

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.027.

张艳花, 张定海, 马钰, 等. 古尔班通古特沙漠流动沙丘土壤水分与地形—植被因子关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5):182-191.

Zhang Yanhua, Zhang Dinghai, Ma Yu, et al. The Relationship Between Soil Moisture and Topographic-Vegetation Factors in Mobile Dune in Gurbantunggut Desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5):182-191.

古尔班通古特沙漠流动沙丘土壤水分与地形 —植被因子关系

张艳花¹, 张定海¹, 马钰¹, 王艳莉², 石亚飞³

(1.甘肃农业大学 理学院 数量生物研究所, 兰州 730070; 2.甘肃农业大学
林学院, 兰州 730070; 3.甘肃农业大学 草业学院, 兰州 730070)

摘 要: [目的] 确定沙漠沙丘土壤水分的分布规律, 明确土壤水分与各个地形与植被因子间的关系, 进而为沙漠地区的植被保护和重建提供科学合理的建议。 [方法] 以古尔班通古特沙漠流动沙丘为研究对象, 在小尺度上研究了不同深度(表层 0—40 cm, 中层 40—200 cm 和深层 200—300 cm)、不同微地貌(迎风坡、背风坡、丘顶和丘底)上土壤水分的分布特征(描述性统计); 并采用广义线性、广义加性和随机森林模型研究了土壤水分与地形—植被因子间的关系。 [结果] (1) 不同深度下迎风坡与丘底上的土壤水分高于背风坡与丘顶; 表层土壤水分在背风坡(包括丘顶和丘底)与迎风坡上有显著性差异。(2) 地形因子对土壤水分的影响大于植被因子; 影响表层土壤水分的主要因子是坡度与坡向, 影响中层和深层土壤水分的主要因子是灌木盖度。(3) 随机森林模型的拟合效果显著高于广义线性和广义加性模型。 [结论] 地形因子对古尔班通古特沙漠流动沙丘不同微地貌上土壤水分的影响较植被因子大, 坡度和坡向对表层土壤水分具有重要影响, 灌木盖度对中层和深层土壤水分具有重要影响。

关键词: 土壤水分; 微地貌; 流动沙丘; 随机森林; 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)05-0182-10

The Relationship Between Soil Moisture and Topographic-Vegetation Factors in Mobile Dune in Gurbantunggut Desert

Zhang Yanhua¹, Zhang Dinghai¹, Ma Yu¹, Wang Yanli², Shi Yafei³

(1. Institute of Quantitative Biology, College of Science, Gansu Agricultural University,
Lanzhou 730070, China; 2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070,
China; 3. College of Grass Industry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to determine the distribution pattern of soil water in desert dunes, to clarify the relationship between soil water and various terrain and vegetation factors, so as to provide scientific and reasonable suggestions for the protection and reconstruction of vegetation in desert areas. [Methods] There were four different micro-landforms, including windward slope, leeward slope, hill top and bottom. The soil moisture was divided into surface (0—40 cm), middle (40—200 cm) and deep (200—300 cm) layers. The distribution characteristics of soil water on different micro-landforms and depths in Gurbantunggut Desert were studied on the small scale. Generalized linear model, generalized additive model and random forest were used to study the relationship between soil moisture and topographic-vegetation factors. [Results] (1) The soil moisture on the windward slope and the bottom of the hill was

收稿日期: 2023-10-09

修回日期: 2023-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(42361016); 甘肃省科技创新计划“西部之光”人才计划项目(22JR9KA032); 甘肃农业大学青年导师扶持资助项目(GAU-QDFC-2023-07); 甘肃省科技计划项目(21JR7RA831); 重点研发计划—农业领域(23YFNA0036)

第一作者: 张艳花(1999—), 女, 山西忻州人, 硕士生, 研究方向为生态统计。E-mail: zyh13045138291@163.com

通信作者: 张定海(1981—), 男, 甘肃张掖人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文模型、统计学在生态学和经济学中的应用研究。E-mail: zhang-dh@gsau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

higher than that on the lee slope and the top of the hill at different depths. There were significant differences of surface soil moisture between the lee slope (including the top and bottom of the hill) and the windward slope. (2) The effect of topographic factors on soil moisture was greater than that of vegetation factors. The main factors affecting surface soil water were slope and slope direction. The main factors affecting middle and deep soil water was shrub cover. (3) The fitting effect of the random forest was significantly higher than that of the generalized linear model and generalized additive model. [Conclusion] As for soil moisture on different micro-landforms, topographic factors have a greater impact on mobile dunes in Gurbantunggut Desert than vegetation factors. Slope and slope direction have the important influence on surface soil moisture. Shrub cover has a major effect on middle and deep soil moisture.

Keywords: soil moisture; micro-landforms; mobile dune; random forest; Gurbantunggut Desert

沙漠生态系统是我国陆地生态系统的重要组成部分,可提供防风固沙、涵养水源和气候调节等多重生态系统服务^[1]。土壤水分是气候、植被、地形及土壤等多种因素的综合反映,在沙漠生态系统中起着至关重要的作用^[2]。在局地尺度上,受地形、植被和土壤理化性质等多种因素的共同影响,土壤水分会呈现出复杂的分布和动态变化^[3]。同时,沙区降水稀少且季节分配不均匀,光照强且水分蒸发量大,使得土壤水分成为限制植物生长和植被恢复的主要因素。因此,研究土壤水分的分布特征及其与地形—植被因子的关系对揭示沙漠生态系统的稳定性和演替具有重要意义。

就地形和植被因子对土壤水分的影响,国内外学者针对不同地形与植被影响下土壤水分的空间格局与时空演变特征进行了大量的研究。研究人员利用不同方法测定了北美洲南部大平原、西班牙西部半干旱区和丹麦地区等的土壤水分,研究了不同土壤、地形(海拔、坡度和坡向)和植被盖度下土壤水分的时空演变特征,发现上述因素均会对土壤水分的时空动态及空间格局的分布产生显著的影响^[4-5]。我国学者对沙地土壤水分的研究表明,地形是决定沙区土壤水分空间分布和影响丘间地尺度上土壤水分空间异质性的一个主要因素,不同地形对土壤水分的影响明显不同^[6-7];沙丘不同部位的土壤水分随着时间的变化呈现出一致的变化规律,地形和植被因子共同作用影响土壤水分的空间分布^[8-9];植被密度和盖度与土壤水分有密切的关系^[10],适宜的植被密度与盖度更有利于植物的生长^[11]。但是,大部分研究主要是在大尺度上展开的,对局地尺度的研究较少。同时,大多数研究主要针对地形或植被等单一或少量因子对土壤水分的影响研究,综合考虑多个因子对不同微地貌土壤水分影响的研究较少。本研究采用样带—网格数据,研究古尔班通古特沙漠流动沙丘上不同深度(表层 0—40 cm,中层 40—200 cm 和深层 200—300 cm)不同微地貌类型上(迎风坡、背风坡、丘底和丘

顶)的土壤水分的分布规律及其与地形—植被因子间的关系,以期在小尺度上揭示研究区土壤水分的分布规律及其与地形—植被因子间的关系,进而为该地区的植被保护和重建提供科学的理论依据。

1 研究区概况

研究区是位于新疆维吾尔自治区北部准噶尔盆地中南部的古尔班通古特沙漠(44°11'—46°20'N,84°31'—90°00'E),海拔 300~600 m,占地面积约 4.88×10^4 km²,是我国的第二大沙漠^[12-13]。研究区昼夜温差大,夏季气温高,冬季气温低,年均温度约为 7.5 °C,极端最低温度—37 °C,极端最高温度 42.3 °C,年蒸发量为 2 000~2 800 mm。年均降水量为 70~150 mm,主要集中在春季和冬季,平均积雪深度为 20~30 cm,年均积雪覆盖时间为 100~150 d,是典型的干旱内陆气候^[14]。地势呈南高北低,主要沙丘类型有固定、半固定和流动沙丘。固定沙丘顶部形成了以白梭梭为主的固沙灌木群落,盖度为 15%~30%;垄间则以梭梭群落为主,盖度为 20%~50%。流动沙丘上的优势固沙灌木有白梭梭(*Arthrophytum acutifolium*)、沙拐枣(*Calligonum potaninii*)、蛇麻黄(*Humulus lupulus*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等^[15]。

2 材料与方法

2.1 试验设计

2022 年 8 月在对古尔班通古特沙漠南缘地区的沙丘类型和植被全面考察后,在距离彩南油田附近 10 km 处的流动沙丘上设置一块 40 m×148 m 的试验样地,样地涵盖了迎风坡、背风坡、丘顶和丘底 4 种微地貌类型,设置了 10 行(A—J)37 列(1—37)共计 370 个小样方,每个小样方的大小为 4 m×4 m(图 1)。在 C 行、F 行和 I 行分别设置共计 72 个土壤水分采样点。同时,在坡度较陡的地方进行加密采样。利用土钻法测量 0—300 cm 的土壤水分,土壤水分分

18层进行采样,采样间隔为:0—5 cm,5—15 cm,15—25 cm,25—35 cm,35—50 cm及50 cm以下每隔20 cm采样1次。在E行的每个4 m×4 m的小样方中利用50 cm×50 cm的草本样方调查每个小样方的草本盖度、草本多度和凋落物含量。利用标记牌标记样地内每株灌木,调查每个样方中灌木的盖度和多度。利用样方定位点得到的数据,计算每个小样方地形因子坡度、坡向和高差的数值^[16]。

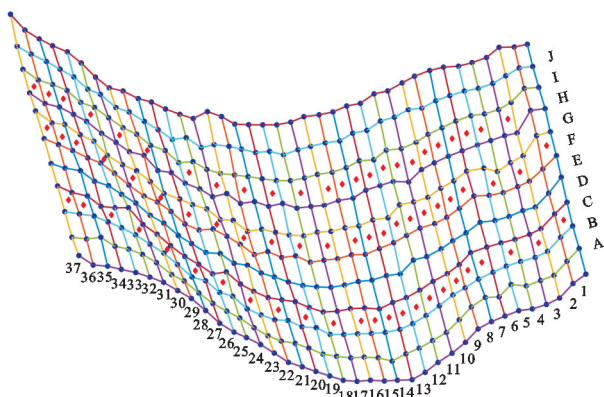


图1 样地示意图

Fig. 1 Plot diagram

2.2 研究方法

2.2.1 土壤水分的划分 草本植物的根系较浅,主要分布在土壤表层,这一特性使得它们能够高效地利用表层土壤中的水分。相比之下,灌木的根系更深,能够利用更深层次的土壤水分。因此,为了更准确地研究土壤水分的动态变化及其对植物生长的影响,本研究决定对土壤水分进行分层处理,具体的分层方法是将0—40 cm定义为表层、40—200 cm定义为中层、200—300 cm定义为深层^[17]。

2.2.2 数据预处理—标准化 为了消除地形和植被因子变量量级和量纲的不同,采用极差标准化法对数据进行标准化处理,极差标准化法的如公式(1)所示。

$$X_i = \frac{x_i - \min\{x_i\}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad (1)$$

$$Y_j = \frac{y_j - \min\{y_j\}}{\max\{y_j\} - \min\{y_j\}}$$

$$i=1,2,\dots,9; j=1,2,3$$

式中: x_i 表示地形和植被因子; y_j 表示土壤水分; $X_i, Y_j \in [0,1]$ 且无量纲。

2.2.3 广义线性模型 广义线性模型(GLM, generalized linear model)由一般线性模型推广而来,由Nelder & Wedderburn于1972年首先提出,主要通过连接函数 $g(\cdot)$ (link function)构建因变量第 i 个测量值 Y_i 的数学期望值 $\mu_i = E(Y_i)$ 与预测变量第 i 组测量值的线性组合 $\sum_{j=1}^n x_{ij}\beta_j$ 之间的关系。与一般

线性模型相比,广义线性模型中因变量 Y 的分布可以是任意形式的指数分布,连接函数可根据实际数据分布特点选择相对应的单调可微函数^[18]。广义线性模型的形式如公式(2)所示。

$$g(\mu) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon \quad (2)$$

式中: $g(\mu)$ 为连接估计平均值与响应变量分布的连接函数; β_0 为截距; β_i 为待估的回归系数; x_i 为预测值; ϵ 为误差,服从高斯分布。

2.2.4 广义加性模型 广义加性模型(GAM, generalized additive model)是Hastie和Tibshirani于1990年提出,是在广义线性模型和加性模型的基础上发展而来的,是GLM的非参数扩展^[19]。广义加性模型由不同的加性项组成,使用单个光滑样条函数来估计每个加性项,每一加性项中可以解释因变量如何随自变量的变化而变化,广义加性模型的形式如公式(3)所示。

$$Y_i = \alpha + S_1(x_1) + S_2(x_2) + \dots + S_n(x_n) + \epsilon \quad (3)$$

式中: Y_i 表示因变量; α 是截距; x_1, \dots, x_n 表示自变量; n 为变量个数; S_1, \dots, S_n 表示非参数光滑样条函数; ϵ 表示随机误差项。

2.2.5 随机森林算法 随机森林算法(RF, random forest)是Breiman于2001年提出的一种基于bagging和随机特征选择技术的集成学习方法,是决策树算法的延展^[20]。其本质是利用多棵树对样本进行训练并预测的分类器,常用于分类、回归、特征筛选与特征排序,能够克服机器学习算法中的过度拟合问题。具体来说,RF通过重抽样等技术对训练样本进行随机采样,进而并列训练若干个(如 M 个)不同的决策树,最后通过投票、取平均等方式将 M 个决策树预测结果组合起来作为最终的输出结果。本研究将最大决策树设置为2000棵,采用10折交叉验证检验模型的性能,并基于IncMSE(变量重要性指数)指标给出各影响因子的重要程度及其排名。

3 结果与分析

3.1 不同微地貌上土壤水分的分布特征

3.1.1 不同深度土壤水分及地形—植被因子的描述性统计 表1列出了不同深度的土壤水分和地形—植被因子的描述性统计量。整体而言,表层的土壤水分(重量比)最小(其最大值为3.66%),深层次之(其最大值为4.56%),中层最大(其最大值为5.07%)。相较于标准差,变异系数可以消除量纲的影响,对平均值不同的变量的差异做出比较,表层土壤水分的变异系数最大(0.86),其次是中层(0.73)和深层土壤水分(0.63),说明表层土壤水分的波动大。

表 1 影响土壤水分的地形—植被因子的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of topographic-vegetation factors affecting soil moisture

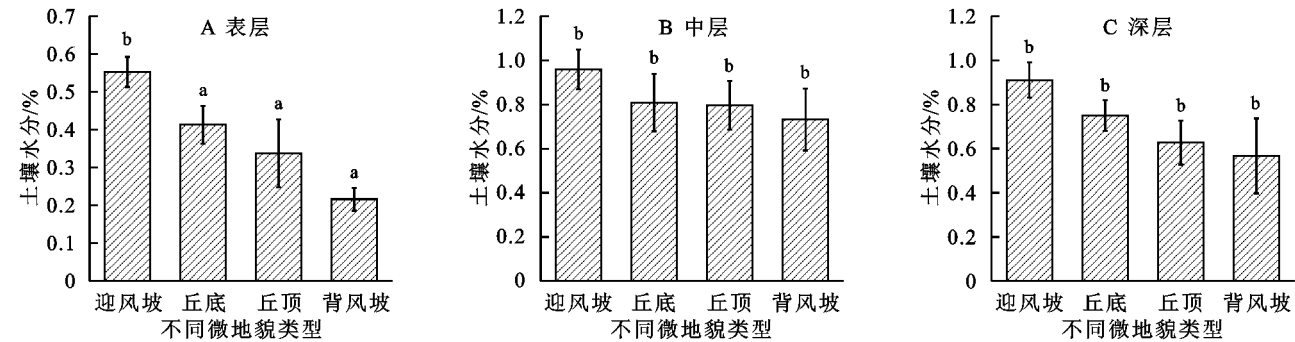
指标	最大值	最小值	均值	标准差	标准误	变异系数
表层土壤水分/%	3.66	0.02	0.43	0.37	0.02	0.86
中层土壤水分/%	5.07	0.01	0.87	0.64	0.01	0.73
深层土壤水分/%	4.56	0.03	0.83	0.52	0.03	0.63
坡度/(°)	18.32	1.22	8.94	4.53	0.53	0.51
坡向/(°)	358.20	0	105.41	103.37	12.18	0.98
高差/m	14.22	0.26	4.76	3.62	0.43	0.76
灌木盖度/%	62.00	0	20.01	26.61	3.14	1.33
灌木多度/%	18.00	0	2.10	1.81	0.02	0.86
草本盖度/%	6.50	0	1.80	1.64	2.00	0.91
草本多度/%	10.30	0	7.50	12.08	26.55	1.61
生物量/(g·m ⁻²)	120.12	0	21.51	23.45	2.75	1.09
凋落物/(g·m ⁻²)	207.68	0	23.45	33.06	3.89	1.41

注:各指标的单位仅体现于最大值、最小值和均值这几个统计量中;标准差、标准误和变异系数均是用于衡量数据分布情况的统计量。

3.1.2 不同深度土壤水分在不同微地貌下的分布

利用单因素方差分析和多重比较法对不同深度的土壤水分在不同微地貌上的差异性进行了显著性检验。总体而言(图 2),不同微地貌上的表层土壤水分均低于中层与深层,各层土壤水分在迎风坡与丘底处要高于背风坡与丘顶处。同时,除表层土壤水分在背风坡(包括丘顶和丘底)与迎风坡上有显著差异外,不同深度的土壤水分在 4 种微地貌上均没有显著性的差异。对表层土壤水分而言,不同微地貌上土壤

水分的大小依次为:迎风坡(0.55%)丘底(0.41%)>丘顶(0.34%)>背风坡(0.22%)。其中,迎风坡(包括丘底和丘顶)和背风坡处的土壤水分有显著性差异,其余微地貌上的土壤水分两两间均无显著性差异。中层和深层土壤水分的大小顺序分别为:迎风坡(0.96%)>丘底(0.81%)>丘顶(0.8%)>背风坡(0.73%);迎风坡(0.91%)>丘底(0.75%)>背风坡(0.63%)>丘顶(0.57%),4 种微地貌上中层和深层土壤水分两两间均没有显著差异。



注:相同的小写字母表示两者间土壤水分无显著性差异。

图 2 不同深度不同微地貌上土壤水分的分布

Fig. 2 Soil water distribution on different depths and different micro-landforms

3.2 基于广义线性模型的地形—植被因子对土壤水分的影响

将不同深度的土壤水分作为响应变量,样方所在的坡度、坡向、高差作为地形因子解释变量,灌木盖度和多度、草本盖度和多度、草本的生物量以及凋落物作为植被因子解释变量,利用广义线性模型研究地形因子和植被因子对土壤水分的影响。结果表明(表 2),坡度和坡向对表层土壤水分有显著影响,灌木多度对中层和深层土壤水分有显著性的影响。图 3 为广义线性模型给出的不同深度土壤水分随显著因子的变化趋势图。结果表明,土壤水分在不同深度下(表层、中层和深层)与因

子坡度、坡向和灌木多度均大致呈现线性相关关系。具体而言,地形因子坡度和坡向均与表层土壤水分呈负相关关系;植被因子灌木多度与中层土壤水分均呈正相关关系,与深层土壤水分呈负相关关系。

3.3 基于广义加性模型的地形—植被因子对土壤水分的影响

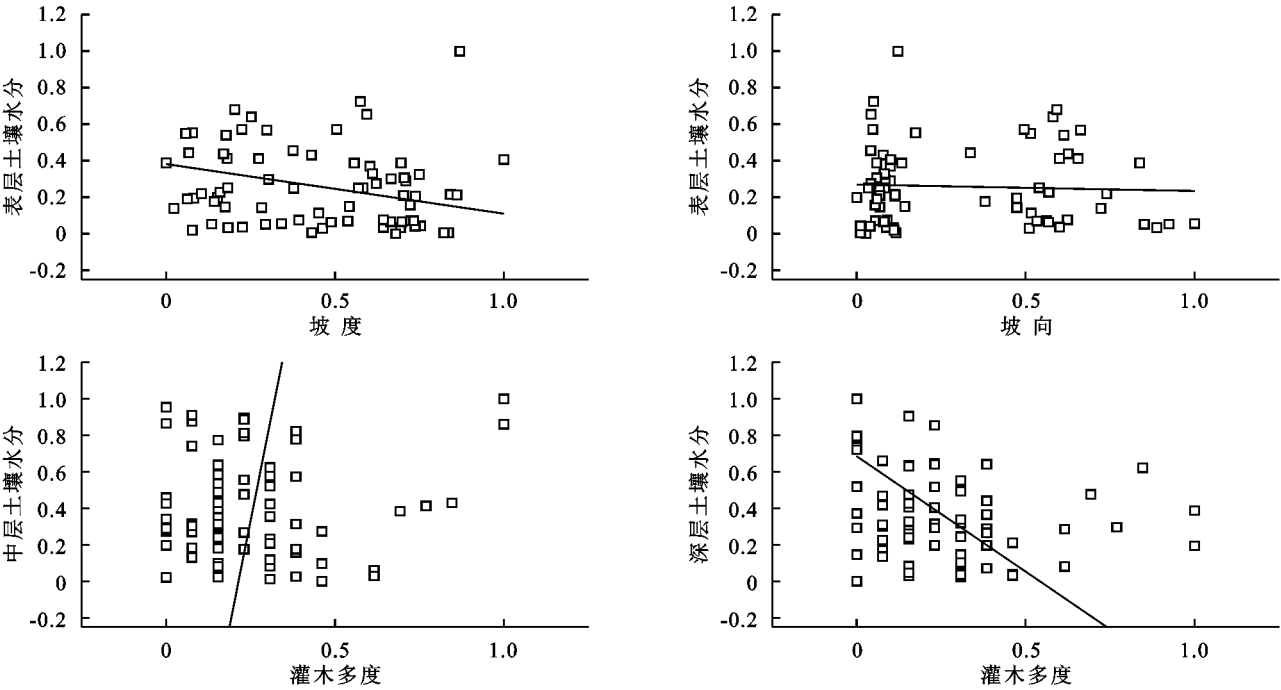
同样,利用广义加性模型对地形和植被因子对土壤水分的影响进行建模,结果表明(表 3),坡度和坡向对表层土壤水分有显著影响,坡向、灌木盖度和多度对中层土壤水分有显著性的影响,坡向和灌木多度对深层土壤水分有显著性的影响。

表 2 基于广义线性模型的地形—植被因子变量显著性检验结果

Table 2 Significance test results of topographic vegetation factor variables based on generalized linear model

变量	表层(0—40 cm)		中层(40—200 cm)		深层(200—300 cm)	
	估计自由度	<i>p</i> 值	估计自由度	<i>p</i> 值	估计自由度	<i>p</i> 值
坡度	−0.38	0.02 **	−0.28	0.11	−0.15	0.40
坡向	0.28	0.05 *	−0.12	0.44	0.05	0.76
高差	0.01	0.96	−0.09	0.66	0.10	0.62
灌木盖度	−0.01	0.92	−0.20	0.17	0.03	0.84
灌木多度	0.18	0.26	0.34	0.05 **	0.20	0.02 **
草本盖度	0.02	0.92	0.15	0.56	0.33	0.20
草本多度	−0.08	0.71	−0.17	0.45	−0.32	0.17
生物量	0.06	0.82	−0.16	0.59	−0.34	0.26
凋落物	−0.11	0.60	0.01	0.95	−0.05	0.81

注：* 表示 $p<0.1$ ，** 表示 $p<0.05$ 。



注：图中的土壤水分和各地形与植被因子均采用标准化数据。

图 3 基于广义线性模型的地形—植被因子对土壤水分的响应

Fig. 3 Response curve of topography-vegetation factors to soil water based on generalized linear model

表 3 基于广义加性模型的地形—植被因子变量显著性检验结果

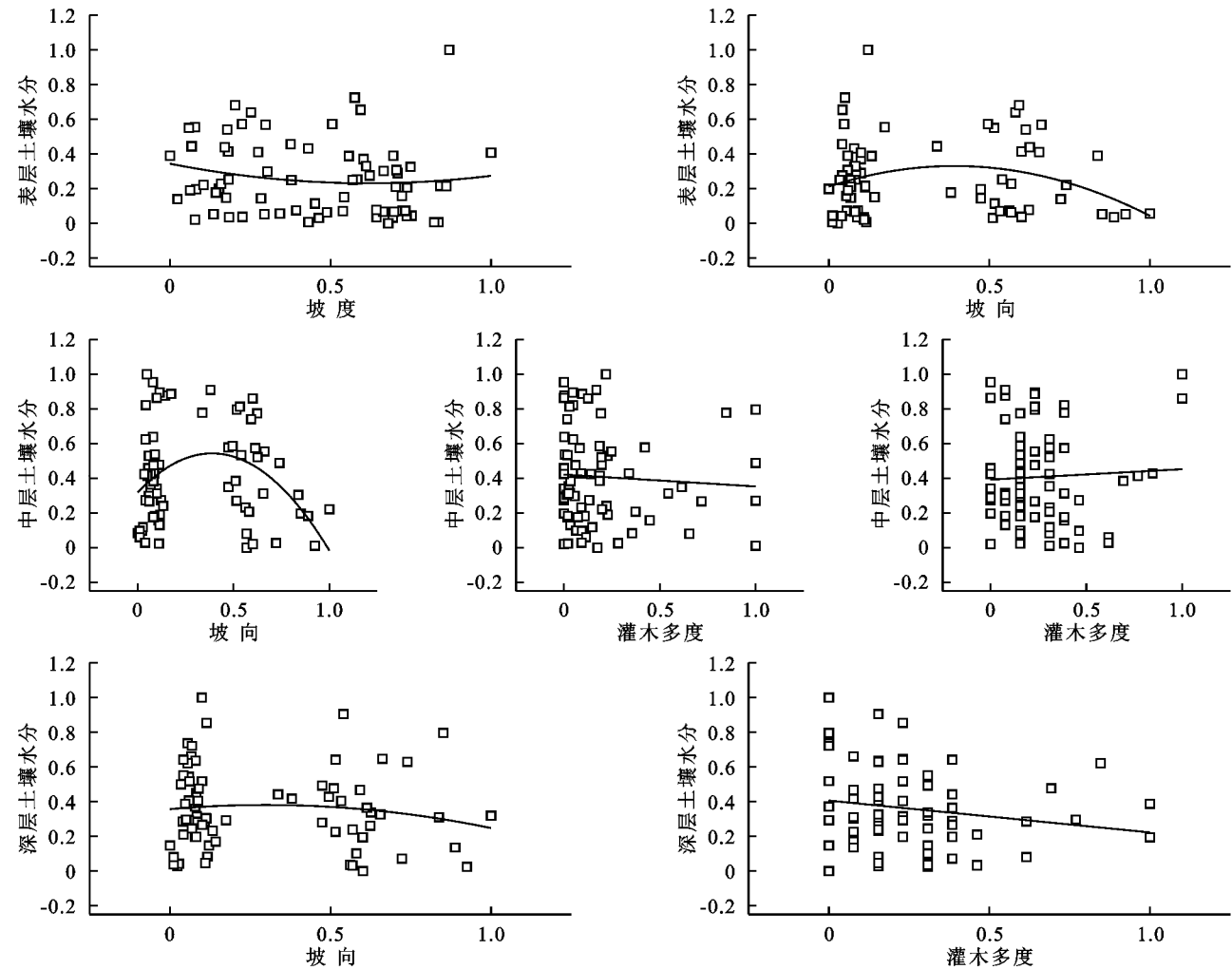
Table 3 Significance test results of topographic vegetation factor variables based on generalized additive model

变量	表层(0—40 cm)		中层(40—200 cm)		深层(200—300 cm)	
	估计自由度	<i>p</i> 值	估计自由度	<i>p</i> 值	估计自由度	<i>p</i> 值
坡度	2.91	0.05 *	1.00	0.49	1.00	0.99
坡向	2.37	0.00 ***	2.24	0.03 **	1.82	0.06 *
高差	2.71	0.23	1.44	0.53	1.00	0.79
灌木盖度	3.17	0.13	1.00	0.06 *	1.00	0.64
灌木多度	1.00	0.58	1.00	0.03 **	1.50	0.04 **
草本盖度	1.89	0.38	2.14	0.14	1.99	0.16
草本多度	1.00	0.24	1.00	0.96	1.00	0.56
生物量	1.00	0.60	1.00	0.66	1.73	0.17
凋落物	1.00	0.73	1.00	0.71	1.00	0.91

注：* 表示 $p<0.05$ ，** 表示 $p<0.01$ ，*** 表示 $p<0.001$ 。

同时,由广义加性模型下各显著因子的响应曲线结果可以看出(图 4),灌木盖度与中层土壤水分大致呈线性负相关关系,灌木多度与中层土壤水分大致呈线性正相关关系,与深层土壤水分呈负相关关系,这与表 3 得到的结果相吻合。

表 3 中估计的自由度越接近 1,认为该模型可拟合为直线,呈线性关系;反之,自由度比 1 大,认为二者之间的关系为非线性关系。因此,在广义加性模型下,坡度和坡向与表层、中层和深层土壤水分均呈现非线性关系。



注:图中的土壤水分和各地形与植被因子均采用标准化数据。

图 4 基于广义加性模型的地形—植被因子对土壤水分的响应

Fig. 4 Response curve of topography-vegetation factors to soil water based on generalized additive model

3.4 基于随机森林的地形—植被因子对土壤水分的影响

进一步,采用随机森林建模并提取对土壤水分产生重要影响的因子及因子的解释度(图 5)。总体而言,地形因子对不同深度土壤水分的影响高于植被因子。具体来讲,影响表层土壤水分的主要因子有坡向、坡度和高差,其重要度分别为 36%,31%和 16%;坡向、坡度和灌木盖度对中层和深层土壤水分具有重要的影响,其对中层土壤水分的重要度分别为 28%,23%和 16%,对深层土壤水分的重要度分别为 27%,25%和 15%。

地形—植被因子对不同深度土壤水分的影响趋势不同。总体来说,不同深度的土壤水分受地形因子

的影响要高于植被因子;就植被因子而言,表层和中层的土壤水分受草本盖度和多度的影响更大,深层的土壤水分受灌木盖度的影响更大。对表层土壤水分而言,随着坡向的增加,土壤水分呈现增加的趋势;随着坡度和高差的增加,土壤水分呈现明显的下降趋势;随着草本盖度的增加,土壤水分呈现先降低后升高的趋势。对中层土壤水分而言,随着坡向、坡度和灌木盖度的增加,土壤水分整体上呈现明显下降的趋势;土壤水分随草本盖度的变化趋势与表层相似。对深层土壤水分而言,随着坡度、坡向和草本多度的增加,土壤水分整体上大致呈下降的趋势;随着灌木盖度的增加,土壤水分呈上升趋势。

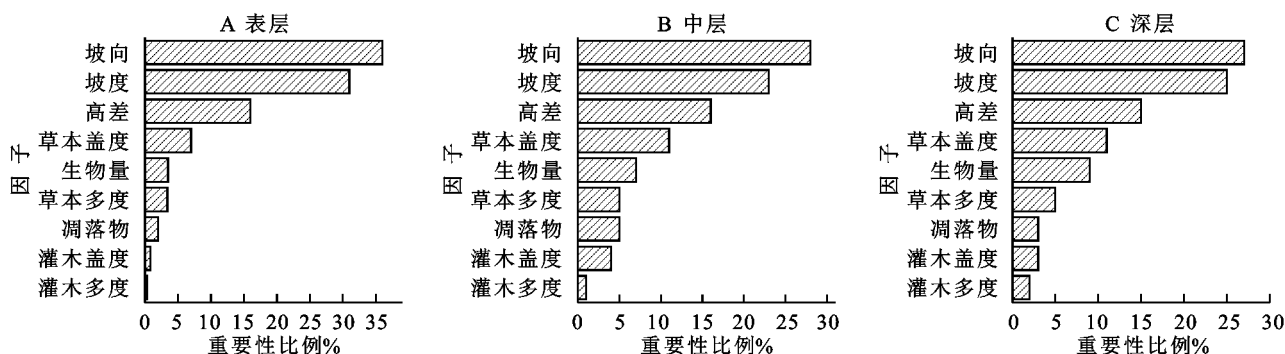


图 5 基于随机森林的地形—植被因子对土壤水分影响的重要性排序

Fig. 5 Ranking the importance of topographic and vegetative factors on soil moisture based on random forest

3.5 GLM, GAM 与 RF 模型的比较

采用判定系数 R^2 、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对值误差 (MAE) 3 个模型评价指标对 3 个模型进行评价。其中, R^2 是用来衡量两个变量间关系强度的一个指标, 其值越接近 1, 模型的拟合效果就越好。RMSE 表示预测值和观测值之间差异的样本标准差, 该值越小模型越优。MAE 表示预测值和观测值之间绝对误差

的平均值, 通常情况下 RMSE 要大于或等于 MAE。判定模型性能优劣的标准是在保证 MAE 和 RMSE 尽量小的情况下, R^2 越接近 1, 该模型的拟合效果越好。由表 4 可知, RF 模型 (其判定系数可达 0.9 以上) 远优于 GAM 模型, GAM 模型优于 GLM 模型, 说明随机森林模型能够更好地解释研究区不同深度土壤水分与各地形—植被因子之间的关系。

表 4 GLM, GAM 和 RF 模型的精度比较

Table 4 Precision comparison of GLM, GAM and RF models

深度	R^2			RMSE			MAE		
	GLM	GAM	RF	GLM	GAM	RF	GLM	GAM	RF
表层	0.31	0.67	0.94	0.24	0.17	0.10	0.20	0.13	0.08
中层	0.16	0.37	0.94	0.25	0.22	0.11	0.21	0.18	0.09
深层	0.08	0.27	0.92	0.26	0.23	0.13	0.21	0.19	0.11

4 讨论

4.1 不同微地貌类型上土壤水分的分布

单因素方差分析和多重比较的结果表明, 除表层土壤水分在背风坡 (包括丘顶和丘底) 与迎风坡上有显著差异外, 不同深度的土壤水分在 4 种微地貌上均没有显著性的差异。这与王锐等人在研究沙漠土壤水分的空间动态变化时得出的结论基本一致。相较于其他 3 种微地貌, 迎风坡处坡度陡、风力大、植被稀疏且常有冰雪等堆积物, 使得此处的土壤水分消耗更快且消耗量更大, 地表太阳蒸发是土壤水分散失的主要原因, 这是导致迎风坡的表层土壤水分与其他 3 种微地貌上的表层土壤水分有差异的可能原因; 沙地表面光照强且水分蒸发速率大, 可使表层快速变干, 下层土壤水分的蒸发耗损减少, 使得中层与深层土壤水分较表层更加稳定, 故不同微地貌上中层与深层的土壤水分无明显差异。此外, 不同深度的土壤水分在不同微地貌下的分布规律是大致相同的, 具体表现为丘底与迎风坡处的土壤水分普遍高于丘顶和背风坡。这与石莎等人在研究不同地形对沙漠植物生长和土壤水分的影响时得出的结论基本一致^[21]。出现这种

结果的原因可能是由于丘底处地势较低, 降水更容易聚集且光照时间短; 而背风坡处坡度陡且向阳, 相较于其他地形的蒸发更强。此外, 流动沙丘的沙土流动性较其他沙丘更强, 且沙漠地区海拔较高, 常年伴有沙尘暴等强对流风沙活动, 更有利于沙土由地势较高的丘顶处流向地势较低的丘底处, 这也是造成丘底和迎风坡的土壤含水量高于丘顶和背风坡的可能原因之一^[22]。另一方面, 不同微地貌类型的形成会导致该生态结构内的物质资源的重新分配, 从而造成丘底处土壤水分的聚集^[23-24]。

4.2 土壤水分与地形—植被因子之间的关系

通过分析发现影响表层土壤水分的主要因子是地形因子坡度与坡向, 而影响中层与深层土壤水分的因素除了上述地形因子外, 还有灌木盖度这一植被因子。这是由于植被主要通过蒸腾作用的水分渗入影响其根际层的水分, 沙漠干旱地区降水相对较少, 更适合灌木植物的生长, 而灌木相较于草本等其他植物的根系更深, 故而可对深层土壤水分产生影响^[25]。土壤表面会有由植被的枯枝落叶、微生物的分解等与其结交形成的生物结皮, 生物结皮会影响草本植物的萌发和出苗^[26], 即土壤表层更有利于草本植物的生

长,而草本植物的生长受土壤水分与地形等诸多因素的影响。灌木盖度这一植被因子与土壤水分呈负相关关系,这与石莎等人提出的灌木植物密度和盖度与土壤水分的变化密切相关这一结论相符,这表明土壤水分在很大程度上会影响灌木植物的生长。地形因子坡向和坡度与表层土壤水分有显著的负相关关系,这一结论与贾海坤等人在研究柠条林地坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系时得出的结论相一致。不同坡度坡向对辐射的遮蔽不同会导致土壤水分的差异,北坡的坡度越大,辐射越小,植物蒸腾作用越弱,导致此处的土壤水分较少;而东坡随着坡度的增加,土壤水分会明显的增长趋势,即土壤水分的差异均是由不同位置光合有效辐射差异引起的^[27]。

4.3 GLM, GAM 与 RF 的模型比较

采用 GLM, GAM 和 RF 模型分别探究了影响不同深度土壤水分的地形—植被因子,通过判定系数 R^2 、均方根误差 (RMSE) 及平均绝对值误差 (MAE) 3 个指标的综合评价发现 RF 模型的拟合效果要优于其他两种模型,该结果与张雪皎等在使用广义线性、广义加性和随机森林模型研究栎属树木多度分布及其对未来气候变化的响应的结果相符^[28]。GLM 模型只能用于解释响应变量与解释变量间的线性关系,而 GAM 模型在事先没有两种变量关系的明确假设时也仍然适用^[29]。在 GLM 与 GAM 模型中,为了提高模型对响应变量的解释能力,可以适当增加自变量的个数,但具有多重共线性的多个自变量的共同作用会导致模型出现过拟合的现象^[30]; RF 是一种典型的基于决策树的机器学习集成算法,不需要对函数形式进行事先假定,无需考虑一般回归模型可能面临的多重共线性和过拟合问题,在生态统计学中得到了较为广泛的应用。

5 结论

(1) 4 种微地貌上不同深度土壤水分的分布特征不同。其中,迎风坡(0.81%)与丘底(0.66%)的土壤水分高于丘顶(0.57%)与背风坡(0.53%);表层土壤水分在迎风坡与背风坡(包括丘顶和丘底)上有显著性差异,其余微地貌上的不同深度土壤水分无显著差异。

(2) 地形因子对土壤水分的影响大于植被因子。影响表层土壤水分的主要因子是坡度和坡向,均与土壤水分呈负相关关系;影响中层和深层土壤水分的主要因子是灌木盖度,与土壤水分呈负相关关系。

(3) 3 种模型中,随机森林模型的拟合效果最优(R^2 最大, RMSE 最小),广义加性和广义线性模型次之。

本研究综合多个地形和植被因子,在小尺度上利

用 3 个模型对比探讨了地形和植被因子在不同微地貌上对不同深度土壤水分的影响,研究结果可为该地区未来可持续风沙治理提供科学的依据。在今后的研究中,可以进一步结合气象、土壤理化性质等因素深入研究多种因素对土壤水分的影响,同时可以将其与沙丘不同微地貌上的生态水文过程联系起来,探索科学合理的固沙模式。

参考文献 (References):

- [1] 宋洁, 温璐, 王凤歌, 等. 乌兰布和沙漠生态系统服务价值时空动态[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2201-2211.
Song J, Wen L, Wang F G, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value in Ulan Buh Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2201-2211.
- [2] 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.
- [3] 洪光宇, 王晓江, 王少昆, 等. 沙地土壤水分时空动态研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 390-398.
Hong G Y, Wang X J, Wang S K, et al. Research progress on spatiotemporal dynamics of soil moisture in sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 390-398.
- [4] Mohanty B P, Skaggs T H. Spatio-temporal evolution and time-stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope, and vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(9): 1051-1067.
- [5] Moeslund J E, Arge L, Bøcher P K, et al. Topographically controlled soil moisture is the primary driver of local vegetation patterns across a lowland region[J]. Ecosphere, 2013, 4(7): 1-26.
- [6] 王锐, 孙权, 吴向伟. 腾格里沙漠东南缘不同地形下土壤水分空间变化动态研究[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(4): 756-759.
Wang R, Sun Q, Wu X W. The spatial dynamics of the soil moisture under different terrain conditions in the southeast edge of tengger desert[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(4): 756-759.
- [7] 李军, 王新军, 贾宏涛, 等. 古尔班通古特沙漠南缘干季土壤水分含量空间异质性[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1628-1636.
Li J, Wang X J, Jia H T, et al. Multi-scale spatial heterogeneity of soil moisture in the South Gurbantunggut Desert during dry period[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1628-1636.
- [8] 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 H F, Xiao Z Y, Yao H J, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in dendritic sand dune over Gurbantunggut Desert in central Eurasia [J]. Advances in Water Science, 2013,24(6):771-777.
- [9] 宋春武,蒋进,付恒飞,等.古尔班通古特沙漠人工林土壤水分及其影响因素[J].干旱区地理,2009,32(5):704-710.
- Song C W, Jiang J, Fu H F, et al. Soil moisture in plantation area and its affecting factors in the Gurban-tonggute Desert [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(5):704-710.
- [10] 张艳灵,张定海,宁婷,等.古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘上土壤水分与地形-植被因子的关系[J].水土保持学报,2023,37(4):258-266,277.
- Zhang Y L, Zhang D H, Ning T, et al. Relationship between soil moisture and topography-vegetation factors on fixed dunes in the southern margin of the Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):258-266,277.
- [11] 付华,周志宇,陈善科.腾格里沙漠东南缘飞播区白沙蒿植被密度与土壤水分关系的研究[J].中国沙漠,2001,21(3):265-270.
- Fu H, Zhou Z Y, Chen S K. A study on relationship between vegetation density and soil water content of *Artemisia sphaerocephala* air-sown grassland in south-eastern edge of tengger desert, Inner Mongolia, China [J]. Journal of Desert Research, 2001,21(3):265-270.
- [12] 王明娜,张定海,张志山,等.古尔班通古特沙漠灌木冠幅预测模型[J].中国沙漠,2022,42(4):139-150.
- Wang M N, Zhang D H, Zhang Z S, et al. Canopy width prediction models for the Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(4):139-150.
- [13] 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 Gurbantunggut Desert [J]. Ecological Science, 2022,41(5):81-89.
- [14] 孟欢欢,张媛媛,周晓兵,等.古尔班通古特沙漠草本植物生物量分配特征[J].中国沙漠,2022,42(1):96-107.
- Meng H H, Zhang Y Y, Zhou X B, et al. Biomass allocation patterns of herbaceous plants in the Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(1):96-107.
- [15] 李传金,胡顺军.不同天气条件下古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落能量通量日变化特征[J].中国科学院大学学报,2021,38(4):567-575.
- Li C J, Hu S J. Diurnal variation of energy flux of *Haloxylon ammodendron* community in the southern margin of Gurbantunggut Desert under different weather conditions [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021,38(4):567-575.
- [16] 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.
- [17] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(5/6):397-410.
- Li X R, Zhang Z S, Huang L, et al. Review on eco-hydrological process and mutual feedback mechanism of artificial vegetation system in sandy areas of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013,58(5/6):397-410.
- [18] 赵延延.广义线性模型在医疗器械临床试验中的应用研究[D].北京:北京协和医学院,2019.
- Zhao Y Y. Research on the application of generalized linear model in clinical trials of medical devices [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2019.
- [19] 柯慧.广义加性模型在医疗费用控制的应用[D].天津:天津医科大学,2011.
- Ke H. The application of generalize additive models in medical cost control [D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2011.
- [20] 武炜杰.随机森林算法的应用与优化方法研究[D].江苏无锡:江南大学,2021.
- Wu W J. Research on application and optimization method of random forests algorithm [D]. Wuxi, Jiangsu: Jiangnan University, 2021.
- [21] 石莎,冯金朝,邹学勇.不同地形条件对沙漠植物生长和沙地土壤水分的影响[J].干旱区地理,2007,30(6):846-851.
- Shi S, Feng J C, Zou X Y. Effects of the fixed dune topography on soil water and plant growth [J]. Arid Land Geography, 2007,30(6):846-851.
- [22] 张世才,王慧娟,张定海,等.腾格里沙漠东南缘3种沙丘4种微地貌上土壤水分与地形-植被因子之间的关系[J].甘肃农业大学学报,2023,58(3):160-168,179.
- Zhang S C, Wang H J, Zhang D H, et al. Relationship between soil moisture and topography-vegetation factors on three types of sand dunes and four types of microgeomorphology in the southeastern margin of Tengger Desert in Northern China [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023,58(3):160-168,179.
- [23] 李从娟,雷加强,徐新文,等.古尔班通古特沙漠土壤水分与化学性质的空间分布[J].生态学报,2014,34(15):4380-4389.
- Li C J, Lei J Q, Xu X W, et al. Spatial pattern for soil water and chemical properties in The Gurbantunggut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(15):4380-4389.

- [24] Enoki T, Kawaguchi H, Iwatsubo G. Topographic variations of soil properties and stand structure in a *Pinus thunbergii* plantation[J]. Ecological Research, 1996,11(3):299-309.
- [25] 马风云,李新荣,张景光,等.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 F Y, Li X R, Zhang J G, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(5):789-795.
- [26] 龙利群,李新荣.微生物结皮对两种一年生植物种子萌发和出苗的影响[J].中国沙漠,2002,22(6):581-585.
Long L Q, Li X R. Effect of soil microbiotic crust on seed germination and emergence of two annual herb species: *Bassia dasyphlla* and *Eragrostics poaeoides* [J]. Journal of Desert Research, 2002,22(6):581-585.
- [27] 贾海坤,刘颖慧,徐霞,等.皇甫川流域柠条林地水分动态模拟:坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系[J].植物生态学报,2005,29(6):910-917.
- Jia H K, Liu Y H, Xu X, et al. Simulation of soil water dynamics in a caragana intermedia woodland in huangfuchuan watershed: Relationships among slope, aspect, plant density and soil water content[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005,29(6):910-917.
- [28] 张雪皎,高贤明,吉成均,等.中国北方5种栎属树木多度分布及其对未来气候变化的响应[J].植物生态学报,2019,43(9):774-782.
Zhang X J, Gao X M, Ji C J, et al. Response of abundance distribution of five species of *Quercus* to climate change in Northern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019,43(9):774-782.
- [29] Wang A, Goslee S C, Miller D A, et al. Topographic variables improve climatic models of forage species abundance in the northeastern United States [J]. Applied Vegetation Science, 2017,20(1):84-93.
- [30] Sainani K L. Multivariate regression: The pitfalls of automated variable selection[J]. Pm & R, 2013,5(9):791-794.

(上接第181页)

- [23] 国佳欣,朱青,赵小敏,等.不同土地利用类型下土壤有机碳含量的高光谱反演[J].应用生态学报,2020,31(3):863-871.
Guo J X, Zhu Q, Zhao X M, et al. Hyper-spectral inversion of soil organic carbon content under different land use types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(3):863-871.
- [24] 李龙,秦富仓,姜丽娜,等.土地利用方式和地形对半干旱区土壤有机碳含量的影响[J].土壤,2019,51(2):406-412.
Li L, Qin F C, Jiang L N, et al. Effects of land use type and terrain on soil organic carbon (SOC) content in semi-arid region[J]. Soils, 2019,51(2):406-412.
- [25] 唐海涛,孟祥添,苏循新,等.基于CARS算法的不同类型土壤有机质高光谱预测[J].农业工程学报,2021,37(2):105-113.
Tang H T, Meng X T, Su X X, et al. Hyperspectral prediction on soil organic matter of different types using CARS algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(2):105-113.
- [26] 王富华,黄容,高明,等.生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J].土壤学报,2019,56(4):929-939.
Wang F H, Huang R, Gao M, et al. Effect of combined application of biochar and straw on organic carbon content in purple soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56(4):929-939.
- [27] 张玮,李鹏,肖列,等.黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响[J].土壤学报,2019,56(5):1140-1150.
Zhang Y, Li P, Xiao L, et al. Effects of topography and land use on soil organic carbon in hilly region of Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5):1140-1150.
- [28] 郭治兴,袁宇志,郭颖,等.基于地形因子的土壤有机碳最优估算模型[J].土壤学报,2017,54(2):331-343.
Guo Z X, Yuan Y Z, Guo Y, et al. Optimal estimation model of soil organic carbon based on the terrain factor [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(2):331-343.
- [29] 王绍强,周成虎.中国陆地土壤有机碳库的估算[J].地理研究,1999,18(4):349-356.
Wang S Q, Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China [J]. Geographical Research, 1999,18(4):349-356.
- [30] 周国模,姜培坤.不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响[J].水土保持学报,2004,18(6):68-70,83.
Zhou G M, Jiang P K. Changes in active organic carbon of erosion red soil by vegetation recovery[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(6):68-70,83.