

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

张艳灵¹, 张定海¹, 宁 婷¹, 张志山², 单立山³, 陈国鹏³, 张正中³

(1.甘肃农业大学理学院数量生物研究所,兰州 730070;

2.中国科学院西北生态环境资源研究院,沙坡头沙漠研究试验站,兰州 730000;3.甘肃农业大学林学院,兰州 730070)

摘要: 土壤水分是干旱和半干旱生态系统格局和过程的主要驱动力,地形—植被因子是小尺度上影响土壤水分的主要因子。以古尔班通古特沙漠南缘北沙窝附近固定沙丘上不同深度的土壤水分(表层 0—40 cm、中层 40—200 cm、深层 200—300 cm 和整体 0—300 cm)作为研究对象,利用广义线性模型(GLM)、广义加性模型(GAM)和随机森林(RF)模型研究了土壤水分与地形—植被因子之间的关系和变化规律。结果表明:(1)不同深度的土壤水分均呈现一致的单峰分布,不同深度土壤水分的大小顺序为深层>中层>表层,且两两之间具有显著差异。(2)GLM 和 GAM 模型得到的影响不同深度土壤水分的植被和地形因子完全相同,RF 模型的精度优于 GLM 和 GAM 模型。(3)地形因子海拔、坡度、高差和植被因子灌木多度与其影响的不同深度的土壤水分呈负相关关系,地形因子坡向(规定正东方向为 0,顺时针旋转)和植被因子生物量与其影响的土壤水分呈正相关关系。植被因子草本盖度与表层土壤水分呈正相关关系,与中层土壤水分呈负相关关系。研究结果可为研究区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提供理论参考。

关键词: 土壤水分; 影响因子; 广义线性模型; 广义加性模型; 随机森林模型; 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: 1009-2242(2023)04-0258-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.032

Relationship Between Soil Moisture and Topography-vegetation Factors on Fixed Dunes in the Southern Margin of the Gurbantunggut Desert

ZHANG Yanling¹, ZHANG Dinghai¹, NING Ting¹, ZHANG Zhishan²,

SHAN Lishan³, CHEN Guopeng³, ZHANG Zhengzhong³

(1.Center for Quantitative Biology, College of Science, Gansu Agricultural University,

Lanzhou 730070; 2.Shapotou Desert Research Station, Northwest Institute of Ecological Environment and Resources,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 3.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: Soil moisture is the main driving force for the patterns and processes in arid and semi-arid ecosystem, and topography-vegetation factors are the main factors affecting soil moisture on the small-scale. Soil moisture at different depths (0—40 cm in surface layer, 40—200 cm in middle layer, 200—300 cm in deep layer and 0—300 cm in whole) on fixed sand dunes near the northern sand dune in the southern edge of the Gurbantunggut Desert was used as a study object to investigate the relationship and variation patterns between soil moisture and topography-vegetation factors using generalized linear model (GLM), generalized additive model (GAM) and random forest (RF) models. The results showed that: (1) Soil moisture at different depths showed a consistent single-peaked distribution, and the magnitude of soil moisture at different depths was in the order of: deep > middle > surface, and there were significant differences between the two. (2) The vegetation and terrain factors affecting soil moisture at different depths obtained by GLM and GAM models were identical, and the accuracy of the RF model was better than that of GLM and GAM models. (3) Topographic factors elevation, slope, height difference and vegetation factors shrub multiplicity were negatively correlated with

收稿日期:2022-11-22

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:张艳灵(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事生态水文模型研究。E-mail:zyl2692184324@163.com

通信作者:张定海(1981—),男,博士,副教授,主要从事生态水文模型、空间统计和经济统计研究。E-mail:zhangdh@gsau.edu.cn

soil moisture at different depths under their influence, while topographic factors slope direction (specified as 0 due east, rotated clockwise) and vegetation factor biomass were positively correlated with the soil moisture they affected. The vegetation factor herbaceous cover was positively correlated with surface soil moisture and negatively correlated with mesocosm soil moisture. The results of the study can provide theoretical reference for the formulation of corresponding wind and sand control measures and the establishment of scientific and reasonable vegetation sand fixation model in the study area.

Keywords: soil moisture; influence factor; generalized linear model; generalized additive model; random forest model; Gurbantunggut Desert

中国是世界上荒漠化土地面积最多的国家之一^[1],沙漠生态系统是干旱、半干旱生态系统的主要类型。土壤水分是沙漠生态系统植被的格局和过程的驱动力,对其分布特征和影响因素的研究对遏制荒漠化和建立沙区水文过程和生态过程之间的定量联系具有重要意义^[2-4]。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。已有研究^[5]表明,地形因子和植被因子是小尺度上影响土壤水分的主要因子,地形因子是气候、植被等影响因子的主要载体,植被因子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和植被因子之间的关系,是深入系统掌握沙区土壤水分分布特征和规律的前提,也是未来在开展防风固沙工程和沙区植被建设与管理的保障^[6]。

在干旱和半干旱地区,不同尺度上控制和影响土壤水分的主要因素有降水、土壤类型、地形和植被因素等。降水是干旱半干旱地区土壤水分的主要来源^[7]。不同土壤质地对土壤水分的涵养能力存在差异,例如,结构疏松、保水力差、下渗快的风沙土可使深层土壤水分得到表层土壤水分的补给,质地比较稳定、物理稳定性变化小的灰钙土阻止深层土壤水分的补给^[8]。不同的植被覆盖度和植被类型通过影响土壤水分的入渗和蒸散发等进而影响土壤水分的分布。但是,由于这些众多因素的相互作用和多重作用,很难确定它们的相对重要性^[9]。土壤水分在空间上具有高度的变异性,并以非线性的方式影响生态水文过程,导致土壤水分及其影响因素具有显著的尺度效应^[10]。在大尺度上,主要采用回归和地统计分析研究土壤水分和地形环境因素之间关系^[11]。然而,当涉及大量变量时,这些方法可能不适合。在这种情况下,作为基本线性变换的推广,可以采用主成分分析(PCA),线性典型相关分析(COR)和冗余分析(RDA)等方法进行分析。虽然这些线性方法可能会成功,但土壤水分与影响其变化的变量之间的单调相关的基本假设尚未得到验证^[12]。在小尺度上,主要采用地统计学方法确定土壤水分的空间变异和空间

相关性^[13]。已有研究^[14]表明,地形(坡向、坡度、坡位等)、植被(盖度、物种等)等因素都对土壤水分的空间变异性有显著的影响。本研究采用样带—网格数据,运用广义线性、广义加性模型和随机森林法,对古尔班通古特沙漠固定沙丘上不同深度(表层 0—40 cm、中层 40—200 cm、深层 200—300 cm 和整体 0—300 cm)土壤水分与地形—植被因子之间的关系开展研究,以期在小尺度上探讨地形—植被因子对土壤水分的影响特征和规律。研究结果可对该地区今后植物固沙和生态系统的修复提供重要的科学依据。

1 研究区概况

古尔班通古特沙漠是我国第二大沙漠^[15],位于 44°15′00″—46°50′00″N,84°50′00″—91°20′00″E,是我国最大的固定和半固定沙漠^[16],面积约 4.88 万 km²,平均海拔 300~600 m,年平均气温 6.6 °C^[17]。其气候类型属于典型的温带大陆性干旱气候^[18],年降水量 80~160 mm,年蒸发量为 2 000~2 800 mm,降水多集中在冬季和春季^[19],冬天积雪可达 10~30 cm,几乎没有地表径流。沙漠边缘地下水深度在 5 m 以上,而沙漠腹地地下水深度在 16 m 以下。沙漠内植物种类较丰富,可达百余种,优势灌木和半灌木主要有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭(*White shuttle*)、胡杨(*Populus euphratica*)、琵琶柴(*Pipa firewood*)、红柳(*Raeda rubra*)、白刺(*Thornum album*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)等^[20]。

2 材料与方法

2.1 试验设计

试验于 2019 年 8 月,在对古尔班通古特沙漠南缘北沙窝附近(87°55′12″E,44°22′24″N)的沙丘类型和固沙植被全面考察后选取 1 块有代表性的固定沙丘样地(图 1),样地大小为 40 m×140 m,将样地划分为 4 m×4 m 的小样方,共有 10 行(A~J 行)37 列(1~37 列)共计 370 个小样方。选取样地中的 3 行(C、E、I 行)中的样方作为土壤水分采样点,在沙丘不同微地貌(迎风坡、背风坡、丘顶和丘底)起伏较大的地方加密采样,共计 72 个土壤水分采样点。土壤水

分的测定使用土钻取样烘干(105℃)称重法,取样方式采用点式取样法,取样深度共有 18 层,分别为 0—5,5—15,15—25,25—35,35—50 cm,在 50 cm 以下每隔 20 cm 采样 1 次,土壤水分均为土壤质量含水量。利用 50 cm×50 cm 的草本小样方调查 E 行中每个小样方(4 m×4 m)中的草本盖度、草本多度、凋落物以及生物量。同时,为研究固沙植被的空间格局,利用标记牌标记样地内每株灌木,测定其株高和冠幅(东西和南北方向)以及所在样方的灌木盖度和多度。利用 GPS—RTK 定位仪对样地中每株灌木和每个样方的 4 个顶点进行定位测量,得到其海拔^[21]。结合样方定位点的数据,利用数字高程模型计算每个小样方对应的地形因子,主要包括坡度、坡向(规定正东方向为 0°,顺时针旋转)和高差(样方顶点的高程之差)^[6],具体计算方法见文献[6]。

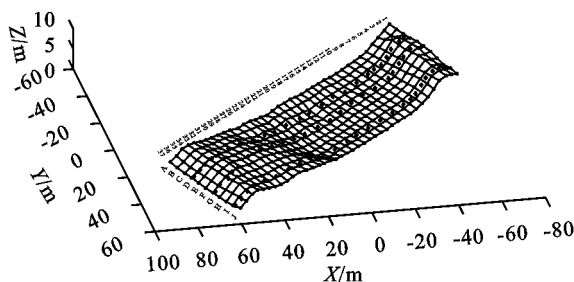


图 1 样地的划分与采样点示意

2.2 研究方法

2.2.1 土壤水分的划分和数据标准化 已有研究^[22]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% 的固沙灌木根系分布在 200—300 cm 的土层范围内。因此,本研究将土壤水分划分为表层 0—40 cm、中层 40—200 cm、深层 200—300 cm 和整体 0—300 cm 4 部分。其中,整体 0—300 cm 作为整个样地土壤水分的参照^[23]。同时,考虑到模型中不同指标的取值范围和量纲不一致,采用离差标准化法将所有指标进行标准化,公式为:

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

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

$$i=1,2,\dots,10; j=1,2,3,4$$

式中: x_i 为地形因子和植被因子; y_j 为不同深度土壤水分; $X_i, Y_j \in [0, 1]$,无量纲。

2.2.2 广义线性模型 广义线性模型(generalized linear model, GLM)是线性模型的数学扩展,其相对于经典线性回归模型的优点是,其变量可以是连续或分类变量,允许数据存在非线性性,公式为:

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

式中: $g(\mu)$ 为连接估计平均值与响应变量分布的链接函数; 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。

2.2.3 广义加性模型 广义加性模型(generalized additive model, GAM)是 GLM 的半参数扩展,它结合响应和预测变量之间的线性和非线性关系,指定平滑函数来拟合数据的非线性响应曲线。GAM 响应曲线的形状并不是预先定义的,因此与基于参数响应曲线的 GLM 相比, GAM 响应曲线的建模更接近数据,公式为:

$$g(\mu) = \beta_0 + s_1(x_1) + s_2(x_2) + \dots + s_i(x_i) + \epsilon \quad (3)$$

式中: $g(\mu)$ 为估计平均值连接到响应变量分布的链接函数; β_0 为截距; s_i 为要估计的平滑函数; x_i 为预测值; ϵ 为误差,服从高斯分布。

2.2.4 随机森林 随机森林(random forest, RF)通过生成大量回归树集合,形成“森林”。然后通过从观测数据中随机选择 1 个训练数据集来构建每棵决策树,其优点是采用集成算法,精度往往比大多数单个算法好。同时,由于 2 个随机性的引入,随机森林算法不会有过拟合现象,还可以输出自变量重要性的度量。本研究中,最大树的数量设置为 2 000 棵,采用 10 折交叉验证检验模型的性能,同时基于 IncMSE 方法给出影响土壤水分的变量的重要性^[24]。

3 结果与分析

3.1 不同深度土壤水分及相关影响因素的描述性统计

由图 2 可知,不同深度的土壤水分的总体分布较为一致,呈单峰分布。不同深度土壤水分的大小顺序为深层(200—300 cm) > 中层(40—200 cm) > 表层(0—40 cm)。不同水分主要集中在(取上下 4 分位数),深层 [1.584%, 2.232%]、中层 [1.333%, 2.124%]、表层 [0.946%, 1.557%]、整体 [1.427%, 1.939%]。单因素方差分析和多重比较结果表明,表层、中层和深层土壤水分两两之间均具有显著的差异,中层与整体(0—300 cm)土壤水分之间无显著性差异。由土壤水分的相关因素的描述性统计结果(表 1)可知,最大值和最小值反映变量的波动大小,中位数反映数据的集中趋势,变异系数刻画变量分辨信息的能力(即变量的区分度),变异系数越大,表明该指标的信息分辨能力就越强,反之则越弱。除海拔,土壤水分的影响因素信息分辨能力均较强。

3.2 地形—植被因子对不同深度土壤水分的影响

将土壤水分作为被解释变量,样方所在的海拔、坡度、坡向和高差作为地形因子解释变量,灌木的盖

度、灌木多度、草本的盖度、草本多度、草本的生物量以及凋落物作为植被因子解释变量,分别利用 GLM、GAM 和 RF 建立模型并检验各个因子的显著性。

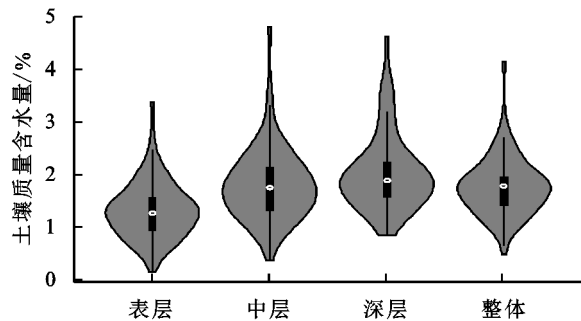


图 2 不同深度土壤水分的描述性统计

表 1 影响土壤水分的地形—植被因素的描述性统计

变量	最小值	最大值	中位数	变异系数
海拔	394.326	400.127	396.409	0.004
坡度	0.509	21.283	5.487	0.753
坡向	22.430	354.852	112.360	0.704
高差	0.264	5.808	2.626	0.652
灌木盖度	0	100.000	14.595	1.086
灌木多度	0	1.938	0.313	0.928
草本盖度	3.000	84.000	17.000	0.768
草本多度	4.000	736.000	74.000	1.122
生物量	2.200	164.720	22.040	0.863
凋落物	0	1006.240	42.440	1.604

由表 2 和表 3 可知, GLM 模型得到对表层、中层、深层和整体土壤水分有显著影响的地形因子主要

为海拔,同时,地形因子坡度对表层土壤水分有显著的影响,植被因子草本盖度和生物量对中层土壤水分有显著的影响,地形因子高差对深层土壤水分有显著的影响; GAM 模型得到对表层、中层、深层和整体土壤水分有显著影响的地形因子主要为海拔和高差,同时,地形因子坡度对表层土壤水分有显著的影响,植被因子草本盖度和生物量对中层土壤水分有显著的影响。值得注意的是,由于 GLM 模型本身的特点,所有因子在 GLM 模型中均与土壤水分表现为线性相关关系,但在 GAM 模型中,大部分因子对土壤水分仍然呈现线性相关关系(估计的自由度 edf 约等于 1)。其中,海拔和高差对表层、中层和整体土壤水分均呈现出一定的非线性影响的特征(估计的自由度 edf>>1)。表 4 为 RF 模型得到变量的相对重要性,表中列出相对重要度排名前 4 名的变量。由表 4 可知,大部分地形因子的重要性常常高于植被因子。其中,地形因子海拔、高差对不同深度的土壤水分均具有较高的的重要性,地形因子坡度对表层土壤水分具有较高的的重要性。与 GLM 和 GAM 模型不同的是,在 RF 模型中坡向对中层和深层土壤水分具有较高的的重要性。同时,植被因子的草本多度对表层土壤水分具有较高的的重要性,植被因子的生物量仅对中层土壤水分具有较高的的重要性,植被因子的灌木多度仅对中层土壤水分具有较高的的重要性。

表 2 基于广义线性模型的影响不同深度土壤水分的变量的显著性检验

变量	0—40 cm		40—200 cm		200—300 cm		0—300 cm	
	估计值	p	估计值	p	估计值	p	估计值	p
海拔	−0.248	0.011 *	−0.299	0.006 **	−0.190	0.010 **	−0.421	0 ***
坡度	−0.203	0.027 *	0.087	0.400	0.005	0.940	0.018	0.855
坡向	−0.105	0.203	0.106	0.250	0.011	0.862	−0.034	0.709
高差	−0.008	0.934	−0.001	0.996	−0.290	0 ***	−0.263	0.021 *
灌木盖度	0.111	0.106	0.006	0.930	0.093	0.064	0.083	0.255
灌木多度	−0.049	0.649	0.011	0.929	−0.111	0.163	−0.041	0.730
草本盖度	−0.224	0.091	−0.415	0.005 **	−0.106	0.270	−0.223	0.123
草本多度	0.181	0.226	0	0.999	−0.049	0.654	−0.181	0.284
生物量	0.217	0.155	0.649	0 ***	0.111	0.310	0.337	0.046 *
凋落物	−0.092	0.313	−0.094	0.338	−0.013	0.857	−0.060	0.560

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$; *** 表示 $p<0.001$ 。下同。

表 3 基于广义加性模型的影响不同深度土壤水分的变量的显著性检验

变量	0—40 cm		40—200 cm		200—300 cm		0—300 cm	
	edf	p	edf	p	edf	p	edf	p
海拔	2.455	0 ***	1.956	0 ***	1.707	0.019 *	1.928	0 ***
坡度	1.000	0.001 ***	1.757	0.252	1.000	0.546	1.000	0.101
坡向	1.927	0.243	1.547	0.541	1.000	0.935	1.000	0.538
高差	3.860	0.001 ***	1.938	0.028 *	2.415	0 ***	1.958	0 ***
灌木盖度	1.000	0.362	1.000	0.338	1.342	0.385	1.000	0.918
灌木多度	1.410	0.748	1.769	0.243	1.899	0.320	1.741	0.320
草本盖度	1.000	0.162	1.000	0.003 **	1.190	0.239	1.783	0.116
草本多度	1.538	0.378	1.000	0.431	1.000	0.515	1.000	0.285
生物量	1.000	0.098	1.000	0.001 ***	1.000	0.496	1.000	0.231
凋落物	1.874	0.243	1.000	0.431	1.000	0.822	1.000	0.730

表 4 基于随机森林模型的影响不同深度土壤水分的变量的重要度

排名	0—40 cm		40—200 cm		200—300 cm		0—300 cm	
	变量	重要性/%	变量	重要性/%	变量	重要性/%	变量	重要性/%
1	海拔	28.550	海拔	5.784	高差	31.029	海拔	28.967
2	坡度	10.268	高差	5.357	海拔	24.087	高差	17.600
3	高差	10.149	坡向	4.872	灌木多度	11.268	灌木多度	9.905
4	草本多度	5.488	生物量	4.697	坡向	9.852	生物量	6.205

采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)对 3 个模型进行评价, RMSE 尽量小的情况下 R^2 越大模型越好。其中, R^2 的值越接近 1, 说明模型对观测值的拟合程度越好。由表 5 可知, 不同深度上模型的 RMSE 从小到大的顺序为 RF<GLM<GLM, 决定系数(R^2)从大到小的顺序为 RF>GLM>GLM, 且 RF 模型的决策系数均达到 0.92 以上。由此可以看出, 基于机器学习算法的 RF 模型最优, 其次是具有非线性拟合能力的 GAM 模型, 模型精度最小的是 GLM 模型。

表 5 GLM、GAM 和 RF 模型的精度

土壤深度	R^2			RMSE		
	GLM	GAM	RF	GLM	GAM	RF
表层	0.411	0.702	0.929	0.100	0.071	0.051
中层	0.413	0.568	0.925	0.116	0.097	0.063
深层	0.658	0.733	0.940	0.079	0.065	0.042
整体	0.595	0.746	0.932	0.116	0.092	0.065

3.3 地形—植被因子对不同深度土壤水分影响的趋势分析

为确定不同深度土壤水分随地形—植被因子的变化趋势, 基于 GLM、GAM 和 RF 3 种模型利用各自的响应曲线确定其变化趋势。从基于 GLM 模型(图 3)和 GAM 模型(图 4)的响应曲线图可以看出, 整体而言, 不同地形—植被因子对土壤水分的响应曲线均表现一致的增减趋势。具体而言, 地形因子海拔、高差、坡度与其影响的不同深度的土壤水分呈负相关关系, 生物量与其影响的土壤水分呈正相关关系。随着植被因子草本盖度的增加, 中层土壤水分逐渐减少。值得注意的是, 一些因子在 GLM 中表现为线性趋势而在 GAM 中表现出明显的非线性变化的趋势。例如, 海拔、高差在 GAM 模型中对其影响的土壤水分的影响呈现出明显的非线性变化趋势。

从基于 RF 的响应曲线图(图 5)可以看出, 地形—植被因子对土壤水分的影响呈现出显著的非线性的变化趋势, 随着地形因子海拔、坡度、高差和植被因子灌木多度的增加, 不同深度的土壤水分均逐渐减少; 随着地形因子坡向和植被因子生物量的增加, 不同深度的土壤水分均逐渐增加; 随着植被因子草本盖度的增加, 表层土壤水分逐渐增加。

4 讨论

4.1 不同深度土壤水分的分布特征

古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘上不同深度的土壤水分总体分布较为一致, 均呈单峰分布。不同深度质量含水量的大小顺序为深层(200—300 cm)>中层(40—200 cm)>表层(0—40 cm), 这与李军^[25]在小尺度下得到的土壤水分随土层深度增加呈显著升高趋势的结论相一致。这一方面是因为沙丘表层土壤水分的蒸发较深层强; 另一方面, 研究区广泛分布的生物土壤结皮和固沙植被在一定程度上可以阻止深层土壤水分的蒸发。同时, 方差分析表明, 表层、中层和深层土壤水分两两之间均具有显著的差异, 这与朱海等^[2]对古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分不同时间和不同深度土壤水分的变化规律相一致。

4.2 地形—植被因子对不同深度土壤水分影响分析

由于本研究主要研究小尺度上地形—植被因子对土壤水分的影响。因此, 研究中没有考虑太阳辐射、降水、经纬度等大尺度上对土壤水分有显著影响的因子。针对试验得到的 4 个地形因子(海拔、坡度、坡向和高差)和 6 个植被因子(灌木的盖度、多度、草本的盖度、多度、生物量和凋落物), 本研究利用 GLM、GAM 和 RF 模型确定影响研究区固定沙丘上不同深度土壤水分的地形和植被因子, 并确定土壤水分随不同因子的变化趋势。

土壤水分在沙丘不同微地貌类型上(丘顶、丘底、迎风坡和背风坡)的分布规律不同。本研究表明, 对研究区固定沙丘上不同深度的土壤水分产生重要影响首先是地形因子。其中, 海拔、高差(两点之间的高程之差, 与海拔有直接的关系)具有重要的影响, 且总体上土壤水分随着海拔、高差的增加逐渐减少。造成土壤水分随着海拔和高差递减这一现象的原因是多方面的, 一方面, 沙漠中的植被大部分生长在丘底, 同时海拔高的地方不容易聚集雨水, 而且阳光照射时间长, 蒸发比较强烈; 另一方面, 古尔班通古特沙漠的土壤水分有很大部分来自融雪降水, 由于水分的入渗作用, 使得海拔低的地方土壤水分含量高^[26]。同时, 本研究还表明, 坡度与其影响的不同深度的土壤水分呈负相关关系, 这是因为坡度与接触到的太阳辐射的角度有关, 这与邱德勋等^[27]、赵晓光等^[28]有关坡度对前程土壤水分影响的研究结论相一致。

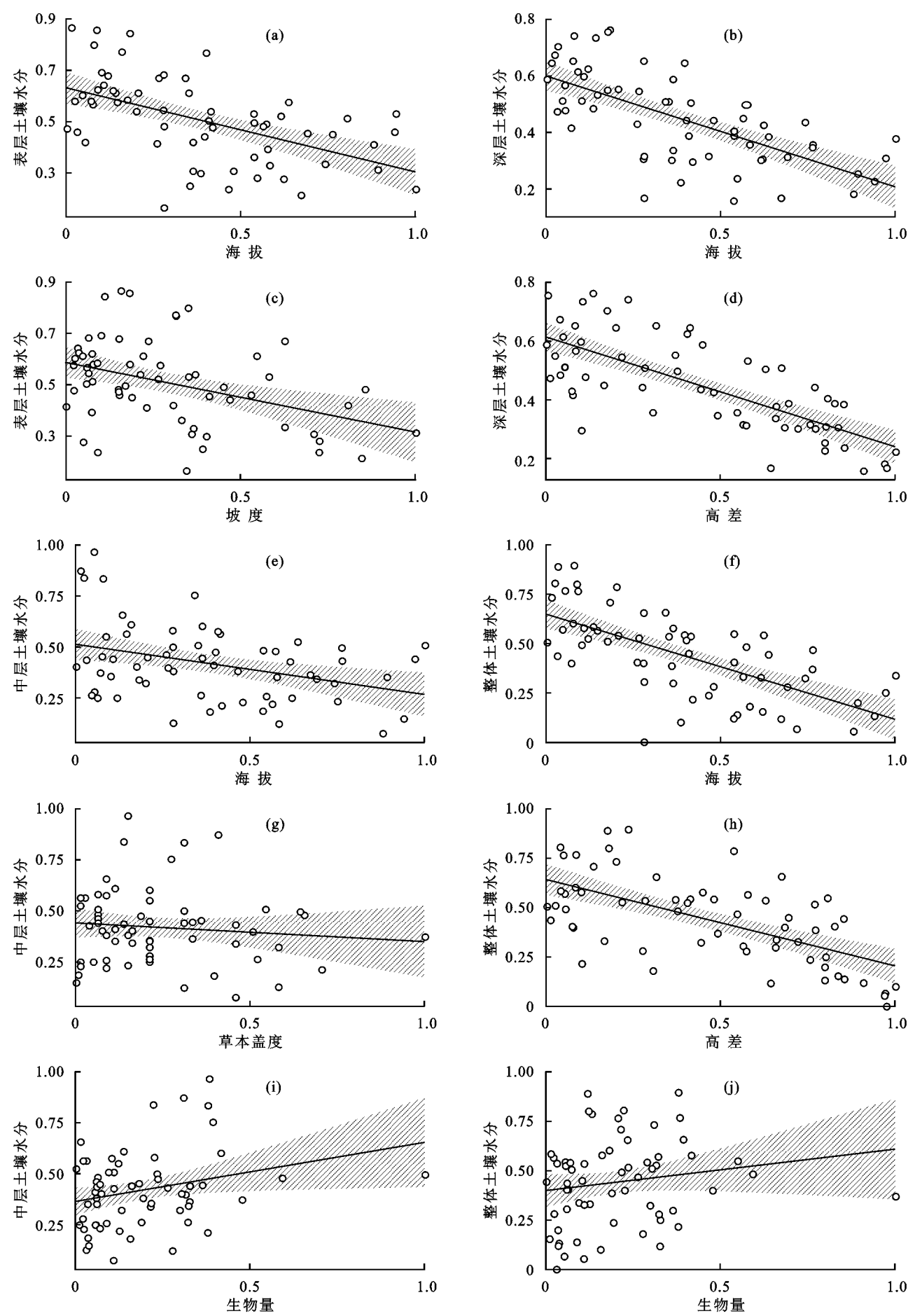


图 3 基于 GLM 模型的地形植被一因子对不同深度土壤水分影响的响应曲线

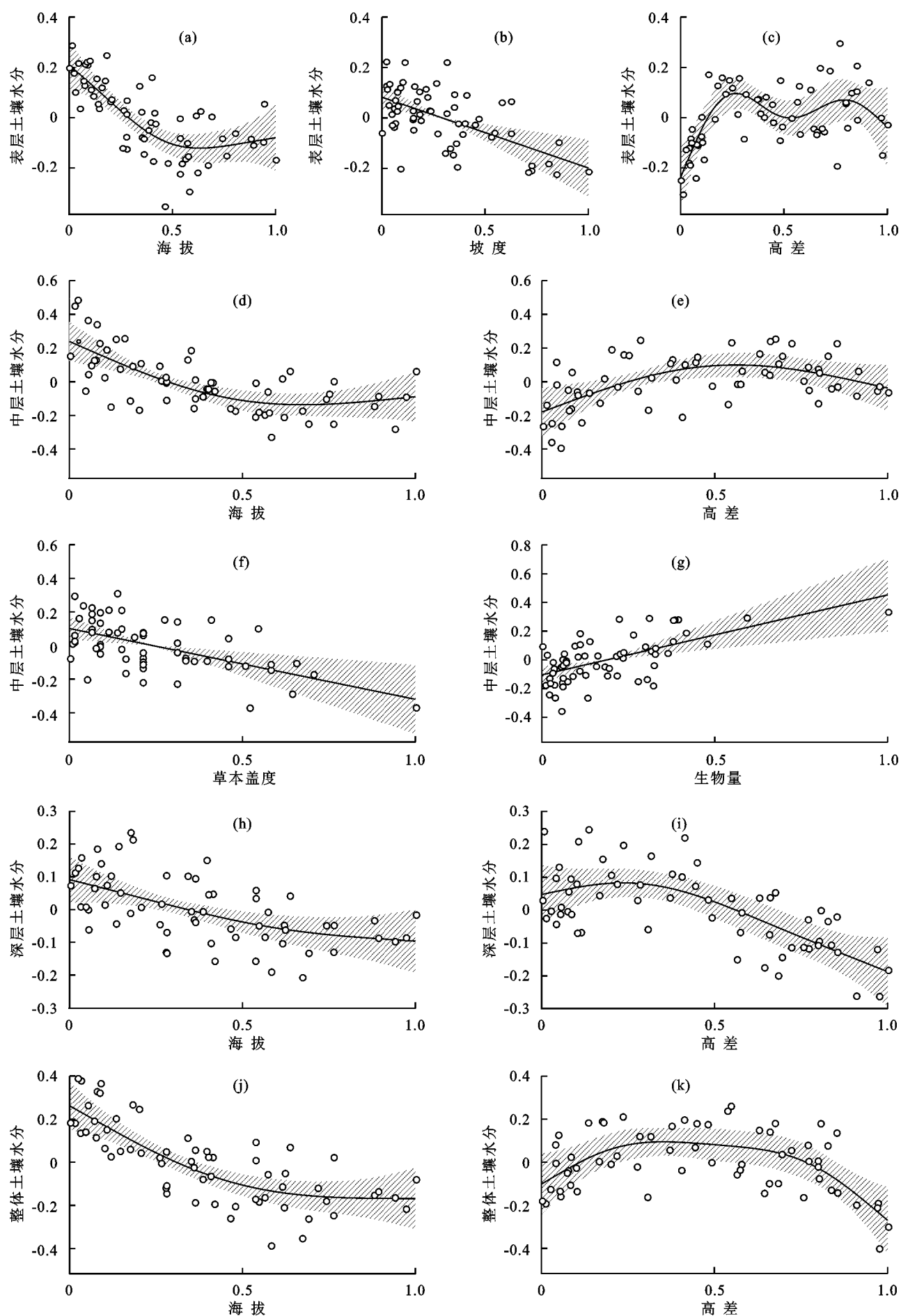


图 4 基于 GAM 模型的地形-植被因子对不同深度土壤水分影响的响应曲线

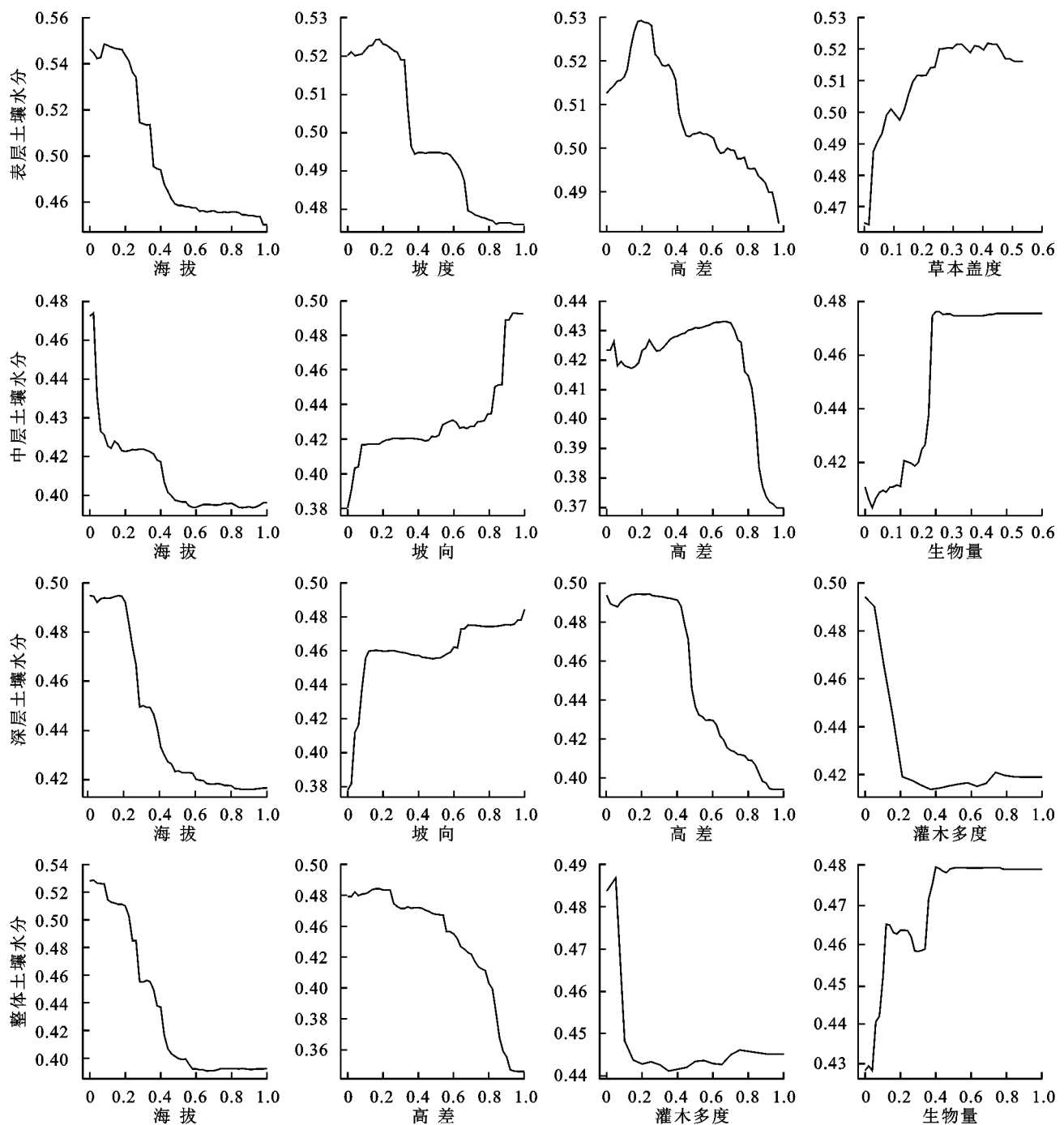


图 5 基于 RF 模型的地形—植被因子对不同深度土壤水分影响的响应曲线

造成土壤水分随着坡向的增加而逐渐增加的主要原因在于随着坡向的增加,坡向从阳坡转化为阴坡,大部分沙漠植物主要集中在阴坡,形成聚集的斑块化分布,阴坡较低的蒸发和固沙植物的汇流作用使得其上的土壤水分含量较高。在植被因子中,草本植物的生物量对中层土壤水分具有正向的重要的影响。较高的草本植物的生物量通过减少表层土壤水分的蒸发,进而对土壤中中层土壤水分具有正向的影响。同时,灌木的多度对深层土壤水分具有负向的重要影响。这一结论与 Singh 等^[29]在印度沙漠的研究和马风云等^[30]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相一致。这是因为草本植物根系浅,主要对表层和中

层的土壤水分影响大,灌木根系较深,对深层土壤水分影响大。土壤水分和灌木多度的负向关系决定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运行^[31]。同时,草本盖度与表层土壤水分呈正相关关系,与中层土壤水分呈负相关关系。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。

5 结论

(1)不同深度的土壤水分总体分布较为一致,均呈单峰分布。不同深度土壤水分的大小顺序为深

层>中层>表层,且两两之间具有显著差异。

(2)GLM 和 GAM 模型得到的影响不同深度土壤水分的植被和地形因子基本相同,但与 RF 模型得到的因子有一定的区别,RF 模型的决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 均优于 GLM 和 GAM 模型。

(3)地形因子海拔、坡度、高差和植被因子灌木多度与其影响的不同深度的土壤水分呈负相关关系,地形因子坡向和植被因子生物量与其影响的土壤水分呈正相关关系。植被因子草本盖度与表层土壤水分呈正相关关系,与中层土壤水分呈负相关关系。

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,综合土壤水分与地形—植被因子之间的关系因地制宜地开展固沙植被建设。

参考文献:

- [1] 胡静霞,杨新兵.我国土地荒漠化和沙化发展动态及其成因分析[J].中国水土保持,2017(7):55-59,69.
- [2] 朱海,胡顺军,陈永宝.古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J].土壤学报,2016,53(1):117-126.
- [3] 马全林,鱼泳,陈芳,等.干旱区沙漠化逆转过程土壤水分的空间异质性特征[J].干旱区地理,2010,33(5):716-724.
- [4] 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.
- [5] 李笑吟,毕华兴,张志,等.晋西黄土区坡面尺度地形因子对土壤水分状况的影响[J].北京林业大学学报,2006,28(4):51-56.
- [6] 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.
- [7] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.科尔沁沙地沙质草场土壤水分对干旱和降雨响应的空间变异性[J].水土保持学报,2005,19(1):140-144.
- [8] 苏莹,陈林,李月飞,等.荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征[J].干旱区研究,2018,35(6):1308-1316.
- [9] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: Implications for runoff and erosion control[J].Catena,1998,32:55-70.
- [10] Andrew W W, Rodger B G, et al. Caling of soil moisture: A hydrologic perspective[J].Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2002,30:149-180.
- [11] Western A W, Grayson R B, Blöschl G, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices[J].Water Researces Research,1999,35(3):797-810.
- [12] Zhang J, Oxley R R B. A comparison of three methods of multivariate analysis of upland grasslands in North Wales[J].Journal of Vegetation Science,1994,5:71-76.
- [13] Huisman J A, Snepvangers J J J C, Bouten W, et al. Mapping spatial variation in surface soil water content: Comparison of ground-penetrating radar and time-domain reflectometry[J].Journal of Hydrology,2002,269(3/4):194-207.
- [14] Western A W, Zhou S L, Rodger B G, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes [J].Journal of Hydrology,2004,286(1/4):113-134.
- [15] 岳跃蒙,李晨华,徐柱,等.古尔班通古特沙漠降雨过程中梭梭与白梭梭冠层养分的变化特征[J].干旱区研究,2020,37(5):1293-1300.
- [16] 苏杰,李婷,韩国栋,等.古尔班通古特沙漠及交错带白茎绢蒿与沙拐枣节肢动物群落结构动态[J].生态学杂志,2017,36(6):1606-1613.
- [17] 李彬,武志芳,陶冶,等.古尔班通古特沙漠不同类型生物结皮对草本植物多样性影响[J].干旱区研究,2021,38(2):438-449.
- [18] 王雪芹,张元明,蒋进,等.古尔班通古特沙漠南部沙垄水分动态:兼论积雪融化和冻土变化对沙丘水分分异作用[J].冰川冻土,2006,28(2):262-268.
- [19] Luo Q H, Chen Q M, Ning H S, et al. Chronosequence-based population structure and natural regeneration of Haloxylon ammodendron plantation in the southern edge of the Gurbantungut Desert[J].Russian Journal of Ecology,2017,48:364-371.
- [20] Zhang L Y, Chen C D. On the general characteristics of plant diversity of Gurbantünggüt sandy desert[J].Acta Ecologica Sinica,2002,22(11):1923-1932.
- [21] 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.
- [22] 董光荣.中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M].北京:海洋出版社,2002:560-568.
- [23] 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(增刊1):397-410.
- [24] 李会朋,胥辉,张超,等.基于随机森林模型的云南松天然林生物量遥感估测[J].西部林业科学,2022,51(3):60-66,80.
- [25] 李军.古尔班通古特沙漠南缘土壤水分、有机碳和碱解氮的空间异质性分析[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [26] 刘建波,杨帆,王志春,等.苏打盐渍土区土壤理化性质及植物生物量与微地形空间异质性关系[J].土壤与作物,2021,10(2):163-176.

(下转第 277 页)

- 术,2015,16(4):727-732,749.
- [20] 刘国庆,张广生,杨立城.微生物菌肥在设施蔬菜重茬栽培中的应用效果分析[J].青海农技推广,2021(2):24-27.
- [21] 赵贞.微生物菌肥对日光温室黄瓜生长发育及产量品质的影响[J].中国蔬菜,2012(18):149-153.
- [22] 张佼,屈峰,朱玉尧,等.增施有机肥和微生物菌剂对春季杨凌设施番茄产量和品质的影响[J].西北农业学报,2019,28(5):767-773.
- [23] 张春楠,张瑞芳,王鑫鑫,等.硝化抑制剂和微生物菌剂对甜瓜产量及氮素利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):281-287,293.
- [24] 杨威,郭艳杰,李博文,等.氮肥与 DCD 配施对温室番茄膨果期土壤 N_2O 排放和产量的影响[J].河北农业大学学报,2013,36(3):25-29.
- [25] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等.田间土壤氮挥发的原位测定—通气法[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):205-209.
- [26] 聂文静,李博文,郭艳杰,等.氮肥与双氰胺配施对棚室黄瓜生长及土壤氮素淋失的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):13-17,22.
- [27] 张琳,孙卓玲,马理,等.不同水氮条件下双氰胺(DCD)对温室黄瓜土壤氮素损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):128-137.
- [28] 高君凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:140-144.
- [29] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:264-268.
- [30] 张浩东,贾俊香,马智勇.减氮配施不同调节剂对土壤温室气体强度与冬小麦产量的影响[J].山西农业科学,2022,50(2):191-198.
- [31] Sun Y, Hu K L, Fan Z B, et al. Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in North China using the EU-Rotate_N model[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128(6):72-84.
- [32] 譙江兰.硝化抑制剂和菌剂对设施番茄生长及土壤养分状况的影响[D].河北保定:河北农业大学,2019.
- [33] Zhao Y N, Zhang M S, Yang W, et al. Effects of microbial inoculants on phosphorus and potassium availability, bacterial community composition, and chili pepper growth in a calcareous soil: A greenhouse study[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(10):3597-3607.
- [34] 郭俊丽,刘毅,魏文学,等.双氰胺和 3,4-二甲基吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响[J].环境科学,2019,40(11):5142-5150.
- [35] 田稼,吴小杰,孙超,等.胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)的研究进展[J].中国土壤与肥料,2017(6):15-22.
- [36] 高珊.硝化抑制剂对温室番茄施氮损失的影响及微生物效应研究[D].河北保定:河北农业大学,2019.
- [37] 李晓兰,兰翔,潘振鹏,等.有机肥及 DMPP 对蔬菜生产及硝态氮淋失的影响[J].中国土壤与肥料,2018(2):118-126.
- [38] Scheer C, Rowlings D W, Firrel M, et al. Impact of nitrification inhibitor (DMPP) on soil nitrous oxide emissions from an intensive broccoli production system in sub-tropical Australia[J]. Soil Biology Biochemistry, 2014, 77(7):243-251.
- [39] 王归鹏,马乐乐,范兵华,等.微生物菌剂对番茄全有机营养栽培养分转化及产量品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(9):118-128.
- [40] 王锐,陈士勇,陈志青,等.根系分泌物对根际土壤关键氮转化过程的影响[J].作物杂志,2021(6):1-8.
- [41] 田晓楠,张丽娟,聂文静,等.设施番茄—黄瓜轮作体系适宜水氮管理和双氰胺调控模式研究[J].山东农业大学学报,2021,52(3):343-351.
- (上接第 266 页)
- [27] 邱德勋,赵佰礼,尹殿胜,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(3):72-80.
- [28] 赵晓光,吴发启,刘秉正,等.黄土高原坡耕地土壤水分主要受控因子研究[J].水土保持通报,1999,16(1):13-17,35.
- [29] Singh G, Singh B. Effect of varying soil water stress regimes on nutrient uptake and biomass production in *Dalbergia sissoo* seedlings in Indian desert[J]. Journal of Forestry Research, 2009, 20(4):307-313.
- [30] 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.
- [31] 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.