下草地土壤颗粒参数

地下水埋深范围/m	$d_0/\mu\text{m}$	$\delta$	SK	$K_g$	$D_v$
0—1	$4.12 \pm 0.39$	1.68	-0.03	0.92	$2.41 \pm 0.03$
1—2	$3.07 \pm 0.87$	2.28	-0.02	0.86	$2.45 \pm 0.02$
2—3	$2.99 \pm 0.44$	1.64	-0.08	0.88	$2.49 \pm 0.01$
3—4	$4.81 \pm 1.38$	1.85	-0.28	0.90	$2.34 \pm 0.04$
>4	$4.22 \pm 1.01$	2.31	-0.11	0.80	$2.38 \pm 0.04$

## 2.4 不同地下水埋深条件下土壤颗粒频率分布曲线

土壤颗粒累计频率分布曲线常用于分析土壤颗粒的分布情况,不仅可定性地获取偏度、峰度等信息,还可以从曲线的陡峻属性判断颗粒颗粒分布均匀情况<sup>[21]</sup>。分别以不同地下水埋深条件样地的表层土壤粒径累计频率及不同样地间的平均距离值绘制分布曲线(图 2),可以看出不同样地粒径分布存在差异,

样地地下水埋深 2—3 m 处的土壤颗粒分布均匀程度表现最好,且颗粒组成较细。地下水埋深 0—2 m 和 >4 m 处的表土累积分布曲线介于埋深 2—3 m 和 3—4 m 之间。地下水埋深 3—4 m 处土壤颗粒分布开始时变化较快,但约在  $45 \mu\text{m}$  后开始变缓,并缓慢升高,说明颗粒多集中在大于  $45 \mu\text{m}$  范围以外,结合表 1 和表 3 中数据,可知其颗粒分选性相对于其他草地呈最差,颗粒均较粗且分选性差,这也印证了该处地下水埋深对植被影响较大时,对土壤颗粒结构也产生一定影响。

土壤粒度累积频率间平均距离反映了样地间颗粒差异情况,本研究中不同样地土壤粒度累积频率间平均距离最大值出现在  $30 \mu\text{m}$  处左右。这不仅说明研究区土壤整体差异在  $30 \mu\text{m}$  时较大,而且也证实其为研究区易风蚀颗粒为粉粒。由图 2 的柱状图可知,样地中土壤小于 1 mm 粒度组分总体上随着地下水埋深增加而降低,与此同时,2—3 m 处的粗颗粒(表层 > 1 mm)逐渐增多。这说明随着地下水补给条件的变化,地表植被发生演变,土壤颗粒也随之发生转变。

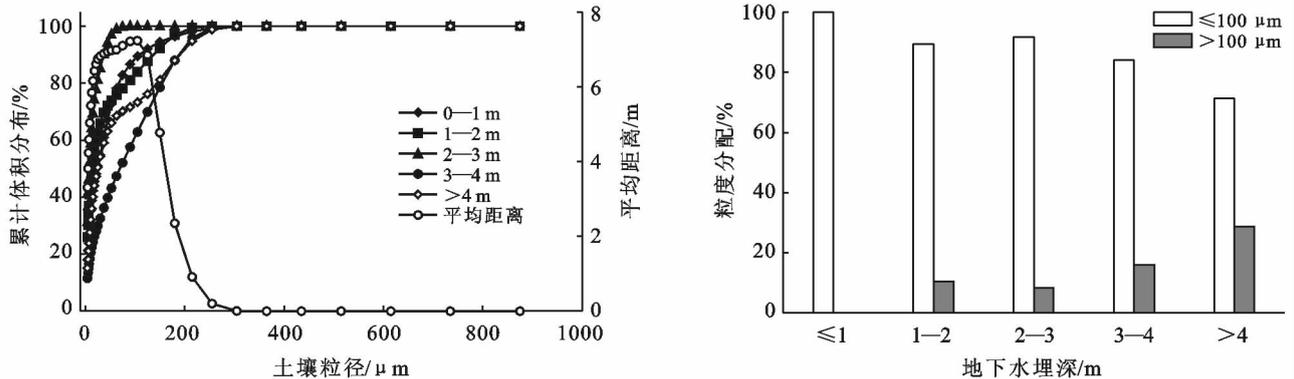


图 2 不同地下水埋深条件下土壤颗粒频率分布

## 3 讨论

草地植被特征在地下水埋深变化过程中表现最直观和敏感,不仅是地下水变化的一种重要指征,也是草地生态系统功能改变的主要测度。本研究中,随着草地地下水埋深的不断增加,优势种植物生态型由中生向旱生发生转变,地表特征也随之发生变化。且随着草地地下水埋深下降程度的加剧,优良牧草的种类及产量逐渐降低。分析其原因,可能是由于半干旱区的环境因素加剧了草原生态系统的脆弱性和不稳定性。且在地下水变化过程中,地下水埋深对应着适合本生境的典型优势种植物类型,并对植物群落数量和分布格局以及群落的结构和功能都有不同程度的

影响;与此同时,其也通过相关作用造成土壤流失和地表组成物质粗化等进而影响群落类型和特征的演变。西辽河流域平原区是典型的半干旱区,生态环境脆弱,地下水埋深与草本植物的分布演变及土壤颗粒特征必然存在一定的内在联系。研究区草地土壤水分含量与植被群落多样性指数和地表特征等均显著正相关,随着地下水埋深的不断增加,植物生长所需的水分条件发生变化,植物地表特征与多样性指数也相应变化,其中生物量、盖度和多种多样性指数均在地下水埋深 2—3 m 处出现峰值。以上结果揭示出研究区优势植被由多年生深根植被向一年生浅根植被过渡,地下水埋深 2—3 m 处可能为植被演变临界范围值;与此同时,研究结果还揭示出 0—1 m 的地下

水埋深可能抑制了植被生长,这可能与研究区具有强烈的蒸散发,使得地下水埋深较低处土壤盐碱化明显,从而在很大程度上限制了植被生长;而 $>4$  m的地下水埋深值同时也可能被相应的植被种群所适应。即根据不同地下水补给条件提出不同的植被恢复政策与方法,对研究区生态环境保护等具有重要现实意义。

在农牧交错带地区,由地下水埋深变化引起的土壤包气带变化是土壤退化最重要的原因之一。包气带在水循环中具有其独特的地位和功能,其水分来源主要包括大气降水的入渗以及地表水体的渗漏和通过毛细作用输送的水分等<sup>[22]</sup>。西辽河流域通辽平原区地表水匮乏,随着全球气温的上升,蒸发量不断增加,降水对地下水补给作用由于地下水埋深的不断增加,即包气带逐渐增厚,而不断减弱<sup>[23]</sup>,必将对土壤理化特征产生影响。土壤粗化不仅造成土壤的紧实度发生变化,还会对土壤水分等其他物理性质产生影响作用。本研究表明土壤容重随着草地地下水埋深变化而发生变化,土壤容重与平均粒径极显著正相关,而植被多样性和土壤分形维数与其呈极显著负相关。随着草地地下水埋深的加剧,土壤含水量降低,这与魏彬等<sup>[24]</sup>通过对土壤含水量与地下水埋深的关系进行分析所得结论相似,即地下水埋深是影响土壤含水量的重要因素,土壤含水量与地下水埋深之间存在显著的负相关关系。土壤水分的减少不仅会直接影响草地特征的变化,特别是生产力和覆盖度的减少,且还会导致表土更加容易遭到侵蚀。本文通过含水率与其他环境指标相关性分析,也证实其对植被生长和土壤理化性质具有一定影响作用。另一方面,胡晓蕾等<sup>[25]</sup>通过陕西省杨凌区西北农林科技大学节水灌溉试验站的野外试验,证实随着包气带的增厚,分形维数呈减小趋势变化。本文的结论与这些前人成果较为相似,即随着地下水埋深的增加,研究区土壤分形维数总体呈减少趋势,但是经历先增加后减少的过程,这可能也与地表植被对土壤作用影响有关<sup>[25]</sup>。综上所述,草地地下水变化在引起土壤结构遭到破坏的同时使土壤含水量降低,最终导致草地植被发生演替。

近年来,研究区耕地面积不断扩张,形成众多斑块化的草地。与此同时,大量机电水井用于灌溉农田,造成研究区地下水埋深加剧,出现地下水漏斗区,进而严重影响植被生长,地表细粒物质极易被吹蚀;此外,由于补给条件的变化,植被盖度不同程度地减少,缺乏保护的土层蒸发加剧,土体变干并逐渐疏松,一旦形成破口,风蚀将向表土以下发展并逐渐扩张,

使得研究区土壤粗化愈加严重。研究区中地下水埋深 $0—1$  m和 $3—4$  m处草本植被盖度和生物量最低,与之相对应的是其分形维数也最小,土壤较粗化,虽然粉粒含量较高,但是细砂和中砂比例升高,颗粒组成较分散,致使表土细粒物质被吹蚀<sup>[26]</sup>。采取有效的地下水保护措施,不仅对作物生长十分有利,还兼具保水功能,从而防止土壤细粒物质被吹蚀。同时作物生长也在改良土壤,形成宝贵的团粒结构,促进保水保肥,提高土体的抗风蚀能力,这对于土壤本身较干旱贫瘠的干旱半干旱地区尤为重要。

## 4 结论

通过对西辽河流域通辽平原区不同地下水埋深条件下草地样方的植被地表特征和地表( $0—10$  cm)土壤的粒度组成进行分析,得到以下结论:

(1) 随着地下水埋深变化,研究区植被群落的演替表现为非地带性草甸植被向地带性典型草原植被的演替过程。不同地下水埋深条件下植被各种多样性指标值大小顺序为 $2—3$  m $>1—2$  m $>0—1$  m $>(>4$  m) $>3—4$  m。

(2) 研究区表层土壤粒度组成以粉粒为主,通过对土壤颗粒平均粒径、颗粒分形维数及分选级别等指标进行分析,研究区土壤随着地下水埋深条件变化逐渐呈粗化。

(3) 土壤粒度分布频率曲线和粒度累积频率间平均距离显示研究区粒径为 $30\ \mu\text{m}$ 附近颗粒为易风蚀颗粒,且地下水埋深条件变化,对研究区植被及土壤具有一定的影响作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王娅,周立华,魏轩.基于社会—生态系统的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系[J].生态学报,2018,38(3):829-840.
- [2] 岳喜元,左小安,赵学勇,等.科尔沁沙地沙漠化风险评价[J].中国沙漠,2018,38(1):8-16.
- [3] 赵学勇,张春民,左小安,等.科尔沁沙地沙漠化土地恢复面临的挑战[J].应用生态学报,2009,20(7):1559-1564.
- [4] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报,2012,28(5):120-125.
- [5] 张九天,何霄嘉,上官冬辉,等.冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策[J].冰川冻土,2012,34(4):848-854.
- [6] 马玉蕾,王德,刘俊民,等.地下水与植被关系的研究进展[J].水资源与水工程学报,2013,24(5):36-40.
- [7] 王旭升,万力,齐蕊,等.鄂尔多斯高原地下水与植被盖

- 度的相互影响[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5): 1013-1022.
- [8] 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.
- [9] Kennedy M P, Milne J M, Murphy K J. Experimental growth response stoground water level variation and competition in five British wetland plants pecies [J]. *Wetlands Ecology & Management*, 2003, 11(6): 383-396.
- [10] 张天曾. 中国干旱区水资源利用和生态环境[J]. 自然资源, 1981(1): 62-67.
- [11] 孙丽, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙丘—草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 68-76.
- [12] Huo Siyuan, Jin Menggui, Liang Xing, et al. Changes of vertical groundwater recharge with increase in thickness of Vadose zone simulated by one-dimensional variably saturated flow model[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(6): 1043-1050.
- [13] 蒙仲举, 王猛, 高永, 等. 基于土壤粒度参数的荒漠草原地表粗粒化过程[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 22-28.
- [14] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293-299.
- [15] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.
- [16] 王琴, 蒙仲举, 汪季, 等. 希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被—土壤响应特征[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1159-1167.
- [17] 张佳瑞, 王金满, 祝宇成, 等. 分形理论在土壤学应用中的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 221-228.
- [18] 白晓慧, 白文明. 内蒙古通辽市近 30 年降水变化分析[J]. 畜牧与饲料科学, 2016, 37(9): 67-69.
- [19] 马克平. 生物群落多样性的测度方法(I):  $\alpha$ 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 3(3): 162-168.
- [20] 郭鑫, 赵全升, 张建伟, 等. 大沽河下游地区地下水及地表植被对截渗墙响应[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 142-147.
- [21] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 803-812.
- [22] 李惠娣, 杨琦, 聂振龙, 等. 土壤结构变化对包气带土壤水分参数的影响及环境效应[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 100-102.
- [23] 朱永华, 张生, 孙标, 等. 科尔沁沙地典型区地下水、降水变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 718-728.
- [24] 魏彬, 海米提·依米提, 王庆峰, 等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤含水量的相关性[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1110-1116.
- [25] 胡晓蕾, 张富仓, 赵旭. 杨凌包气带深层黄土颗粒分形特性的实验研究[J]. 节水灌溉, 2009(3): 1-4.
- [26] 龚晨, 安萍莉, 琪赫, 等. 阴山北麓地区农作制度演变历程及演变规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 66-70.
- [27] 刘秀花, 王蕊, 胡安焱, 等. 颗粒组成对包气带水分运动参数的通径分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(3): 320-326.

(上接第 15 页)

- [18] 魏强, 凌雷, 张广忠, 等. 兴隆山森林群落不同演替阶段的结构特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 59-66.
- [19] 吕瑞恒, 李国雷, 刘勇, 等. 不同立地条件下华北落叶松凋落物的分解特性[J]. 林业科学, 2012, 48(2): 31-37.
- [20] 武启骞, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性雪被对高山森林凋落物分解的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(4): 296-305.
- [21] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 245-251.
- [22] 查同刚, 张志强, 孙阁, 等. 凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7991-8000.
- [23] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test[J]. *Ecology*, 1989, 70(1): 97-104.
- [24] Constantinides M, Fownes J H. Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: Relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(1): 49-55.
- [25] Scott N A, Binkley D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: Comparison across North American forest sites[J]. *Oecologia*, 1997, 111(2): 151-159.
- [26] 李艳红, 罗承德, 杨万勤, 等. 桉—椴混合凋落物分解及其土壤动物群落动态[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 851-856.