

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.035.

孙琰蕙, 张定海, 吴贤忠, 等. 古尔班通古特沙漠东南部不同类型沙丘土壤水分与地形—植被因子关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 70-78.

Sun Yanhui, Zhang Dinghai, Wu Xianzhong, et al. Study on the Relationship Between Soil Moisture and Topography-Vegetation Factors in Different Types of Sand Dunes in the Southeastern Gurbantunggut Desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 70-78.

# 古尔班通古特沙漠东南部不同类型沙丘土壤水分与地形—植被因子关系

孙琰蕙<sup>1</sup>, 张定海<sup>1</sup>, 吴贤忠<sup>2</sup>, 张艳灵<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 理学院数量生物研究所, 兰州 730070; 2. 兰州城市学院 城市环境学院, 兰州 730070)

**摘要:** [目的] 揭示古尔班通古特沙漠土壤水分的分布规律及其与地形—植被因子的关系, 对制定相应的防风固沙措施以及建立科学合理的植物固沙模式有积极的指导作用。[方法] 以古尔班通古特沙漠东南部地区 3 种不同类型沙丘(固定、半固定和流动沙丘)为研究对象, 利用方差分析和冗余分析等方法对 3 种不同类型沙丘上 4 种微地貌类型(迎风坡、背风坡、丘顶、丘底)不同深度土壤水分(0—40 cm, 40—200 cm, 200—300 cm)分布特征及其与地形—植被因子之间的关系进行综合分析。[结果] (1) 所有类型沙丘上 0—300 cm 土壤水分的波动程度随深度的增加逐渐减小, 表层土壤水分的波动程度大于中层和深层。(2) 所有类型沙丘不同深度的土壤水分有显著的差异, 且背风坡、丘底和迎风坡 3 种微地貌类型上土壤水分相对较为集中。(3) 地形—植被因子对研究区绝大多数(半)固定沙丘的土壤水分呈负相关关系, 对(半)固定沙丘不同深度土壤水分影响较流动沙丘更为明显。[结论] 所有类型沙丘上的土壤水分受地形因子的影响较植被因子强, 而且影响不同类型沙丘土壤水分的主要地形—植被因子也不同。

**关键词:** 土壤水分; 影响因子; 冗余分析; 古尔班通古特沙漠

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0070-09

## Study on the Relationship Between Soil Moisture and Topography-Vegetation Factors in Different Types of Sand Dunes in the Southeastern Gurbantunggut Desert

Sun Yanhui<sup>1</sup>, Zhang Dinghai<sup>1</sup>, Wu Xianzhong<sup>2</sup>, Zhang Yanling<sup>1</sup>

(1. Center for Quantitative Biology, College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] The aim is to reveal the distribution pattern of soil moisture in the Gurbantunggut Desert and its relationship with topography-vegetation factors, which is a positive guide for formulating corresponding wind and sand control measures and establishing a scientific and reasonable plant sand fixation model. [Methods] Three different types of sand dunes (fixed, semi-fixed and mobile dunes) in the southeastern Gurbantunggut Desert were used to study the soil moisture at different depths (0—40 cm in the surface layer, 40—200 cm in the middle layer and 200—200 cm in the deep layer) of four micro-landscape types (windward slope, leeward slope, mound top and mound bottom) on the three different types of sand dunes by using ANOVA and redundancy analysis. The distribution characteristics of soil moisture at different depths (0—40 cm in the surface layer, 40—200 cm in the middle layer, and 200—300 cm in the deep layer) and its relationship with topography-vegetation factors were analyzed comprehensively. [Results] (1) The

收稿日期: 2022-08-10

修回日期: 2022-09-04

资助项目: 甘肃省科技计划项目(21JR7RA831); 国家自然科学基金项目(41661022)

第一作者: 孙琰蕙(1998—), 女, 甘肃定西人, 硕士, 主要从事空间统计研究。E-mail: 908937337@qq.com

通信作者: 张定海(1981—), 男, 甘肃张掖人, 副教授, 主要从事生态水文模型、空间统计学研究。E-mail: zhangdh@gsau.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

fluctuation of soil moisture in 0—300 cm in all types of dunes gradually decreased with increasing depth, and the fluctuation of soil moisture in the surface layer was greater than that in the middle and deep layers. (2) There were significant differences in soil moisture at different depths in all types of dunes, and soil moisture was relatively more concentrated in three micro-landscape types: leeward slope, bottom of dune and windward slope. (3) Topography-vegetation factors had a negative correlation with soil moisture of most (semi-)fixed dunes in the study area, and the effect on soil moisture at different depths of (semi-)fixed dunes was more obvious than that of mobile dunes. [Conclusion] Soil moisture in all types of dunes is more strongly influenced by topographic factors than vegetation factors, and the main topographic-vegetation factors affecting soil moisture on different types of dunes are also different.

**Keywords:** soil moisture; influence factor; redundancy analysis (RDA); Gurbantunggut Desert

沙漠生态系统是干旱、半干旱生态系统的主要类型<sup>[1]</sup>,其在维持干旱半干旱生态系统稳定性和提高生态系统服务功能方面具有重要作用<sup>[2]</sup>。土壤水分是沙漠生态系统植被格局和过程的驱动力,控制着植物的生长、植被演替和景观分布等主要过程。研究土壤水分在沙漠生态系统中的分布特征和影响因素有助于在沙区水文过程和生态过程之间建立定量联系<sup>[3]</sup>。然而,受气候、地形和植被分布等生物和非生物因素的影响,土壤水分的分布特征和影响因素非常复杂。已有的研究表明,地形和植被是立地尺度上影响土壤水分的主要因素,地形是气候、植被等影响因子的主要载体<sup>[4]</sup>,植被是土壤水分在沙漠生态系统中的集中体现。因此,全面分析不同沙区土壤水分的分布特征及其与地形—植被因子的关系,是深入掌握沙区土壤水分分布特征的前提,也是未来在不同区域开展防风固沙工程和沙区植被建设与管理的保障。

土壤水分的空间异质性及其影响因素已在空间和时间上得到广泛研究<sup>[5]</sup>。目前,针对地形—植被因子对沙区生态系统土壤水分的影响研究,主要是基于地理信息系统(GIS)和地统计学原理等方法对区域土壤水分状况进行全面的评估。Qiu 等<sup>[6]</sup>确定了半干旱沟壑流域土壤水分(0—75 cm)的空间变异性,发现土壤水分的分布可分为 3 种类型:减少型、波动型和增加型。Yang 等<sup>[7]</sup>还描述了浅层和深层土壤水分的空间变化,研究表明坡位和坡向对深层土壤水分影响较浅层土壤水分的更大。Jia 等<sup>[8]</sup>调查了中国西北地区土壤水分的空间格局及其时间稳定性,发现土壤水分在 4 种植被类型下呈现出不同的趋势。然而,在立地尺度上有关不同类型沙丘以及沙丘不同微地貌类型上地形—植被因子对土壤水分影响的研究较少。本研究采用样带—网格数据,对古尔班通古特沙漠 3 种不同类型沙丘(固定、半固定和流动沙丘)4 种微地貌类型上(迎风坡、背风坡、丘顶和丘底)不同深

度(表层 0—40 cm、中层 40—200 cm 和深层 200—300 cm)的土壤水分特征和地形—植被因子对土壤水分的影响进行研究,以期在立地尺度下探讨地形—植被因子对土壤水分的影响规律。

## 1 研究区概况

研究区位于古尔班通古特沙漠东南部地区,介于 44°11′—46°20′N,84°31′—90°00′E,海拔 1 200~1 400 m,占地面积约 4 880 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。该地区年平均气温 5~5.7℃,极端最高气温 40℃以上,极端最低气温小于-40℃,年均降雨量小于 150 mm,年均蒸发量大于 1 950 mm,固定和半固定沙丘占整个沙漠面积的 96%<sup>[10]</sup>。总植被盖度在 15%~50%,植被主要由灌木和半灌木、小半乔木和各种草本植物组成。优势灌木和半灌木主要由梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、蛇麻黄(*Ephedra distachya*)以及沙蒿(*Artemisia desertorum*)等组成<sup>[11]</sup>。

## 2 材料与方法

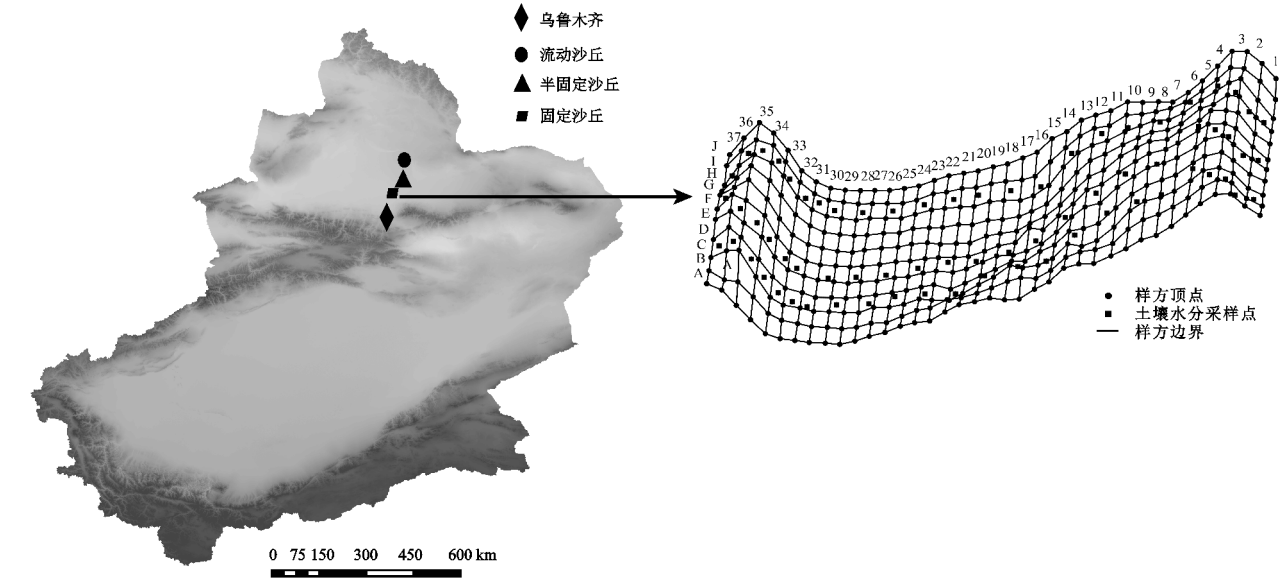
### 2.1 试验设计

对古尔班通古特沙漠东南部不同类型沙丘和固沙植被全面考察后选定了 3 块调查样地(图 1),固定沙丘样地位于沙漠南缘北沙窝附近(44°22′24″N,87°55′12″E),深入沙漠约 5 km,样地大小为 40 m×140 m;半固定沙丘样地位于沙漠南部腹地额尔齐斯河流域沙漠管理处附近(44°33′34″N,88°16′35″E),深入沙漠腹地约 100 km,样地大小为 180 m;流动沙丘样地位于沙漠南部彩南油田附近(44°56′49″N,88°32′28″E),深入沙漠腹地 300 km,样地大小为 40 m×140 m。

将 3 块样地均划分成 4 m×4 m 的小样方,为了涵盖不同类型沙丘的 4 种微地貌类型,3 块样地大小不同。其中,流动及固定沙丘样地划分为 10 行(A—

J)37 列(1~37)共 370 个小样方,半固定沙丘划分为 10 行 45 列共 450 个小样方。选择样地中的 3 行(C, E 和 I 行)中的样方作为土壤水分采样点,在沙丘微地形起伏较大的地方加密采样,每个样地共计 71 个水分采样点。利用土钻法测量 0—300 cm 的重量含水量,土壤水分共分为 18 层,分别为:0—5,5—15,15—25,25—35,35—50,50 cm 以下每隔 20 cm 采样 1 次。选择其中的 1 行(E 行),利用 50×50 cm 的草

本样方调查了 E 行中每个小样方(4 m×4 m)中的草本盖度、草本多度、凋落物。同时,利用标记牌标记样地内每株灌木,测定了其株高和冠幅(东西和南北方向)以及所在样方的灌木盖度和多度。进一步,利用实时动态定位的测量方法(RTK)对样地中每株灌木和每个样方的 4 个顶点进行定位测量,得到其经纬度和海拔<sup>[12]</sup>。利用样方定位点的数据,计算每个小样方对应的地形因子,主要包括坡度、坡向和高差。



注:1~37 表示列;A—J 表示行。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Study Area Overview

2.2 数据分析

2.2.1 土壤水分的划分 以往的研究表明,研究区草本植物主要利用 0—40 cm 的土壤水分,固沙灌木 80% 的根系分布在 40—200 cm 的土层深度范围内,10% 左右的固沙灌木根系分布在 200—300 cm 的土层范围内<sup>[13]</sup>。因此,本研究将 3 个样地中的土壤水分均划分为 3 层,即表层 0—40 cm、中层 40—200 cm 和深层 200—300 cm。

2.2.2 地形—植被因子的选取 地形因子是气候和植被等影响因子的载体,同时也是影响土壤水分空间变异的主要因子。在立地尺度上,土壤水分空间格局受到多种因素的综合影响,土壤水分与坡度、坡向和海拔等单一地形因子之间的关系呈现复杂多样的格局<sup>[14]</sup>。本研究中的地形因子主要涉及土壤水分采样点所在样方的坡度、坡向和高差,其计算方法依据数字高程模型计算<sup>[15]</sup>。同时,在立地尺度上,不考虑降水、地表径流和土壤理化性质等因素对土壤水分影响的前提下,物种的组成和结构是影响土壤水分的重要因素。因此,本研究将植被因子分为灌木和草本因子

两类。其中,灌木主要包括灌木的盖度、多度和生物量,草本主要包括草本的盖度、多度和凋落物。

2.2.3 冗余分析 冗余分析(redundancy analysis, RDA)是一种主成分分析与回归分析结合的排序方法,也是多变量回归分析的拓展<sup>[16]</sup>。从概念上讲,RDA 是解释变量矩阵与响应变量矩阵之间多元多重线性回归的拟合值矩阵的主成分分析<sup>[17]</sup>,其目的是寻找能最大程度解释响应变量矩阵变差的一系列的解释变量的线性组合。

3 结果与分析

3.1 土壤水分随深度的变化

从整体上来看(图 2),3 种不同类型沙丘上土壤水分的大小顺序为:固定沙丘>半固定沙丘>流动沙丘,土壤水分的波动程度在表层(0—40 cm)最大,随着深度的增加其波动程度逐渐减小。同时,3 种不同类型沙丘上土壤水分均在 180 cm 附近达到最大,固定、半固定和流动沙丘上土壤水分分别在 140,80,120 cm 后波动程度逐渐减小。

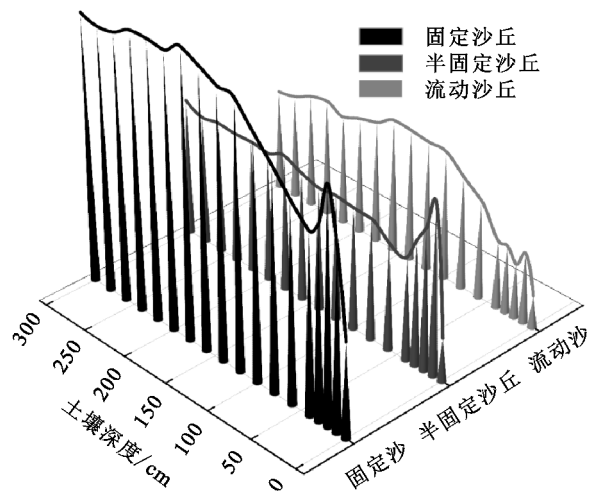


图 2 不同类型沙丘土壤水分随深度变化  
Fig. 2 Variation of soil moisture with depth for different types of sand dunes

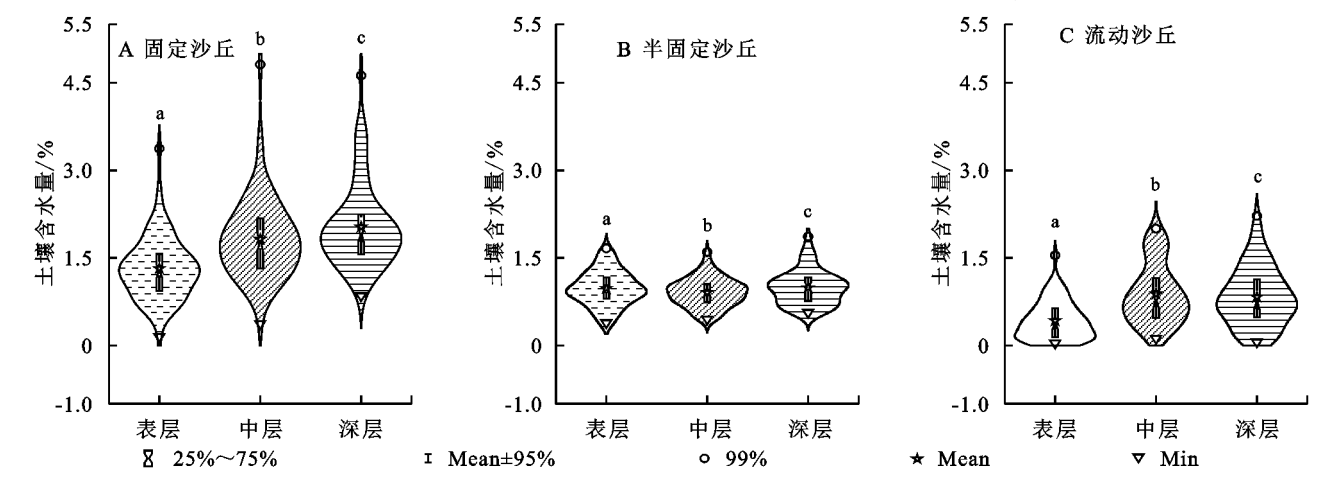
### 3.2 不同类型沙丘不同深度土壤水分的分布

为了确定不同类型沙丘不同深度土壤水分的分布规律,利用单因素方差分析和多重比较对其显著性进行了分析。由图 3 可见,不同类型沙丘表层、中层和深层土壤水分大部分为相对集中的单峰分布且两两之间有显著的差异,固定和半固定沙丘上不同深度的土壤水分均呈现两头小的单峰分布,流动沙丘上不同深度的土壤水分呈现一头小一头大的单峰分布。这说明固定和半固定沙丘上土壤水分出现极高和极

低的概率较大,土壤水分的分布差异大。流动沙丘上土壤水分出现较低的概率较小,土壤水分的分布相对较为稳定。

### 3.3 不同类型沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分的分布

图 4—6 为 3 种不同类型沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分的分布,由图 4 可以看出,固定沙丘背风坡、丘底和迎风坡 3 种微地貌类型上不同深度的土壤水分分布大致呈相对比较集中的单峰分布,其上土壤水分出现极高和极低的概率较小。丘顶不同深度土壤水分大致呈比较分散的单峰分布,其上土壤水分分布极不均匀,土壤水分出现极高和极低的概率较大。进一步,对表层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:丘底( $1.5 \pm 0.24$ )>背风坡( $1.35 \pm 0.21$ )>迎风坡( $1.1 \pm 0.2$ )>丘顶( $1.07 \pm 0.4$ ),丘底与背风坡之间无显著差异,但与迎风坡/丘顶之间有显著差异。对中层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:丘底( $2.24 \pm 0.27$ )>丘顶( $1.61 \pm 0.78$ )>背风坡( $1.59 \pm 0.21$ )>迎风坡( $1.5 \pm 0.15$ ),丘底与丘顶、背风坡和迎风坡之间有显著差异。对深层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:丘底( $2.43 \pm 0.34$ )>迎风坡( $1.99 \pm 0.13$ )>背风坡( $1.73 \pm 0.18$ )>丘顶( $1.56 \pm 0.55$ ),丘底与丘顶、背风坡和迎风坡之间有显著差异。



注:不同小写字母表示不同深度土壤水分差异显著。

图 3 不同类型沙丘不同深度土壤水分比较

Fig. 3 Comparison of soil moisture at different depths in different types of sand dunes

图 5 为半固定沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分的分布,由图 5 可以看出,半固定沙丘迎风坡不同深度的土壤水分呈相对比较集中的单峰分布,迎风坡表层土壤水分呈现两头小的单峰分布,中层和深层土壤水分呈现一头小一头大的单峰分布。这说明迎风坡表层土壤水分出现极高和极低的概率较大,土壤水分的分布差异大;中层和深层土壤水分出现较

低的概率较小,土壤水分的分布相对较为稳定。进一步,对表层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:丘顶( $1.21 \pm 0.46$ )>背风坡( $1.13 \pm 0.15$ )>丘底( $1.09 \pm 0.13$ )>迎风坡( $0.85 \pm 0.08$ )。对中层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:丘底( $1.06 \pm 0.14$ )>背风坡( $0.94 \pm 0.14$ )>迎风坡( $0.89 \pm 0.07$ )>丘顶( $0.70 \pm 0.17$ )。对深层



土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:背风坡( $1.04\pm0.20$ )>丘底( $1.03\pm0.14$ )>迎风坡( $0.98\pm0.99$ )>丘顶( $0.83\pm0.38$ )。半固定沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分无显著差异。

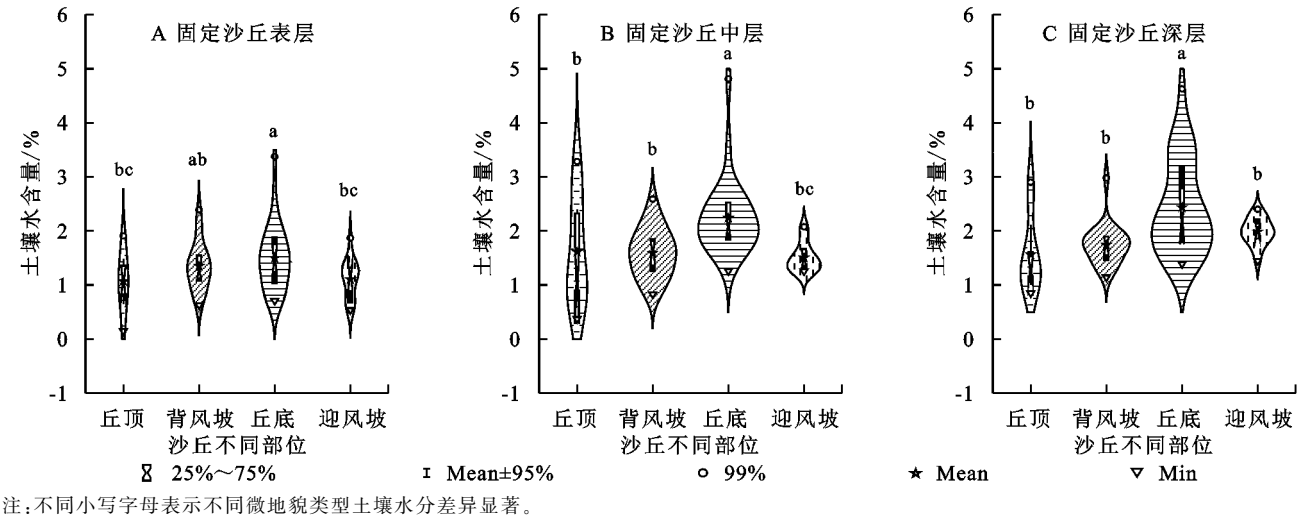


图 4 固定沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分比较

Fig. 4 Comparison of soil moisture at different depths on four micro-landform types of fixed sand dunes

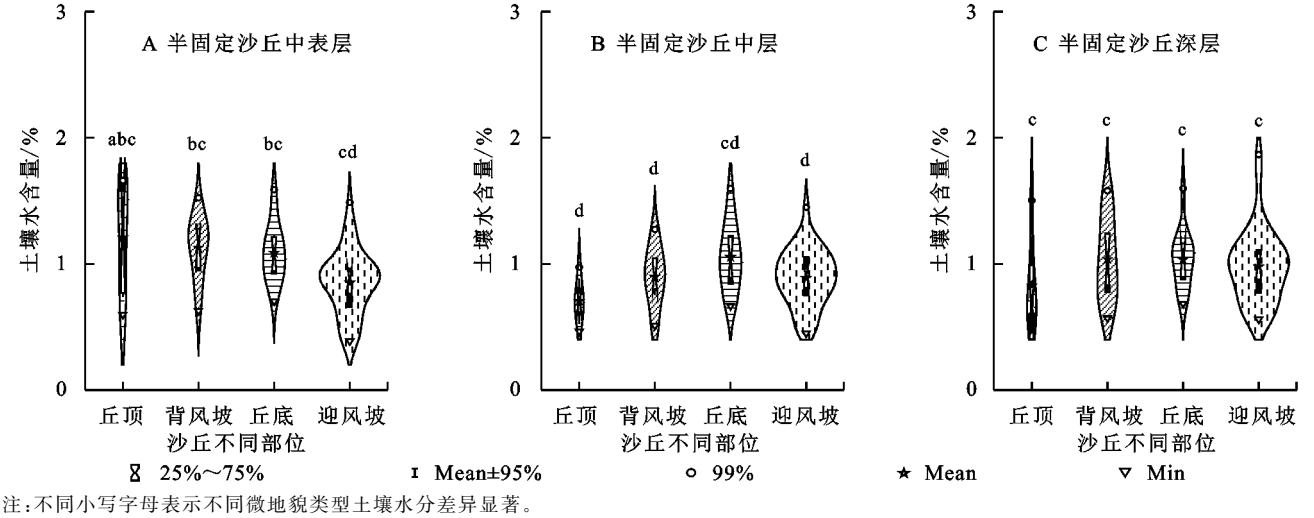


图 5 半固定沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分比较

Fig. 5 Comparison of soil moisture at different depths on four micro-landscape types of semi-fixed sand dunes

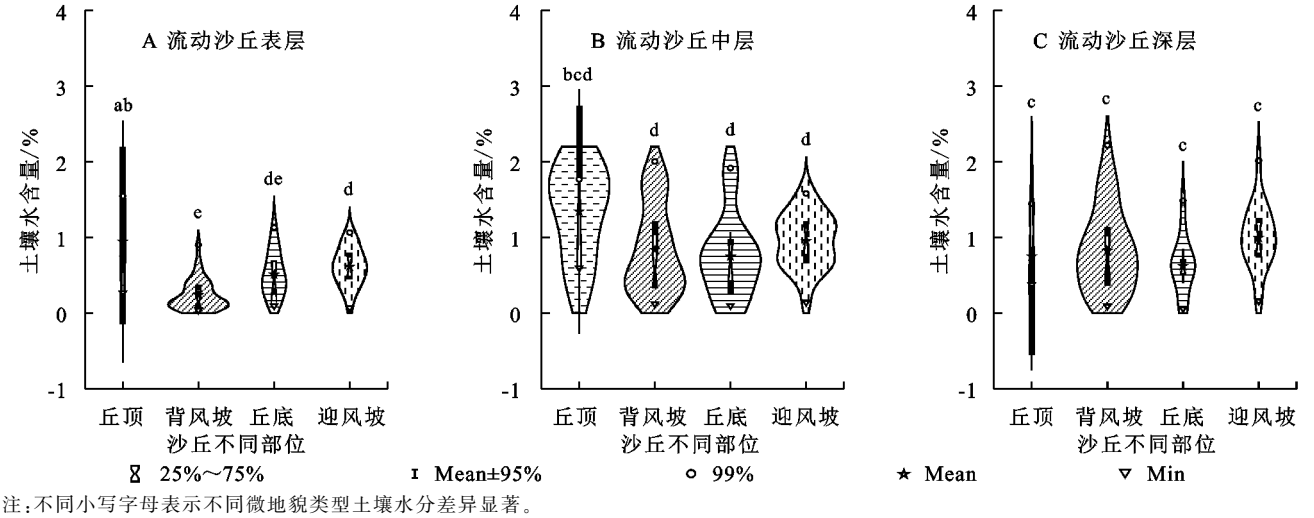


图 6 流动沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分比较

Fig. 6 Comparison of soil moisture at different depths on four micro-landform types of mobile sand dunes

图 6 为流动沙丘 4 种微地貌类型上不同深度土壤水分的分布,由图 6 可以看出,流动沙丘背风坡、丘底和迎风坡 3 种微地貌类型上不同深度的土壤水分分布大致呈相对比较集中的一头小一头大的单峰分布,其上土壤水分出现较低的概率较小,土壤水分的分布相对较为稳定。进一步,对表层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:丘顶( $0.94 \pm 1.60$ )>迎风坡( $0.61 \pm 0.12$ )>丘底( $0.50 \pm 0.18$ )>背风坡( $0.24 \pm 0.06$ ),丘顶与背风坡、丘底和迎风坡之间有显著差异。对中层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:丘顶( $1.34 \pm 1.62$ )>迎风坡( $0.95 \pm 0.17$ )>背风坡( $0.84 \pm 0.19$ )>丘底( $0.75 \pm 0.31$ )。对深层土壤水分而言,4 种微地貌类型上土壤水分的大小顺序为:迎风坡( $0.99 \pm 0.2$ )>背风坡( $0.82 \pm 0.19$ )>丘顶( $0.75 \pm 1.5$ )>丘底( $0.62 \pm 0.22$ )。流动沙丘 4 种微地貌类型上中层、深层土壤水分无显著差异。

### 3.4 土壤水分与地形—植被因子 RDA 分析

对研究样地土壤水分(被解释变量)和地形—植被因子(解释变量)进行 RDA 分析。RDA 排序图详细描述了不同深度土壤水分与地形—植被因子之间的关系。结果表明:对固定沙丘而言,第 1,第 2 排序轴特征值分别为 0.46,0.06;第 1,第 2 排序轴之间的相关系数分别为 0.62(>0.5),0.56(>0.5)。由此可知,固定沙丘上不同深度的土壤水分与地形—植被因子的 RDA 排序结果是可信的。排序轴与因子之间的线性结合程度较好地反映了土壤水分和地形—植被因子之间的相关关系,前 2 个排序轴累计解释 70.27% 的土壤水变化信息。对半固定沙丘而言,第 1,第 2 排序轴特征值分别为 0.49,0.04;第 1,第 2 排序轴之间的相关系数分别为 0.71(>0.5)和 0.68(>0.5)。由此可知,半固定沙丘上不同深度的土壤水分与地形—植被因子的 RDA 排序结果是可信的。排序轴与因子之间的线性结合程度较好地反映了土壤水分和地形—植被因子之间的相关关系。前 2 个排序轴累计解释 71.93% 的土壤水变化信息。对流动沙丘而言,第 1,第 2 排序轴特征值分别为 0.40,0.05,第 1,第 2 排序轴之间的相关系数分别为 0.54(>0.5),0.52(>0.5)。由此可知,流动沙丘上不同深度土壤水分和地形—植被因子的 RDA 排序结果是可信的。排序轴与地形—植被因子之间的线性相关程度较好地反映了土壤水分和地形—植被变量之间的关系;前 2 个排序轴累计解释 66.11% 的土壤水变化信息。

图 7 为 3 种类型沙丘上土壤水分与地形—植被因子的 RDA 排序结果,地形—植被因子的长度表示其对土壤水分的影响程度的大小。土壤水分与地形—植被因子之间夹角的大小表示它们之间相关性的大小,夹角越小,其相关性越高<sup>[18]</sup>。

从图 7A 可见,固定沙丘上对土壤水分影响显著的地形—植被因子有高差、灌木多度。对表层土壤水分而言,草本盖度、草本多度对其有正相关关系,凋落物、高差、灌木盖度、灌木多度、坡度对其有负相关关系;对中层土壤水分而言,生物量、坡向、草本多度、草本盖度对其有正相关关系,坡度、灌木多度、灌木盖度、高差、凋落物对其有负相关关系;对深层土壤水分而言,生物量、坡向对其有正相关关系,坡度、灌木多度、灌木盖度、高差、凋落物对其有负相关关系。

从图 7B 可见,半固定沙丘上对土壤水分影响显著的地形—植被因子有坡度、坡向、灌木盖度。对表层土壤水分而言,草本多度、凋落物、草本盖度对其有正相关关系,高差、生物量、坡度、灌木盖度、灌木多度、坡向对其有负相关关系;对中层土壤水分而言,坡向、灌木多度、凋落物、草本多度对其有正相关关系,灌木盖度、坡度、生物量、高差、草本盖度对其有负相关关系;对深层土壤水分而言,凋落物、灌木多度、草本多度对其有正相关关系,灌木盖度、坡度、生物量、高差对其有负相关关系。

从图 7C 可见,流动沙丘上对土壤水分影响显著的地形—植被因子有坡向。对表层土壤水分而言,草本多度、灌木盖度对其有正相关关系,草本盖度、高差、坡度、凋落物、生物量对其有负相关关系;对中层土壤水分而言,灌木多度、草本盖度、高差、坡度对其有正相关关系,生物量、凋落物、灌木盖度、坡向、草本多度对其有负相关关系;对深层土壤水分而言,灌木多度、草本盖度、高差、坡度、生物量、凋落物对其有正相关关系,灌木盖度、坡向、草本多度对其有负相关关系。

## 4 讨论

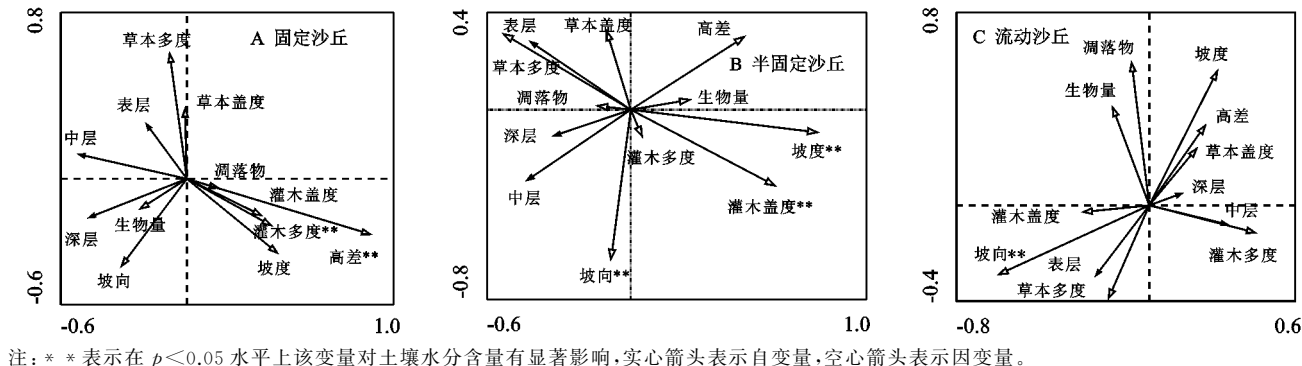
### 4.1 不同深度土壤水分的变化特征

古尔班通古特沙漠 3 种不同类型沙丘上土壤水分的波动程度在表层 0—40 cm 最大,随着深度的增加土壤水分的波动程度逐渐减小,(半)固定沙丘上土壤水分的波动程度显著高于流动沙丘。这一结论与赵从举等<sup>[19]</sup>的研究结论一致,主要原因是由于古尔班通古特沙漠虽然大部分沙丘处于固定和半固定状态,但其的稳定性很差。因土壤发育微弱,在剖面 1 cm 以下砂物质处于松散状态,有利于降水入渗,使得其波动程度较大<sup>[20]</sup>。中层和深层土壤水分主要受降水强度、固沙植物根系的分布和根系对水分的利用等因素影响,与地表的蒸发联系较弱,波动程度较小。

研究区不同类型沙丘上的土壤水分固定沙丘>半固定沙丘>流动沙丘。一方面是由于冬季古尔班

通古特沙漠存在一定量的降水,并在地表形成了稳定的积雪。春季到来以后,积雪融化,部分的水分补给给砂土层,且形成悬湿沙层,其厚度可达 50—60 cm。固定沙丘相对于半固定和流动沙丘植被盖度较大、土

壤细颗粒含量高、土壤质地紧密并有一定盖度的生物土壤结皮发育,使得表层土壤的阻水能力增加,减少了土壤水的蒸发<sup>[21]</sup>。因此,研究区不同类型沙丘上的土壤水分固定沙丘>半固定沙丘>流动沙丘。



注: \* \* 表示在  $p < 0.05$  水平上该变量对土壤水分含量有显著影响,实心箭头表示自变量,空心箭头表示因变量。

图7 3种类型沙丘上土壤水分与地形—植被因子的RDA排序

Fig. 7 RDA ranking of soil moisture and topography-vegetation factors on three types of sand dunes

#### 4.2 不同类型沙丘不同微地貌类型土壤水分的分布特征

土壤水分在沙丘不同微地貌类型上的分布规律不同。本研究表明,所有类型沙丘不同深度的土壤水分有显著的差异,这一结论与金可等<sup>[22]</sup>对古尔班通古特沙漠水文研究结论相一致。造成这种现象的原因是土壤水分对降水入渗补给的直接效应与沙丘不同微地貌类型表层土壤水分的差异与其的渗透性和下垫面差异有关,而土壤水分对降水入渗补给再分配的间接效应与沙丘不同微地貌类型中层、深层土壤水分差异与沿地形坡度方向的汇流和壤中流有关。本研究也表明,固定沙丘上丘底与背风坡之间无显著差异,但与迎风坡/丘顶之间有显著差异;所有类型沙丘上丘底土壤水分最高,丘顶最低,且背风坡、丘底和迎风坡3种微地貌类型上不同深度的土壤水分分布大致呈相对比较集中的单峰分布,其上土壤水分出现极高和极低的概率较小。这与植被分布的不同与局部地形的差异有关。白梭梭和梭梭种群是古尔班通古特沙漠固定沙丘的主要植物种群。沙漠坡底处和荒漠灌木—梭梭根区土壤水分高。降雨转化为土壤水分形成空间差异是梭梭树干径流在根部的汇聚作用、坡面汇流和壤中流、沙丘不同微地貌类型渗透性不同的主要原因,且沙漠土壤质地较粗,不同微地貌类型土壤水分差异明显,细沙与极细沙含量最高的是迎风坡,垄间地和背风坡黏土和粉砂多,垄顶则主要以中沙、粗沙和极细沙为主。风沙土粒度分布受沙丘地形影响显著,土壤粒径由小到大的顺序依次为垄间地、迎风坡、背风坡和垄顶。因此,固定沙丘丘底土壤水分最高。对所有类型沙丘而言,丘顶土壤水分和其波动程度均高于丘底,在今后植物固沙和生态恢复过程

中,首先应当在丘顶的合理位置设置沙障,防止沙埋、沙蚀等风沙危害。其次,若采用草方格进行固沙,丘顶处扎设的草方格和栽植的固沙植物的密度可较背风坡和丘顶处的更加密集一些,这样可以进一步提高生态恢复的速率。

#### 4.3 土壤水分与地形—植被因子之间的关系

沙丘地表的植被类型和覆盖度差异是影响沙区土壤水分的重要因素。本研究表明流动沙丘不同深度的土壤水分受地形—植被因子的影响较半固定沙丘和固定沙丘弱。影响固定沙丘上土壤水分的地形—植被因子主要有高差和灌木多度;影响半固定沙丘上土壤水分的地形—植被因子主要有坡度、坡向和灌木盖度;影响流动沙丘上土壤水分的地形—植被因子主要有坡向。大部分地形—植被因子与半固定和流动沙丘上不同深度的土壤水分均有负相关关系。这一结论与周宏飞等<sup>[23]</sup>对于沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性的研究结论基本一致。这是因为流动沙丘植被较固定和半固定沙丘稀疏,沙区风沙活动对流动沙丘的影响较强。因此,影响流动沙丘上土壤水分的地形—植被因子主要为坡向。

本文研究也表明,固定沙丘表层土壤水分主要受草本盖度、草本多度的影响,而深层土壤水分主要受坡向、生物量的影响。这一结论与马风云等<sup>[24]</sup>对于沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性的研究结论基本一致。这是因为根系浅的草本植物主要对表层附近土壤水分影响大,而根系较深的灌木对深层土壤水分影响大。固定沙丘上对土壤水分影响显著的地形—植被因子主要有高差和灌木多度。因此,固定沙丘上固沙灌木的数量应维持在一定的生态水文阈值内,这样才能保持其生态系统的健康<sup>[25]</sup>。同时,草



本植物的盖度和多度对固定沙丘上表层、中层的土壤水分均有正向关系。因此,在固沙植被生态系统的保护过程中,应该加强草本植物的保护,防止放牧等不适宜的人类活动对生态系统的破坏。对研究区的(半)固定沙丘而言,大部分地形—植被因子对土壤水分均有负向相关关系。因此,如果(半)固定沙丘对人类正常的生产活动有较大的影响,应该采取科学合理的固沙措施促使其固化。如果半固定和流动沙丘没有影响生产活动,可以保护其原有的地貌类型,这也间接上保护了沙漠中的水分,有利于沙区水循环的科学管理。

## 5 结论

(1) 所有类型沙丘上 0—300 cm 的土壤水分的波动程度随深度的增加逐渐减小,表层土壤水分的波动程度大于中层和深层,同时,所有类型沙丘上土壤水分均在 180 cm 附近达到最大。

(2) 所有类型沙丘不同深度的土壤水分有显著的差异,且背风坡、丘底和迎风坡 3 种微地貌类型上不同深度的土壤水分分布大致呈相对比较集中的单峰分布,其上土壤水分出现极高和极低的概率较小。固定沙丘丘底土壤水分最高,丘顶最低,具体而言,4 种微地貌类型下,固定沙丘表层土壤水分的顺序为:丘底( $1.5 \pm 0.24$ ) > 背风坡( $1.35 \pm 0.21$ ) > 迎风坡( $1.1 \pm 0.2$ ) > 丘顶( $1.07 \pm 0.42$ );中层土壤水分的顺序为:丘底( $2.24 \pm 0.27$ ) > 丘顶( $1.61 \pm 0.78$ ) > 背风坡( $1.59 \pm 0.21$ ) > 迎风坡( $1.5 \pm 0.15$ );深层土壤水分的顺序为:丘底( $2.43 \pm 0.34$ ) > 迎风坡( $1.99 \pm 0.13$ ) > 背风坡( $1.73 \pm 0.18$ ) > 丘顶( $1.56 \pm 0.55$ )。

(3) 地形—植被因子对研究区绝大多数(半)固定沙丘的土壤水分呈负相关关系,对(半)固定沙丘不同深度土壤水分影响较流动沙丘更为明显,地形植被因子可以解释(半)固定沙丘土壤水分 71.93%, 70.27% 的信息。影响固定沙丘土壤水分的主要地形—植被因子有高差、灌木多度,影响半固定沙丘土壤水分的主要地形—植被因子有坡度、坡向、灌木盖度,影响流动沙丘土壤水分的主要地形—植被因子有坡向。

研究结果对研究区固沙植被生态系统的保护利用和建立科学合理的防风固沙措施提供了科学的依据,对未来该地区固沙植被的建立具有一定的指导意义。建议在防止固定沙丘活化的基础上,综合考虑沙丘类型、沙丘不同微地貌类型土壤水分的差异以及土壤水分与地形—植被因子的关系因地制宜地开展固沙植被建设。同时结合不同类型沙丘上不同微地貌类型的生态水文过程进一步探索科学合理的固沙模式。

## 参考文献:

- [1] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes [J]. Elsevier, 2004(1):105-106.
- [2] Wilson D J, Western A W, Grayson R B. Identifying and quantifying sources of variability in temporal and spatial soil moisture observations[J]. Water Resources Research, 2004,40(2):191-201.
- [3] Choi M, Jacobs J M. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints[J]. Advances in Water Resources, 2007,30(4):883-896.
- [4] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake hill, texas[J]. Journal of Hydrology, 1998,210(4):259-281.
- [5] Chi Zheng, Xu Xianying, Liu Kailin, et al. Erosion and deposition status of surface morphology and observational spatial pattern in two sand barriers[J]. Arid Land Geography, 2021,44(6):1654-1664.
- [6] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2001,49(4):723-750.
- [7] Yang F, Zhang G L, Yang J L, et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:3086-3093.
- [8] Yhjac D, Mas B. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2013,117:33-42.
- [9] Ibrahimia Fadjah Bah, 张定海, 孙琰蕙, 等. 古尔班通古特沙漠东南部 3 种沙丘上优势灌木的空间格局及种间关联性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022,36(7):154-165. Ibrahimia Fadjah Bah, Zhang D H, Sun Y H, et al. Spatial pattern and interspecific association of dominant shrubs on sand dunes in the southeastern Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(7):154-165.
- [10] 杨海峰, 钱亦兵, 蒋超, 等. 古尔班通古特沙漠南缘主要土壤化学特征的空间异质性[J]. 中国沙漠, 2010,30(2):7-15. Yang H F, Qian Y B, Jiang C, et al. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in the south Gurbantonggut desert[J]. Journal of Desert Research, 2010,30(2):7-15.
- [11] 李功麟, 张定海, 张志山, 等. 古尔班通古特沙漠沙丘主要灌木的种群数量动态[J]. 中国沙漠, 2021,41(2):



- 129-137.
- Li G L, Zhang D H, Zhang Z S, et al. Population dynamics of main sand-fixing shrubs in the Gurbantungut Desert[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 129-137.
- [12] 孙琰蕙, 张定海, 张志山. 腾格里沙漠不同类型沙丘土壤水分含量与地形—植被因子关系研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1570-1578.
- Sun Y H, Zhang D H, Zhang Z S. Relationship between soil moisture content and topography-vegetation factors in different types of dunes in the Tengger Desert[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1570-1578.
- [13] 石亚飞, 张志山, 黄磊, 等. 古尔班通古特沙漠半固定沙丘植物群落物种组成和种群结构[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 7-15.
- Shi Y F, Zhang Z S, Huang L, et al. Species composition and population structure of plant communities on semi-fixed dunes of the Gurbantongut Desert, China. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 7-15.
- [14] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 等. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(3): 257-266.
- Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J]. Scientia Sinica(Vitae), 2014, 44(3): 257-266.
- [15] 路丽宁, 张定海, 李功麟. 古尔班通古特沙漠固沙灌木的冠幅预测模型[J]. 生态科学, 2022, 41(5): 81-89.
- Lu L N, Zhang D H, Li G L. Crown prediction models of the sand-fixing shrubs in Gurbantungut desert[J]. Ecological Science, 2022, 41(5): 81-89.
- [16] 张亚男. 广东省韩江流域水库轮虫群落的物种多样性和线粒体宏基因组应用于轮虫群落的初步研究[D]. 广州: 暨南大学, 2021.
- Zhang Y N. Species diversity of rotifer communities and primarily application of mitochondrial metagenomics to rotifer communities in reservoirs of Hanjiang River Basin, Guangdong Province [D]. Guangzhou: Jinan University, 2021.
- [17] 商大伟. 典型丝状藻类对人工湿地系统强化脱氮及其资源化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.
- Shang D W. Research on denitrification enhance by typical filamentous algae in constructed wetland system and resource utilization[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2021.
- [18] 马小燕, 朱晓雯, 赵金涛, 等. 基于 SPEI 的宁夏沿黄城市带干旱特征及驱动性分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 364-373.
- Ma X Y, Zhu X W, Zhao J T, et al. Analysis of drought characteristics and driving forces in the urban belt along the yellow river in Ningxia based on SPEI [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 364-373.
- [19] 赵从举, 雷加强, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠腹地春季土壤水分空间分异研究[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 154-158.
- Zhao C J, Lei J Q, Wang X Q, et al. The spatial distribution of the spring soil moisture in the hinter land of Gurbantonggut desert [J]. Arid Land Geography, 2003, 26(2): 154-158.
- [20] 李禄军, 蒋志荣, 车克钧, 等. 绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 123-127.
- Li L J, Jiang Z R, Che K J, et al. Temporal and spatial variation of soil water in sand dunes at eco-tone between oasis and desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(1): 123-127.
- [21] 朱林峰. 不同盖度油蒿群落土壤水分及养分时空变异特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- Zhu L F. Temporal and spatial heterogeneity of soil moisture and nutrients in Artemisia ordosica community with difference coverage[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [22] 金可, 卢阳, 周火明, 等. 古尔班通古特沙漠水文研究进展[J]. 水文, 2022, 42(1): 1-10.
- Jin K, Lu Y, Zhou H M, et al. Research progress on the hydrology in the Gurbantungut desert[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1): 1-10.
- [23] 周宏飞, 肖祖炎, 姚海娇, 等. 古尔班通古特沙漠树枝状沙丘土壤水分时空变异特征[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 771-777.
- Zhou Hong Fei, Xiao Z Y, Yao H J, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in dendritic sand dune over Gurbantungut Desert in central Eurasia[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 771-777.
- [24] 马风云, 李新荣, 张景光. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 789-795.
- Ma Fengyun, Li X R, Zhang J G. Spatial heterogeneity of soil moisture with artificial sand-fixing vegetation in Shapotou[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 789-795.
- [25] 张定海, 李新荣, 张鹏. 生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 678-688.
- Zhang Dinghai, Li X R, Zhang P. Significance of eco-hydrological threshold in artificial vegetation ecosystem in China desert area[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 678-688.